

Моделирование диффузионного насыщения аустенита углеродом с учетом температуры в процессе цементации

А.Н. Венедиктов, Е.В. Корешкова, А.А. Кулемина

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень

Аннотация: В исследованиях, касающихся цементации, основное внимание уделяется почти исключительно перемещению углерода, описываемому через уравнения диффузии, часто с постоянными коэффициентами и без учета связи с температурой. Такой подход не позволяет учитывать дальнейшую диффузию углерода в заготовку в более низком температурном диапазоне на стадии, предшествующей закалке. В работе описано моделирование процесса диффузионного насыщения стали углеродом в процессе цементации с учетом влияния температуры на примере численного решения задачи цементации зубчатого колеса с использованием программы COMSOL Multiphysics. Показано, что математический расчет методом конечных элементов процесса насыщения аустенита углеродом при цементации дает хорошее согласование с экспериментальными данными, а методы конечно-элементного анализа могут применяться для многофакторного расчета содержания углерода в аустените после диффузионного насыщения.

Ключевые слова: диффузия углерода, цементация, COMSOL Multiphysics, численное моделирование, распределение углерода, науглероживание, закон диффузии Фика, массоперенос, теплопередача, зубчатое колесо, метод конечных элементов.

Цементация представляет собой процесс химико-термической обработки, в ходе которого происходит диффузионное насыщение поверхности углеродом, приводящее к увеличению твердости и износостойкости поверхности.

Большинство современных методов цементации заключается в нагреве заготовки до аустенитного состояния в углеродсодержащей атмосфере. Это вызывает поглощение углерода на поверхности и за счет диффузии, под воздействием высокой температуры, создает градиент концентрации углерода внутри заготовки. Обычно науглероживаемые материалы представляют собой низкоуглеродистые и легированные стали с малым содержанием углерода.

В исследованиях, касающихся цементации, основное внимание уделяется почти исключительно перемещению углерода, описываемому

через уравнения диффузии, часто с постоянными коэффициентами и без учета связи с температурой [1]. Такой подход не позволяет, например, учитывать дальнейшую диффузию углерода в заготовку в более низком температурном диапазоне на стадии, предшествующей закалке. В то время как на практике необходимо понимать механизм переноса углерода и точно прогнозировать профиль концентрации углерода по глубине в процессе цементации. Это имеет большое значение для контроля профиля углерода и точности соблюдения всего технологического процесса [2-4].

В связи с этим была сформулирована цель работы: используя метод конечных элементов смоделировать процесс диффузионного насыщения стали углеродом в процессе цементации с учетом влияния температуры. Для численного решения задачи использовали метод конечных элементов реализованного в программе *COMSOL Multiphysics*.

Диффузия углерода в аустените

Процесс науглероживания можно разделить на три стадии: перенос углерода на поверхность, реакцию на поверхности и диффузию углерода в твердом теле [5]. Предложенная модель представляет собой описание на макроскопическом уровне, без учета атомной структуры вещества.

Температура (T) и концентрация углерода (c) являются физическими переменными, играющими основную роль во время цементации. Такие аспекты, как состав атмосферы и кинетика переноса углерода, носят второстепенный характер [4].

При переносе углерода во время науглероживания необходимо знать следующие физические параметры, участвующие в процессе: коэффициент массопереноса (β), определяющий поток атомов углерода (j) из атмосферы через поверхность стали, и коэффициент диффузии углерода в стали (D) при температуре аустенитного состояния.

Коэффициент массопереноса β в газовой фазе контролирует скорость поглощения углерода поверхностью из атмосферы на начальной стадии науглероживания. Как показали авторы работы [3] его значение колеблется от $1 \cdot 10^{-9}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ см/с при температурах от 800 до 1000 °С. Во многих случаях не является ошибкой считать его константой [4].

Величина, характеризующая науглероживающую способность цементующей атмосферы, называется углеродным потенциалом (c_p), и определяется как процентное содержание углерода в стали, которая достигла термодинамического равновесия с атмосферой.

