

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.785.532

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВАКУУМНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ© 2019 г. А. Е. Смирнов¹, Р. С. Фахуртдинов¹, М. Ю. Рыжова¹, С. А. Пахомова^{1,*}¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

*e-mail: mgtu2013@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.11.2017 г.

Принята к публикации 24.12.2018 г.

Исследованы технологические факторы вакуумной цементации низколегированных сталей. Рассмотрены особенности проведения циклических режимов вакуумной цементации, обусловленные изменением строения углеродного слоя, образующегося на насыщаемой поверхности, в результате каталитической диссоциации молекул ацетилен. Предложены различные варианты технологического процесса. Отмечены преимущества вакуумной цементации, которые обеспечивают повышение эксплуатационных свойств деталей машиностроения.

Ключевые слова: цементация, массоперенос углерода, углеродный потенциал, диффузионный слой, технологические факторы, концентрационные кривые

DOI: 10.1134/S0235711919020135

Цементация – наиболее востребованный процесс упрочнения нагруженных деталей машин высокой эксплуатационной надежности. Одних только зубчатых колес для удовлетворения потребностей транспортных систем требуется упрочнять ежемесячно несколько сотен тысяч. Учитывая широкие масштабы промышленного использования цементации, даже незначительное ее совершенствование способно привести к заметному технико-экономическому эффекту [1–3].

Среди способов цементации [4, 5], способных оказать решающее влияние на прочность и надежность деталей машин, особое место занимает вакуумная цементация – цементация при низком (4...15 ГПа) давлении, функцию технологической атмосферы в которой выполняет ацетилен (C₂H₂). Научные основы вакуумной цементации были разработаны в конце 70-х годов Крыловым В.С. [1, 6, 7]. В 1979 г. было получено авторское свидетельство на процесс вакуумной цементации в ацетилене, подтверждающий российский приоритет этого оригинального процесса. К сожалению, из-за отсутствия вакуумного оборудования в то время полученные результаты не были использованы для решения практических задач машиностроения.

Промышленное опробование процесса цементации в ацетилене выполнено в 1999 г. в Германии фирмой “Ipsen”. Было отмечено, что вакуумная цементация в ацетилене является последним достижением в области развития технологии науглероживания сталей промышленного назначения [8, 9]. Установленный комплекс достоинств вакуумной цементации в ацетилене стимулировал интенсивную разработку технологии и оборудования для этого процесса и их широкое практическое применение за рубежом [10–12].

С 2003 г. автоматизированные установки, обеспечивающие после науглероживания малодеформационную “сухую” закалку в потоке азота, стали производить многие за-

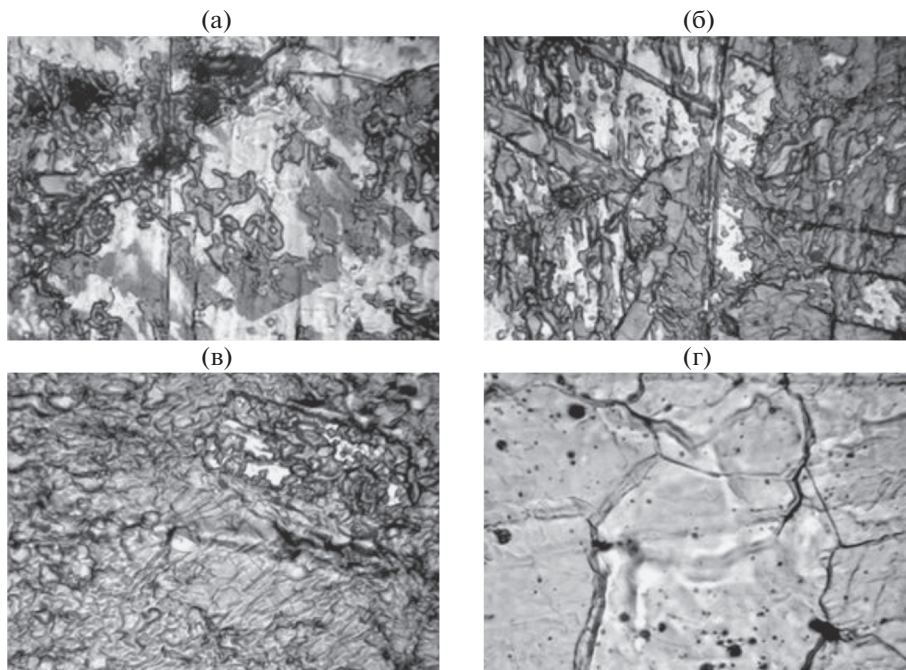


Рис. 1. Структура поверхности стали 20ХГР после вакуумной цементации ($t_{ц} = 940^{\circ}\text{C}$): (а) – насыщение 3 мин; (б) – насыщение 5 мин; (в) – насыщение 5 мин, рассасывание 10 мин и насыщение 5 мин; (г) – насыщение 5 мин, рассасывание 10 мин, насыщение 5 мин и рассасывание 10 мин; $\times 840$.

