

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 669; 621.785.5

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-46-54

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Светлана Альбертовна Пахомова<sup>1</sup>, Марина Алексеевна Гресс<sup>2✉</sup>

<sup>1,2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1</sup> pahomo@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3237-3835>

<sup>2</sup> dr.mgtu@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5293-3678>

### Аннотация

Химико-термическая обработка обеспечивает высокие эксплуатационные свойства и долговечность большинства изделий машиностроения. Показано, что развитие возможности поверхностного упрочнения ответственных деталей может быть связано с применением новых методов их обработки. Разработана модель процесса науглероживания при вакуумной цементации, которая основана на практических результатах. Предложено решение уравнения, определяющего плотность потока углерода в зависимости от технологических факторов насыщения в ацетилене. При разработке расчетного метода учитывали особенность науглероживания низколегированных сталей. Приведены рекомендации по выбору циклической подачи ацетилена.

Циклический режим подачи ацетилена оценивали группой параметров: структурой цикла в виде отношений времени активных  $\tau_a$  и диффузионных (пассивных)  $\tau_d$  стадий; суммарным временем активных стадий, суммарным временем диффузионных стадий, их отношением, общим числом циклов  $n$  за время насыщения  $\tau$ . Исследовали две программы: первая предусматривает решение прямой диффузионной задачи, а вторая – обратной диффузионной задачи. Показано, что применение второй программы является предпочтительным.

**Ключевые слова:** моделирование, диффузия, поток углерода, слой, концентрационные кривые, технологические факторы.

Ссылка для цитирования:

Пахомова С.А. Проектирование технологии вакуумной цементации сталей на основе математического моделирования / С.А. Пахомова, М.А. Гресс // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 7. – С. 46-54. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-46-54.

Original article

Open Access Article

## DESIGNING THE TECHNOLOGY OF VACUUM CARBURIZING OF STEELS BASED ON MATHEMATICAL MODELING

Svetlana Albertovna Pakhomova<sup>1</sup>, Marina Alekseevna Gress<sup>2✉</sup>

<sup>1,2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>1</sup> pahomo@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3237-3835>

<sup>2</sup> dr.mgtu@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5293-3678>

### Abstract

Chemical and thermal treatment ensures high performance properties and durability of most mechanical engineering products. It is shown that the developing the possibility of surface hardening of critical parts may be associated with the use of new methods of their treatment. A model of vacuum carburizing is developed, which is based on practical results. A solution to the equation determining the carbon flux density depending on the technological saturation factors in acet-

ylene is proposed. When developing the calculation method, the peculiarity of carburization of low-alloy steels was taken into account. Recommendations on the choice of cyclic acetylene supply are given. The cyclic mode of acetylene supply was evaluated by a number of parameters: the cycle structure in the form of time ratios of active  $\tau_a$  and diffusive (passive)  $\tau_d$  stages; the total time of active stages, the total time of diffusion stages, their ratio, the total number of  $n$  cycles during  $\tau$

© Пахомова С. А., Гресс М. А., 2025

saturation. Two programs were studied: the first involves solving a direct diffusion problem, and the second involves solving an inverse diffusion problem. It is shown that the use of the second program is preferable.

*Reference for citing:*

*Pakhomova SA, Gress MA. Designing the technology of vacuum carburizing of steels based on mathematical modeling. Transport Engineering. 2025;7:46-54. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-46-54.*

## Введение

В настоящее время ведущие отечественные предприятия по производству машин и оборудования предпочитают покупать импортные термические устройства, работающие по вакуумной технологии, вместо традиционных газовых методов. Автоматизированные системы, которые используют вакуумную технологию цементации (при низком давлении: 4...15 гПа) или закалки в газовых потоках при высоком давлении, привлекают большое внимание [1–3]. Этот метод упрочнения поверхности деталей машин занял приоритетное положение в зарубежных технологиях [4–6].

Опыт использования вакуумной цементации показал, что технологическая среда из ацетилена, применяемая для науглероживания низколегированных (ГОСТ 1050-2013) сталей является эффективной для ответственных деталей различных отраслей машиностроения и приборостроения.