Согласно первому закону Фика [6] поток вещества пропорционален градиенту концентрации:

$$j = -D(T, c) \nabla c,$$

где $D = D(T, c)$ - коэффициент диффузии, являющийся функцией концентрации c и температуры T . Нестационарный процесс диффузии углерода в γ -железо (аустенит) описывается следующим параболическим уравнением [7]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \text{div}(D(T, c) \nabla c) = 0.$$

Поскольку различие в потенциале углерода между поверхностью и заготовкой обеспечивает движущую силу для диффузии углерода, определим следующее граничное условие:

$$-D(T, c) \frac{\partial c}{\partial \nu} = \beta(T)(c - c_p),$$

где β - коэффициент массопереноса, определяющий скорость, с которой углерод поглощается сталью во время цементации (примем равным $6 \cdot 10^{-7}$ см/с); c_p - углеродный потенциал в печи.

В литературе существует множество зависимостей для определения коэффициента диффузии углерода в аустените $D(T, c)$ в соответствии с кинетическим и термодинамическим поведением углерода в γ -железе [8].

В качестве примера воспользуемся формулой из работы [3], как наиболее распространенной:

$$D(T, c) = 0,000047 \exp(-1,6c - (37000 - 6600c) / 1,9870).$$

Модель диффузионного насыщения

Цементацию проводят как в одну, так и в две стадии. При использовании процесса цементации с одной стадией распределение углерода и соответствующее ей распределение твердости будет быстро убывать к сердцевине. При удалении шлифовкой поверхностного слоя определенной толщины, поверхностная твердость может оказаться ниже, чем требуется. Процесс цементации в две стадии позволяет получить распределение углерода S-образной формы. Дальнейшая шлифовка снимет менее науглероженный слой и поверхность приобретет необходимую твердость.

Используя описанную выше модель диффузии углерода сравним распределение углерода при одно- и двустадийном технологическом процессе цементации зубчатого колеса.

На рисунке 1 показана часть детали с используемой в процессе моделирования сеткой.

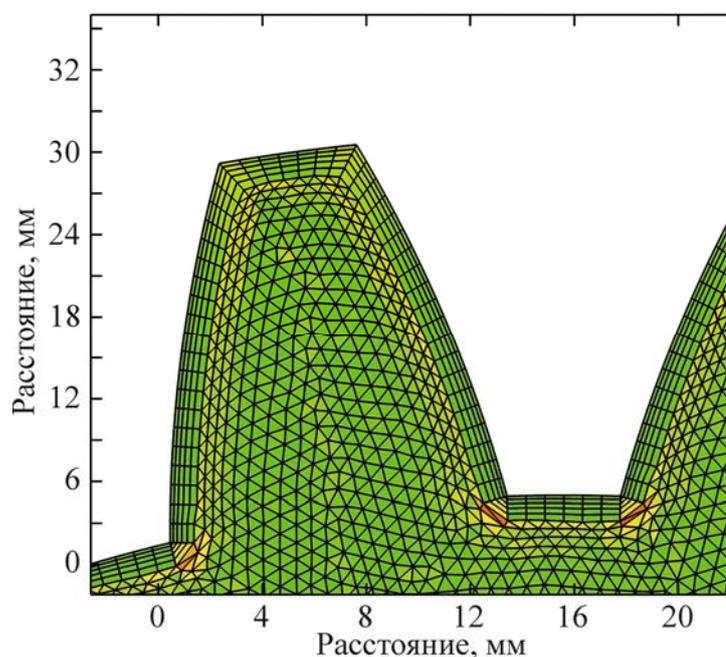


Рис. 1. – Модель зубчатого колеса с разбиением на конечные элементы

Зубчатое колесо помещается в шахтную печь и нагревается до температуры науглероживания 1228 K (фаза нагрева не моделируется). Таким образом, исходная микроструктура представляет собой 100 % аустенит с содержанием углерода 0,18 %.

Заготовка выдерживается при постоянном углеродном потенциале 0,8 % в течение времени 5 часов. После чего возникает вторая фаза цементации с меньшим углеродным потенциалом 0,3 %. Вторая фаза длится еще 5 часов при меньшей температуре 1128 K.

Уравнение теплопередачи и уравнение диффузии углерода смоделированы и решены в соответствии со справочником [9].

Физические интерфейсы *COMSOL Multiphysics*, необходимые для решения поставленной задачи:

- теплопередача в твердых телах;
- массоперенос в твердых телах.

Задача решалась в двумерной постановке.