рубежные фирмы, особенно в Германии, Польши, США и Японии. Несколько таких установок приобретено российскими предприятиями, одна из которых польской фирмы “*Seco/Warwick*” установлена в Московском государственном университете им. Н.Э. Баумана. Таким образом, разработанный в России процесс вакуумной цементации возвратился из-за рубежа в виде автоматизированного дорогостоящего оборудования, но без технологии науглероживания. Возникает необходимость разработки технологии этого процесса с учетом особенностей механизма формирования диффузионного слоя и влияющих на этот механизм технологических факторов.

Технологические факторы вакуумной цементации. Исследования, представленные в работах [13, 14], показали, что технологическая атмосфера из ацетилена оказалась эффективной средой для качественного науглероживания деталей из низколегированных сталей марок 20ХНМ, 19ХГН, 20ХГР и др. (ГОСТ 4543), которые широко используются для деталей машин разных отраслей машиностроения.

Скорость адсорбционно-диссоционных процессов в атмосфере ацетилена настолько велика, что уже в первые минуты поверхность металла заполняется атомами углерода. На насыщаемой поверхности образуется почти сплошной углеродный слой. В таких условиях наилучшим способом проведения насыщения является циклическое чередование активных стадий (стадий насыщения), при которых ацетилен поступает в вакуумную камеру, и пассивных стадий, при которых ацетилен в камеру не подается.

Результаты металлографических исследований (рис. 1) показывают, что после подачи ацетилена в течение 3 или 5 минут поверхность стали покрывается тонким углеродным слоем в виде сажистого углерода и углеродных пленок (рис. 1а, 1б). После десятиминутной пассивной (диффузионной) стадии углеродный слой практически пол-

ностью растворяется (рис. 1г), обогащая твердый раствор стали. В следующих циклах процессы повторяются — углеродный слой возобновляется на активной стадии цикла и частично или полностью растворяется на пассивной стадии. Важно, что образование углеродного слоя не прекращает диссоциацию ацетилена. От цикла к циклу углеродный слой утолщается (рис. 1в).

Образование химически активного сажистого углерода создает на начальной стадии насыщения в тонком науглероживаемом слое высокий градиент концентрации, обеспечивая высокий диффузионный поток $J = D(\partial C/\partial x)$ и ускорение формирования слоя. Исследования показывают, что после науглероживания стали 20ХГР при температуре 940°C в течение двух минут толщина цементованного слоя составляет 0.12 мм, а концентрация углерода в аустените в его приповерхностной зоне составляет 0.59%. По мере науглероживания градиент концентрации уменьшается и скорость роста слоя снижается. Средняя скорость роста цементованного слоя составляет 0.15...0.25 мм/ч, что примерно в 1.5 раза выше, чем при обычной газовой цементации; продолжительность науглероживания для формирования слоя толщиной 0.8...1.0 мм составляет 5.0...6.5 ч.

С отмеченным достоинством необходимо учитывать важную особенность вакуумной цементации. Она заключается в том, что углеродный слой из 100% С не определяет углеродный потенциал газовой среды. Согласно [15], углеродный потенциал (активность атмосферы) — величина концентрации углерода, устанавливающейся на поверхности металла при достижении равновесия с газовой средой. Этот слой выполняет функцию посредника в передаче углерода из газовой среды на насыщаемую поверхность. Газовая среда всегда находится вдали от равновесия с насыщаемой поверхностью. Ее углеродный потенциал (термодинамическая активность) многократно превышает активность углерода в твердом растворе и, как следствие, требуемую концентрацию углерода на поверхности стали. В этих условиях углеродный потенциал газовой среды теряет свойство фактора контроля и управления процессом науглероживания. При такой особенности возникают трудности в обеспечении заданной насыщенности диффузионного слоя углеродом. Процесс приходится контролировать по технологическим факторам, оптимальные значения которых необходимо устанавливать экспериментальным путем.

При проведении вакуумной цементации технологические факторы разделяют на две группы: условно постоянные — температура, давление, расход ацетилена, поддерживаемые в процессе насыщения на постоянном уровне; управляющие — время диффузионного насыщения и режим циклической подачи ацетилена.