В работах [10–12] установлено, что при вакуумной цементации ацетилен ( $C_2H_2$ ) необходимо подавать циклически. Циклическая подача состоит в виде чередования двух стадий: 1) активной, когда в камеру подают ацетилен и 2) пассивной, когда подача отсутствует и процесс осуществляется в вакууме [13]. Особенность ацетилена – способность его молекул адсорбироваться на насыщаемой поверхности и каталитически диссоциировать ( $C_2H_2 \rightarrow 2[C] + H_2$ ). Микроструктура одного и того же участка поверхности образца стали 20ХНМ после разных режимов насыщения показана на рис. 1: слева на каждом фото виден один и тот же отпечаток алмазной пирамиды. Из-за высокой скорости адсорбции и диссоциации уже в начале первой (активной) фазы цикла насыщения на поверхности формируется

**Keywords:** modeling, diffusion, carbon flux, layer, concentration curves, engineering factors.

непрерывная углеродная пленка, представляющая собой слой сажистого углерода (рис. 1а).

На второй (пассивной) фазе, которая, как было сказано выше, является диффузионной стадией, эта пленка почти полностью растворяется в аустените в зависимости от продолжительности этой фазы (рис. 1б,в). Такую технологию повторяют несколько циклов. При этом углеродный потенциал в газовой среде поддерживают высоким (100 %) и постоянным, что соответствует содержанию углерода в процессе адсорбции.

Управление процессом науглероживания и его контроль в таких условиях путем использования углеродного потенциала насыщающей среды не представляется возможным. Поэтому диффузионный процесс желательно контролировать по технологическим характеристикам. Последние могут меняться в широком диапазоне, а это в свою очередь предполагает большое число вариантов обработки. Таким образом, экспериментальное определение оптимального режима вакуумной цементации значительно усложняется. Возможный выход – разработка расчетного метода, основанного на математическом моделировании предлагаемого технологического процесса. Актуальность такого вопроса побуждала авторов несколько раз обращаться к его решению [14–16]. Однако полученные ранее результаты указывают на необходимость их уточнения и расширения расчетных возможностей.

Основная проблема в разработке расчетного метода заключается в необходимости описания механизма массопереноса углерода из газовой среды в процессе адсорбции и абсорбции. Перечисленные выше процессы определяют уравнение граничного условия, которое является необ-

ходимым фактором для решения диффузионной задачи науглероживания.

Цель данной работы – разработка оптимальной и эффективной расчетной про-

граммы диффузионного насыщения для определения режимов вакуумной цементации низколегированной стали на основе концентрационной кривой углерода.

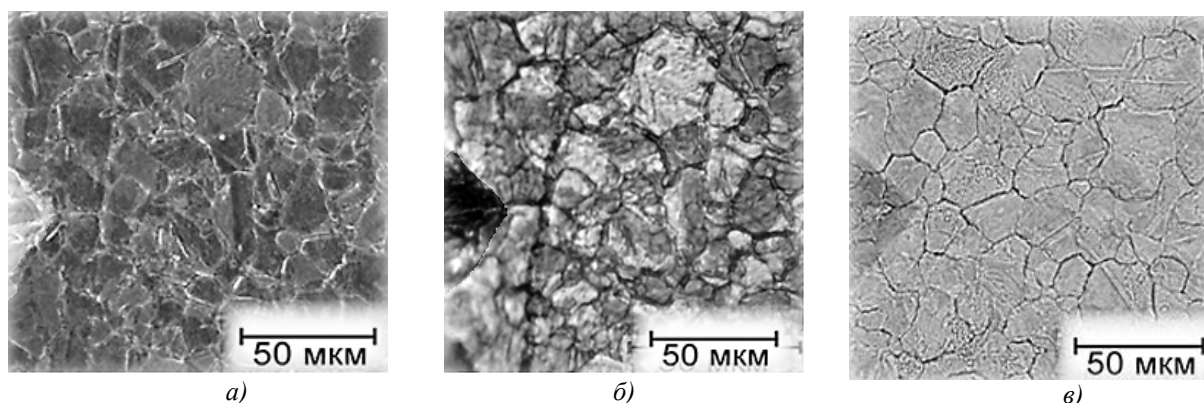


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя исследуемой стали после трех режимов насыщения в ацетилене: а – активное насыщение  $\tau_a = 2$  мин; б – активное насыщение  $\tau_a = 2$  мин + пассивная (диффузионная) стадия  $\tau_d = 5$  мин; в – активное насыщение  $\tau_a = 2$  мин + пассивная стадия  $\tau_d = 20$  мин