На рисунке 2 показано распределение углерода в поверхностном слое зубчатого колеса после первой фазы науглероживания в течение 5 часов. Уменьшение концентрации углерода с глубиной показано на рисунке 3.

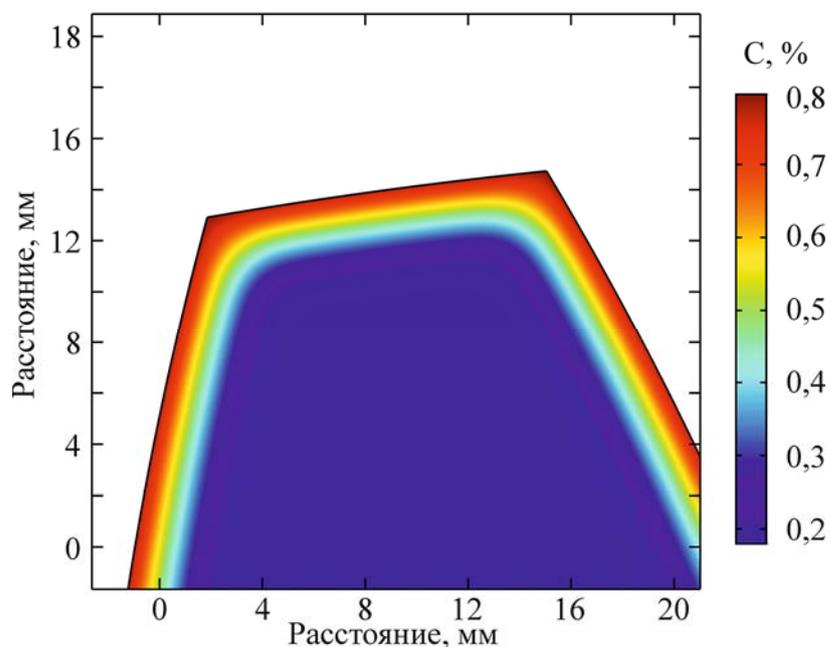


Рис. 2. – Распределение углерода в поверхностном слое детали (5 часов)

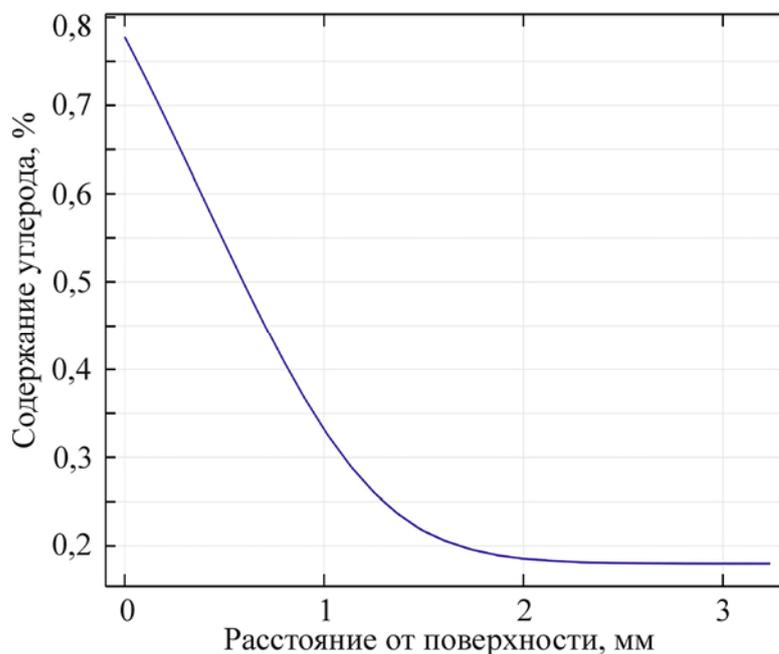


Рис. 3. – Распределение углерода по глубине (5 часов)

На графике можно наблюдать плавное уменьшение концентрации углерода с глубиной в соответствии с законом диффузии.

На рисунке 4 показано распределение углерода в поверхностном слое зубчатого колеса после второй фазы науглероживания в течение 10 часов. Изменение содержания углерода с глубиной показано на рисунке 5.