Температура — важный технологический фактор, диапазон выбора которой достаточно широк: от 880 до 980°C. При повышении температуры сокращается продолжительность процесса, но возможно укрупнение зерна, повышение хрупкости цементованного слоя. Для легированных сталей, являющихся природномелкозернистыми, допустимо проведение насыщения при температурах 920...940°C.

Давление в пределах 5...15 ГПа по результатам науглероживания не оказывает влияния на степень и скорость заполнения поверхности атомами углерода и, как следствие, на кинетику науглероживания.

Расход ацетилена должен обеспечивать заданную насыщенность цементованного слоя с учетом площади насыщаемой поверхности. Его определяют достаточно приблизительно на основе сравнения фактического (поступающего) объема газа и расчетного (требуемого). Расчеты показывают, что коэффициент полезного использования углеводорода составляет 50%. Что свидетельствует о достаточно высоком КПД процесса. Расход ацетилена в 0.5 м³/ч достаточен для обработки садки деталей с площадью насыщаемой поверхности не менее 10 м².

Основная задача при разработке режимов вакуумной цементации сводится к определению временного режима подачи ацетилена.

Время науглероживания τ – назначают в зависимости от требуемой эффективной толщины цементованного слоя $h_{\text{эф}}$ (слоя с $C \geq 0.4\%$), используя известное соотношение: $h_{\text{эф}} = k\sqrt{\tau}$, где k – кинетический коэффициент, определяемый экспериментально. Установлено, что для исследуемой группы сталей $k = 0.42 \dots 0.43$. Для формирования слоя с эффективной толщиной 1,0 мм требуется время диффузионного насыщения $\tau = (h/k)^2 = (1.0/0.43)^2 \approx 5.4$ ч (324 мин).

При выбранной температуре процесса и времени науглероживания результат обработки определяет временной режим циклической подачи ацетилена, параметрами которого являются: время активной стадии цикла τ_a ; время пассивной (диффузионной) стадии цикла τ_n ; суммарное время активных стадий циклов $\Sigma\tau_a$; суммарное время пассивных стадий циклов $\Sigma\tau_n$; число циклов n .

На практике применяют две схемы режима подачи ацетилена: простую или периодическую: $n(\tau_a/\tau_n)$, например, 20(4/12); сложную или аperiodическую: $n_1(\tau_{a1}/\tau_{n1}) + n_2(\tau_{a2}/\tau_{n2})$, например, 10(5/10) + 5(5/30).

Следует особенно подчеркнуть, что при определении временного режима подачи ацетилена важно учитывать изменение строения углеродного слоя. Анализ показывает, что при температурных условиях вакуумной цементации на насыщаемой поверхности способны образовываться сажистый углерод (аморфная форма) и пироуглерод в виде частично кристаллических форм – базисных лент и турбостратных плоских кристаллов (пакетов). Согласно [15, 16] базисные ленты состоят из углеродных слоев в виде гексагональных сеток с большим межатомным расстоянием между ними. Турбостратные плоские кристаллы имеют более высокую структурную организацию в виде слоев гексагональных сеток без трехмерной упорядоченности.

Можно считать, что в начале процесса на поверхности образуется полислой сажистого углерода, который легко растворяется в металле. В дальнейшем в период активных стадий выделяются новые порции сажи, из которой образуются частично кристаллические формы углерода с низкой каталитической активностью и более трудно растворимые в металле. Развитие подобных процессов характеризует изменение строения углеродного слоя (рис. 1).

Исходя из отмеченных особенностей можно сделать вывод, что для обеспечения высокой скорости диффузионного насыщения, целесообразно назначать малое время активной стадии (τ_a от двух до пяти мин) с тем, чтобы образовавшийся на поверхности углеродный слой в основном состоял из аморфной составляющей, поэтому практически полностью растворялся на диффузионной стадии цикла.

Такой вывод подтверждают результаты диффузионного насыщения в виде концентрационных кривых, полученных при послойном анализе науглероженных образцов из стали 20ХГР. Вакуумная цементация образцов проведена при температуре 940°C в течение 300 мин. Применяли три варианта временного режима подачи ацетилена (рис. 2).

В первом варианте использовали два режима циклической подачи ацетилена с одинаковым отношением $\tau_a/\tau_n = 1:5$. Из сравнения концентрационных кривых на рис. 2 следует, что при циклической подаче ацетилена по режиму 25(2/10) насыщенность углеродом слоя выше, чем при обработке по режиму 10(5/25).