*Fig. 1. Microstructure of the surface layer after three saturation modes in acetylene: a) active saturation  $\tau_a = 2$  min; b) active saturation  $\tau_a = 2$  min + diffusion stage  $\tau_d = 5$  min; c) active saturation  $\tau_a = 2$  min + diffusion stage  $\tau_d = 20$  min*

## Материал и методика

В качестве объекта исследования использован промышленный сплав (ГОСТ 103-2006) – низколегированная сталь 20ХНМ. В ранее проведенной работе [10] авторы подробно представили следующие методики: расчет концентрационной кривой углерода; решения кинетического уравнения при известном коэффициенте

диффузии углерода в аустените, а также начальных и граничных условий массопереноса. Математические соотношения, составившие основу расчетного метода, формализовали в программном средстве на языке *Object Pascal* и в интегрированной среде *Delphi*. Образцы из исследуемой стали имели следующий химический состав.

Таблица

Химический состав стали по массе, %

Table

*Chemical composition of steel by weight, %*

C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S
						не более	
0,15...0,2 2	0,6...0,8	0,8...1,2	1,0...1,4	0,4...0,7	0,17...0,3 7	0,035	0,035

Образцы были подвергнуты обычной для зубчатых колес упрочняющей обработке, обеспечивающей высокий предела контактной выносливости и включающей цементацию и термическую обработку. Вакуумная цементация была проведена в печи *SECO/WARWICK SA* в ацетилене ( $t = 940$  °С,  $\tau = 5$  ч) по циклическим режимам. При этом режим подачи ацетилена включал две группы циклов. Одна группа цик-

лов обеспечивала активное насыщение углеродом, а другая группа – как активное насыщение углеродом так и диффузионное перераспределение концентрации углерода. Последующая термическая обработка состояла из высокого отпуска ( $t = 650$  °С), закалки ( $t = 910$  °С), обработки холодом ( $t = -70$  °С). Последней операцией был низкий отпуск ( $t = 250$  °С,  $\tau = 2$  ч). После окончательной термообработки шлифова-

нием удаляли припуск 0,15 мм. В результате, цементованный слой обладал следующими параметрами: эффективная толщина 0,9...1,2 мм; концентрация углерода на поверхности 1,2...1,5 %; твердость поверхности HRC 61...63. При этом твердость сердцевины была в диапазоне HRC 35...38.

Исследование микроструктуры образцов проводили на оптическом микроскопе *Olympus GX51 (OM)*. Анализ распре-

### Результаты исследований и обсуждение

Концентрации углерода, соответствующие предельной растворимости углерода в аустените и обеспечивающие активность равную единице в интервале температур  $t = 880...1040\text{ }^{\circ}\text{C}$ , оценивали путем применения программы *Thermo-calc® 4.0* [14]. Такой анализ вполне допустим при исследовании стали 20ХНМ, насыщаемой углеродом в вакууме, если учитывать ее легированность. Численное решение входящих в расчетную модель уравнений осуществляли на основе применения явной разностной схемы. Устойчивость решения обеспечивали за счет снижения шага разностной схемы по времени и координате.

Цементацию образцов проводили в пределах твердого раствора т.е. до концентрации углерода на поверхности 0,8...0,9 %. При этом стремились не допустить образования карбидной фазы из-за возможного перехода в нее легирующих элементов. Как известно, обеднение матрицы способствует уменьшению прокаливаемости и прочности приповерхностной зоны. Для оптимизации технологического процесса вакуумной цементации в настоящей работе были разработаны две расчетные подпрограммы.

**Первая подпрограмма** предусматривает решение прямой диффузионной задачи. На основании анализа технологических факторов производится расчет концентрационной кривой углерода. Эта кривая позволяет определить основные параметры диффузионного слоя и сравнивают их с заданными характеристиками. К последним относятся  $C_{\text{пов}}$  (концентрации углерода на поверхности) и  $h_{\text{эф}}$  (эффективная

толщина слоя с содержанием углерода  $C \geq 0,4\%$ ). По результатам каждого цикла расчета предусмотрена корректировка задаваемых факторов режима, что обеспечивает обратную связь между параметрами диффузионного слоя и факторами технологического процесса. Большое число временных факторов (поверхности  $C_{\text{пов}}$  и эффективной толщины слоя  $h_{\text{эф}}$  (слой, в котором  $C \geq 0,4\%$ )).