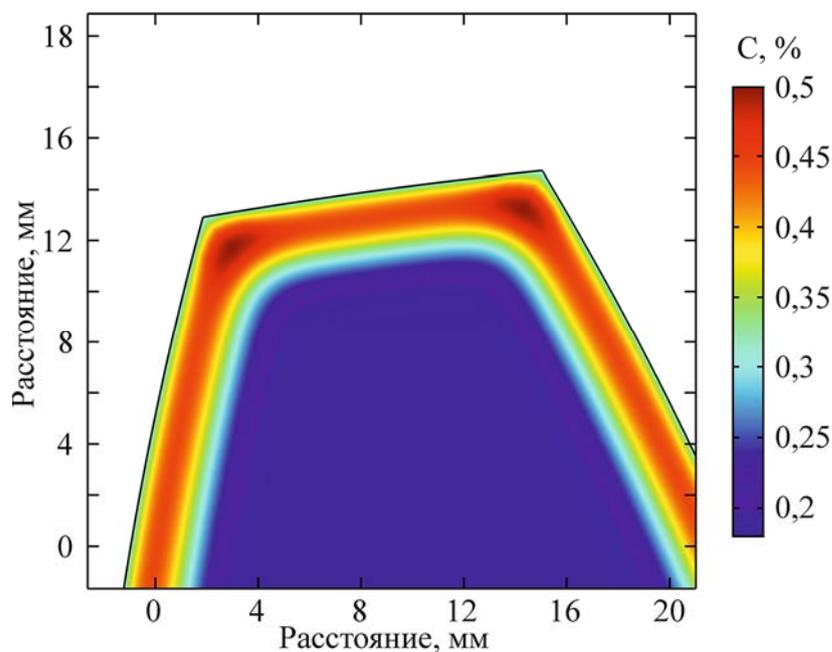


Рис. 4. – Распределение углерода в поверхностном слое детали (10 часов)

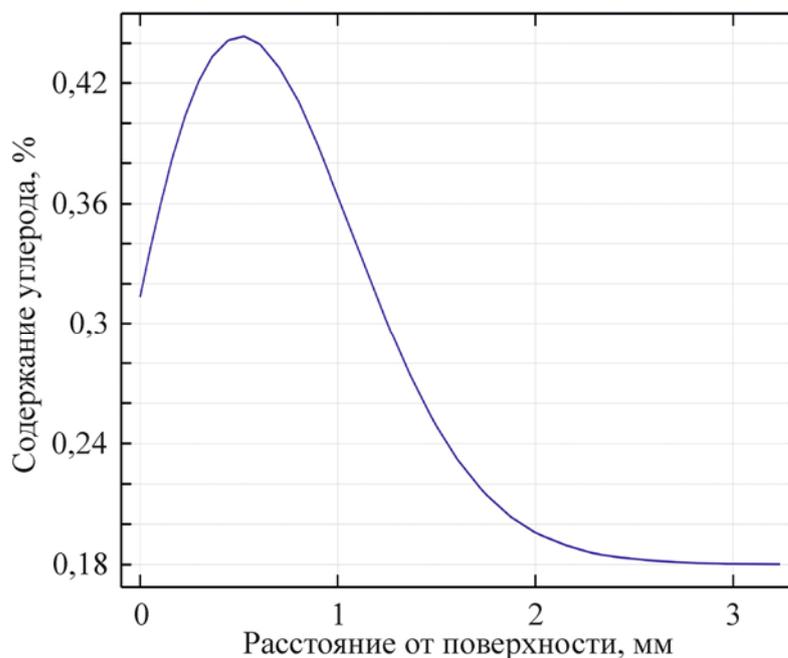


Рис. 5. – Распределение углерода по глубине (10 часов)

Из графика видно, что максимум концентрации углерода приходится на глубину 0,5 мм. Это позволит в дальнейшем провести шлифовку детали,

не затронув максимум концентрации углерода в поверхностном слое и, как следствие, не скажется на ухудшении механических свойств поверхности [10]. Отдельно стоит отметить, что результаты моделирования хорошо согласуются с данными, полученными в работах [11-13].

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. На примере моделирования двухстадийного диффузионного насыщения углеродом поверхности в ходе цементации показано, что математический расчет хорошо согласуется с экспериментальными данными.

2. Установлено, что метод конечных элементов может применяться для многофакторного расчета диффузии углерода в аустените, в частности, с учетом влияния температуры.