Есть основания предполагать, что науглероживание при малом времени активной стадии насыщения ($\tau_a = 2$ мин), образовавшийся на поверхности углеродный слой успевает растворяться за последующие 10 минут диффузионной стадии цикла. При длительности активной стадии 5 мин и диффузионной стадии 25 мин насыщенность

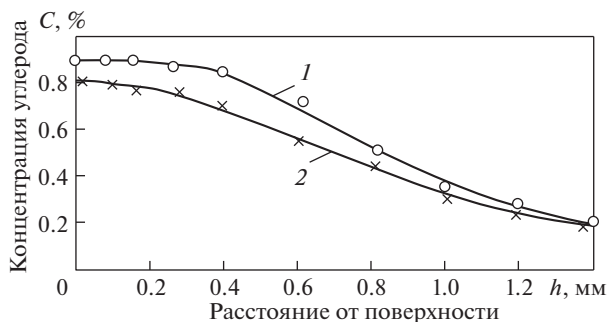


Рис. 2. Распределение концентрации углерода по толщине h диффузионного слоя стали 20ХГР после вакуумной цементации (940°C , 300 мин) при постоянном отношении $\tau_a/\tau_{\Pi} = 1:5$ и разным времени активной стадии: 1 – $\tau_a = 2$ мин; 2 – $\tau_a = 5$ мин.

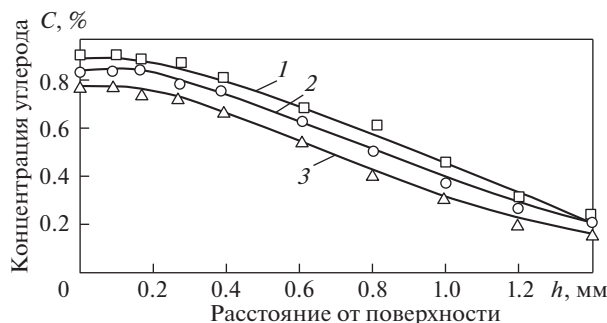


Рис. 3. Распределение концентрации углерода по толщине h диффузионного слоя стали 20ХГР после вакуумной цементации (940°C , 300 мин) при постоянном времени активной стадии $\tau_a = 2$ мин и разным отношении τ_a/τ_{Π} : 1 – 1:3; 2 – 1:5; 3 – 1:10.

диффузионного слоя заметно меньше. Вероятная причина – образование на поверхности более толстого углеродного слоя, преимущественно состоящего из частично кристаллической формы углерода.

Во втором варианте экспериментов время активной стадии было ограничено двумя минутами. Оценивали влияние времени диффузионной стадии, и как следствие отношение продолжительности стадий циклов τ_a/τ_{Π} , которое составляло 1:3; 1:5 и 1:10. Использовали режимы 38(2/6); 25(2/10); 14(2/20). Как следует из рис. 3, наиболее насыщенным формируется слой при отношении длительности стадий $\tau_{\Pi}/\tau_d = 1:3$ и наибольшем числе циклов. Возможно, что на каждом цикле шести минут оказывается достаточным для полного растворения тонкого углеродного слоя из аморфной составляющей.

Третий вариант экспериментов проводили при сложных (апериодических) режимах циклической подачи ацетилена. Использовали режимы, в которых общее количество циклов было разбито на 2 или 3 группы, например, 18(2/6) + 7(2/20); 15(2/4) + 13(2/8) + 5(2/14); 9(5/10) + 5(5/20) + 1(5/35); (всего 15 вариантов с разным количеством циклов и продолжительностью стадий).

Назначение первой группы циклов – обеспечить активное науглероживание приповерхностной зоны слоя; второй и третьей групп – создать условия для диффузионного отвода углерода от поверхности.

Анализ полученных концентрационных кривых углерода показал:

1. Время активных стадий τ_a как и при простых циклах целесообразно принимать равным от 2 до 5 мин.

2. Предпочтительны сложные циклы, содержащие 3 последних цикла с увеличенной стадией диффузии τ_d . Они обеспечивают распределение концентрации углерода с горизонтальной площадкой в приповерхностной части диффузионного слоя.

3. Основным управляющим параметром сложного циклического режима может служить суммарное время стадий насыщения $\Sigma\tau_a$, от величины которого зависит отношение продолжительности стадий $\Sigma\tau_a:\Sigma\tau_d$. Режимы циклирования при значениях $\Sigma\tau_a$ от 66 до 70 (отношением $\Sigma\tau_a:\Sigma\tau_d$, близким к 1:3) обеспечивают за время насыщения $\tau_{\text{общ}} = 300$ мин требуемые параметры цементованного слоя: $C_{\text{пов}} = 0.80...0.90\%$, $h_{\text{эф}} = 0.85...0.90$ мм. Вид концентрационных кривых подобен приведенным на рис. 2 и 3.