По результатам каждого цикла расчета предусмотрена корректировка задаваемых факторов режима, что обеспечивает обратную связь между параметрами диффузионного слоя и факторами технологического процесса. Большое число временных факторов (поверхности  $C_{\text{пов}}$  и эффективной толщины слоя  $h_{\text{эф}}$  (слой, в котором  $C \geq 0,4\%$ )).

По результатам каждого цикла расчета предусмотрена корректировка задаваемых факторов режима, что обеспечивает обратную связь между параметрами диффузионного слоя и факторами технологического процесса. Большое число временных факторов (поверхности  $C_{\text{пов}}$  и эффективной толщины слоя  $h_{\text{эф}}$  (слой, в котором  $C \geq 0,4\%$ )).

По результатам каждого цикла расчета предусмотрена корректировка задаваемых факторов режима, что обеспечивает обратную связь между параметрами диффузионного слоя и факторами технологического процесса. Большое число временных факторов ( $\tau$ ,  $\tau_a$ ,  $\tau_d$ ,  $n$ ,  $\Sigma\tau_a$ ,  $\Sigma\tau_d$ ,  $\Sigma\tau_a / \Sigma\tau_d$ ) и широкий диапазон их возможных изменений усложняют поиск нужного решения. Для выполнения расчетных операций разработана блок-схема, представленная на (рис. 2).

Последовательность поиска технологического решения включает:

- расчет коэффициента диффузии для выбранной температуры диффузионного насыщения с учетом термодинамического коэффициента легирования;

- определение общего времени насыщения  $\tau = (h / k)^2$  для требуемой эффективной толщины слоя с использованием значения кинетического коэффициента  $k$ , который для температур науглероживания 900...940  $^{\circ}\text{C}$  составляет 0,40...0,45;

- выбор значений временных факторов, среди которых определяющее значение имеет  $\Sigma\tau_a$ ; этот фактор дает возможность устанавливать время пассивных ста-

дий  $\Sigma\tau_d = \tau - \Sigma\tau_a$  и отношение суммарных времен циклов  $\Sigma\tau_a/\Sigma\tau_d$ ; значимость фактора  $\Sigma\tau_a$  состоит в том, что он косвенно определяет количество углерода, которое за время пассивных стадий  $\Sigma\tau_d$  будет поглощено

слоем и определит вид концентрационной кривой в соответствии со значениями параметров структуры циклов:  $\tau_a$ ,  $\tau_d$ ,  $n$ .