3. Полученные в ходе работы наработки могут быть использованы для дальнейшего моделирования фазовых превращений аустенита при охлаждении цементованной стали и для подбора технологических режимов цементации.

Литература

1. Клянина Л.Н., Корабельников Е.Г. Влияние вариаций входных параметров на режим работы теплообменной системы // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2182.

2. Turpin T., Dulcy J., Gantois M. Carbon diffusion and phase transformations during gas carburizing of high alloyed stainless steels: experimental study and theoretical modeling // Metallurgical and Materials Transactions A. 2005. Volume 36. pp. 2751-2759.

3. Гилукьянов Е.Л., Кисленков В.В., Провоторов С.П. Вычисление профиля концентрации углерода при цементации сталей в контролируемой атмосфере природного газа // Металловедение и термическая обработка металлов. 1981. № 8. С. 9-11.

4. Stickels C.A. Analytical models for the gas carburizing process // Metallurgical and Materials Transactions B. 1989. Volume 20. pp. 535-546.

5. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.

6. Какурин Ю.Б., Какурина Н.А., Захаров А.Г. Методика оценки величины коэффициента зернограничной диффузии примеси в металлах на основе численного решения задачи Фишера // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1811.

7. Венедиктов А.Н., Овсянников В.Е., Венедиктов Н.Л. Определение эффективного коэффициента диффузии вакансий в ультрадисперсном электролитическом железе и его влияние на режимы термической обработки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2019. Т. 21. № 3. С. 106-114.

8. Ochsner A., Gegner J., Mishuris G. Effect of diffusivity as a function of the method of computation of carbon concentration profiles in steel // Metal Science and Heat Treatment. 2004. Volume 46. pp. 3-4.

9. Lucia Panizzi. On a mathematical model for case hardening of steel. Berlin, 2010. 96 p.

10. Бойко Н.И., Фисенко К.С. Исследование качества поверхности наплавленного металла цилиндрической детали, обработанной в горячем состоянии // Инженерный вестник Дона. 2012. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/746.

11. Валько А.Л., Мосунов Е.И., Руденко С.П., Тимошенко Н.П. Определение толщины цементованного слоя хромоникелевых сталей // Литье и металлы. 2012. № 3. С. 106-109.

12. Чичко А.Н., Сачек О.А. Математическое моделирование процесса цементации на основе уравнения теплопроводности и диффузии // Литье и металлы. 2008. № 2. С. 88-92.



13. Семенов М.Ю. Фомина Л.П. Математическое моделирование процесса вакуумной цементации комплексно-легированных теплостойких сталей // Авиационная промышленность. 2011. № 2. С. 9-14.

References

1. Klyanina L.N., Korabel'nikov E.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2182.

2. Turpin T., Dulcy J., Gantois M. Metallurgical and Materials Transactions A. 2005. Volume 36. pp. 2751-2759.

3. Giluk'yanov E.L., Kislenkov V.V., Provotorov S.P. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 1981. № 8. pp. 9-11.

4. Stickels C.A. Metallurgical and Materials Transactions B. 1989. Volume 20. pp. 535-546.

5. Lahtin Ju.M., Arzamasov B.N. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov [Chemical-thermal treatment of metals]. M.: Metallurgija, 1985. 256 p.

6. Kakurin Yu.B., Kakurina N.A., Zakharov A.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1811.

7. Venediktov A.N., Ovsyannikov V.E., Venediktov N.L. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty). 2019. T. 21. № 3. pp. 106-114.

8. Ochsner A., Gegner J., Mishuris G. Metal Science and Heat Treatment. 2004. Volume 46. pp. 3-4.

9. Lucia Panizzi. On a mathematical model for case hardening of steel. Berlin, 2010. 96 p.

10. Boyko N.I., Fisenko K.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/746.

11. Val'ko A.L., Mosunov E.I., Rudenko S.P., Timoshenko N.P. Lit'e i metally. 2012. № 3. pp. 106-109.

12. Chichko A.N., Sachek O.A. Lit'e i metally. 2008. № 2. pp. 88-92.



13. Semenov M.Yu. Fomina L.P. Aviatsionnaya promyshlennost'. 2011. № 2. pp. 9-14.