Проведенные исследования дают основания считать, что, несмотря на отсутствие возможности контролировать и управлять углеродным потенциалом газовой среды, технология вакуумной цементации способна обеспечивать формирование цементованного слоя в соответствии с техническими требованиями. Важно учитывать также высокий (50...70%) показатель полезного использования углерода газовой среды при ничтожно малом ее расходе. Практически снимаются проблемы с выбросом вредных газов.

Преимущества вакуумной цементации дополняет сочетание с “сухой” закалкой – закалкой в газовом потоке. Детали из печи выходят чистыми с допустимыми деформациями. Исключается применение охлаждающего масла и, как следствие, моющих сред и необходимость их утилизации. Малые деформации деталей уменьшают или исключают механообработку упрочненных деталей.

Комплекс достоинств вакуумной цементации указывает на то, что новый процесс перспективен для широкого использования в производстве цементуемых деталей, имеющих массовое промышленное применение и отвечающих за надежность, безопасность и долговечность машин и механизмов [17, 18].

ВЫВОДЫ

1. В условиях вакуумной цементации формирование цементованного слоя происходит в результате диффузионного растворения тонкого углеродного слоя, образующегося в результате каталитического разложения ацетилена на поверхности металла. Вследствие высокой активности газовой среды сокращается время обработки, расход газа, однако исключается возможность управления процессом науглероживания по углеродному потенциалу.

2. Процесс вакуумной цементации рекомендуется контролировать по технологическим факторам с учетом изменения строения углеродного слоя, оказывающего непосредственное влияние на процесс формирования диффузионного слоя.

3. Для обеспечения требуемых характеристик диффузионного слоя предложены рекомендации по определению временного режима подачи ацетилена в рабочую камеру, включая выбор времени стадии насыщения τ_n и диффузионной стадии τ_d цикла, от которых зависят соотношение τ_n/τ_d и число циклов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зинченко В.М.* Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 303 с.
2. *Герасимов С.А., Куксенова Л.И. и др.* Влияние активизации процесса нитроцементации на механические свойства теплостойких сталей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 1. С. 55–61.
3. *Герасимов С.А., Куксенова Л.И. и др.* Механические свойства теплостойких сталей после активизации процесса цементации // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 4. С. 113–119.
4. *Фахуртдинов Р.С., Рыжова М.Ю., Пахомова С.А.* Преимущества вакуумной цементации и проблемы ее промышленного применения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. № 8. С. 37–43.
5. *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 Междунар. молодежной научной конф.: в 4-х томах. 2016. С. 86–89.
6. *Крылов В.С.* Разработка процессов насыщения стали азотом и углеродом при пониженном давлении. Дис. ... д-ра технич. наук. М., 1979. 316 с.
7. *Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.* Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
8. *Edenhofer B.* An overview of advances in atmosphere and vacuum heat treatment // Heat Treatment of Metals. 1999. V. 26. № 1. P. 1–5.
9. *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.
10. *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.
11. *Fakhurtidinov R.S., Pakhomova S.A., Ryzhova M.Y.* On the problems of modernizing equipment for vacuum carburization // J. Machinery Manufacture and Reliability. 2017. V. 46. Issue 2. P. 187–192.
12. *Fakhurtidinov R.S., Ryzhova M.Y., Pakhomova S.A.* Advantages and commercial application problems of vacuum carburization // Polymer Science. Series D. 2017. V. 10. Issue 1. P. 79–83.
13. *Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. и др.* Особенности вакуумной цементации в ацетилене теплостойкой стали // МиТОМ. 2004. № 6. С. 10–15.
14. Вакуумная цементация хромоникелевой стали / Н.М. Рыжов, А.Е. Смирнов, Р.С. Фахуртдинов и др. // МиТОМ. 2008. № 2. С. 25–29.
15. *Могутнов Б.М., Томилин И.А., Шварцман Л.А.* Термодинамика сплавов железа. М.: Металлургия, 1984. 206 с.
16. *Федоров В.Б., Шоршоров М.Х., Хакимова Д.К.* Углерод и его взаимодействие с металлами. М.: Металлургия, 1978. 208 с.
17. *Ефремов Л.В.* Проблемы прогнозирования усталостной долговечности деталей машин в вероятностном аспекте // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 5. С. 84–88.
18. *Гецов Л.Б., Садаков О.С., Порошин В.Б.* Критерии оценки малоциклового прочностного при неизоотермическом нагружении с выдержками // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1997. № 1. С. 52–58.