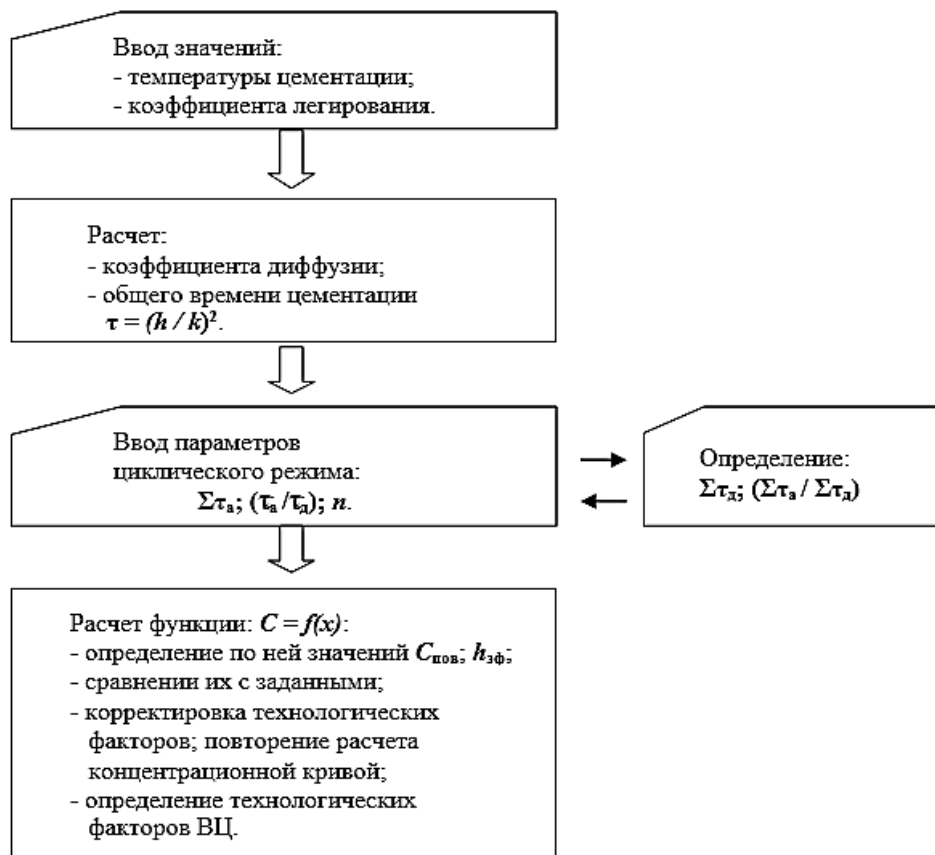


Рис. 2. Блок-схема выполнения расчета концентрационной кривой углерода  $C = f(x)$   
Fig. 2. Flowchart for calculating the carbon concentration curve  $C = f(x)$

В результате расчета определяется режим циклической подачи ацетилена. Проверкой установленного режима служит сравнение рассчитанных концентрационных значений с концентрационными кривыми, построенными по эксперименталь-

ным данным. Например, концентрационные кривые углерода, построенные для циклического режима подачи ацетилена:  $5 \cdot (5/10) + 6 \cdot (5/20) + 2 \cdot (5/35)$ , имеют следующий вид (рис. 3).



Рис. 3. Концентрационные кривые углерода: 1 – экспериментальная; 2 – расчетная  
Fig. 3. Carbon concentration curves: 1 – experimental; 2 – calculated

Анализ приведенных выше результатов показывает, что несоответствие по концентрации углерода между расчетными и экспериментальными данными не превышает 0,10 %. Несоответствие по толщине слоя составляет 0...0,1 мм, что находится в пределах допустимых значений.

К заметному сокращению расчетных операций и повышению эффективности проектирования технологии науглероживания приводит применение второй разработанной подпрограммы.

**Вторая подпрограмма** предусматривает нахождение оптимальной совокупности технологических факторов на основе решения обратной диффузионной задачи. В этом случае задается концентрационная кривая по совокупности трех точек (рис. 4). Первая из них отвечает концентрации углерода на поверхности; вторая точка - на расстоянии, равном заданной  $h_{эф}$ ; третья точка - на расстоянии, равном 1/3 эффективной толщине слоя. При этом последняя точка оценивает градиент концентрации углерода:  $\alpha = (C_{пов} - C_{1/3h_{эф}}) / C_{пов}$ .

Решение обратной диффузионной задачи сводится к решению прямой задачи, путем перебора различных вариантов обработки, поиска того режима науглероживания, при котором достигаются допустимые отклонения от заданной концентрационной кривой. Такой поиск осуществляет оптимизационная функция качества, которая оценивает и минимизирует отклонения параметров диффузионного слоя. В качестве примера на рис. 4 показан заданный и рассчитанный концентрационные профили углерода с принятыми в заводской практике допущениями на отклонения: по концентрации углерода  $\pm 0,1 \%$ ; по толщине слоя  $\pm 0,1$  мм. Заданное распределение углерода обеспечивает циклическая подачи ацетилена по режиму:  $(18 (2/6) + 8 (2/20))$ , при котором  $\tau = 320$  мин,  $\Sigma\tau_a = 52$  мин,  $\Sigma\tau_a/\Sigma\tau_d \approx 0,2$ . Такой режим соответствует следующим показателям, заданным по трем точкам:  $C_{пов} = 0,9 \%$ ;  $\alpha = 4,8 \%$ ;  $h_{эф} = 1,0$  мм (кривая 1, см. рис. 4). Расчетная кривая 2 соответствовала следующим показателям:  $C_{пов} = 0,89 \%$ ;  $\alpha = 5,6 \%$ ;  $h_{эф} = 1,1$  мм.

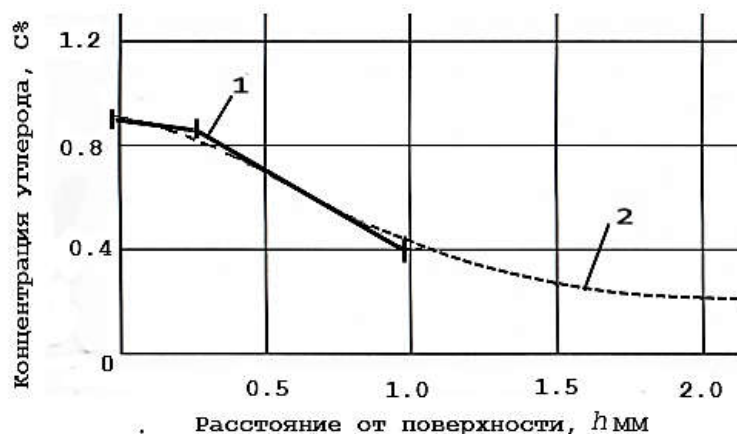


Рис. 4. Концентрационные кривые углерода: 1 - заданная по трем точкам; 2 - расчетная  
Fig. 4. Carbon concentration curves: 1 - set at three points; 2 - calculated

Сравнение рис. 3 и 4 показало, что использование второй подпрограммы оказалось более предпочтительным по следующим основаниям:

- значительно сокращается время нахождения нужного режима обработки;
- концентрационный профиль может быть задан с учетом требования

обеспечения необходимого эксплуатационного свойства [17, 18].

Выполненные расчеты и результаты их обобщения дали возможность установить ряд закономерностей, которые целесообразно использовать при вакуумной цементации:

- длительность цементации определяет  $h_{эф}$  цементованного слоя;

– характеристики временного режима подачи ацетилена ( $\tau$ ,  $\tau_a$ ,  $\tau_d$ ,  $n$ ,  $\Sigma\tau_a$ ,  $\Sigma\tau_d$ ,  $\Sigma\tau_a/\Sigma\tau_d$ ) практически не влияют на  $h_{эф}$ ; однако они управляют его насыщенностью;

– основной управляющий параметр режима вакуумной цементации –  $\Sigma\tau_a$ ; увеличение доли  $\Sigma\tau_a$  сопровождается ростом концентрации углерода;

– при постоянном значении  $\Sigma\tau_a$  комбинация факторов  $n$ ,  $\tau_a$  и  $\tau_d$  оказывает влияние на характер распределения в слое концентрации углерода;

– время активной стадии цикла  $\tau_a$  должно составлять от 2-х до 5 мин;

– увеличение времени пассивной стадии приводит к снижению концентрации углерода на поверхности, формированию вблизи нее площадки равной концентрации;

– для устранения пересыщения поверхности углеродом целесообразно применять сложные циклы, содержащие 2...3 последних цикла с увеличенной стадией диффузии  $\tau_d$ ;

– для обеспечения определенных свойств рекомендуется устанавливать отношение  $\Sigma\tau_a/\Sigma\tau_d$  соответственно: циклической прочности – 0,1; контактной выносливости – 0,2...0,3; износостойкости – 0,4.

## Выводы

1. Разработан расчетный метод проектирования технологических режимов вакуумной цементации низколегированных сталей. Метод включает математическую модель и программное обеспечение, обеспечивающие решение диффузионной задачи с использованием граничного условия 2-го рода, которое оценивает плотность потока углерода, образующегося при диффузионном растворении в стали.

3. Рассмотрено решение прямой и обратной диффузионной задачи. При решении прямой задачи технологические

факторы определяют по результатам анализа концентрационных кривых углерода в цементованном слое; при решении обратной диффузионной задачи параметры технологических факторов определяют в соответствии с заданным распределении концентрации углерода.

3. По результатам выполненных расчетов проведена оценка влияния временных факторов циклической подачи ацетилена на параметры диффузионного слоя. Приведены рекомендации по выбору технологических факторов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wołowicz-Korecka E. Modeling methods for gas quenching, low-pressure carburizing and low-pressure nitriding // *Engineering Structures*. 2018. V. 177. P. 489 - 505. – EDN: FPYNHZ.
2. Болдырев А.П. Влияние фактора износа на характеристики пластинчатых поглощающих аппаратов подвижного состава железных дорог / А. П. Болдырев, А. М. Гуров, П. Д. Жиров [и др.] // *Транспортное машиностроение*. 2024. № 10(34). С. 27-35. DOI 10.30987/2782-5957-2024-10-27-35. – EDN GLNBUK.
3. Pakhomova S. A. Manayev O. I. Effect of Heat Shotblast Treatment Exerted on the Contact Fatigue of Carburised Heat-Resistant Steel C0.12Cr2NiWV // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9, no. 4, pp. 732-735. DOI 10.1134/S2075113318040251. – EDN VBCBAC.
4. Балановский А.Е., Бу В.Г. Насыщение поверхности металла углеродом при плазменной поверхностной обработке // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2017. Т. 13. № 9 (153). С. 403—415. – EDN: ZHBJMP.
5. Reinhold B. Plasma carburizing: exotic with potential. *International Heat Treatment & Surface Engineering*. 2009, vol. 3-4, pp. 136-140. DOI: 10.1179/174951409X12542264514202.
6. Otto F.J., Herring D.H. Vacuum carburizing of aerospace and automotive materials. *Heat Treating Progress*. 2005, vol. 5, no. 1, pp. 33-37.
7. Закономерности массопереноса углерода при цементации в атмосферах низкого давления и граничные условия математической модели / М.Ю. Семенов, П.Н. Демидов, М.Ю. Рыжова, И.П. Королев // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2016. № 3 (51). С. 102-107. – DOI 10.12737/22048. – EDN WRIVVZ.
8. Моделирование процессов химико-термической обработки на основе интеллектуального анализа данных / С. Н. у. Абсаттаров, Н. К. Турсунов, Э. М. Бахтеев [и др.] // *Universum: технические науки*. 2024. № 9-2(126). С. 5-9. – EDN NNPOTC.
9. Fedorov S., Fedorova L., Zaripov V. [et al.] In-

creasing the wear resistance of the executive surfaces of machine parts concentrated energy flows // *Materials Today: Proceedings: 2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC, Saint Petersburg. 2020, 30 (3), pp. 388-392. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.382.*

10. Смирнов А.Е. Определение режимов вакуумной цементации на основе расчетного метода / А. Е. Смирнов, Р. С. Фахуртдинов, М. Ю. Рыжова, С. А. Пахомова // *Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 6(162). С. 269-274. – EDN XPNBVR.*
11. Семенов М. Ю., Смирнов А. Е., Рыжова М. Ю. Проблемы моделирования массопереноса углерода из насыщающей атмосферы низкого давления в сталь // *МиТОМ. 2021. № 2(788). С. 39 - 43. – EDN: JUKKHD*
12. Kula P., Pietrasik R., Dybowski K. Vacuum carburizing-process optimization // *Journal of Materials Processing Technology. 2005, vol. 164 – 165, pp. 876-881. – EDN: KLULAR.*
13. Определение углеродного потенциала и коэффициента массопереноса углерода при вакуумной цементации сталей / М. Ю. Семенов, А. Е. Смирнов, Л. П. Фомина, С. Н. У. Абсаттаров // *Металловедение и термическая обработка металлов. 2024. № 1(823). С. 8-13. DOI*

## REFERENCES

1. Wołowiec-Korecka E. Modeling methods for gas quenching, low-pressure carburizing and low-pressure nitriding. *Engineering Structures. 2018;177:489-505.*
2. Boldyrev AP, Gurov AM, Zhiron PD, Kravtsov SA, Privalov AS. The effect of the wear factor on the characteristics of plate-type shock-absorbing devices of railway rolling stock. *Transport Engineering. 2024;10:27-35. DOI 10.30987/2782-5957-2024-10-27-35.*
3. Pakhomova SA, Manayev OI. Effect of heat shot-blast treatment exerted on the contact fatigue of carburised heat-resistant steel C0.12Cr2NiWV. *Inorganic Materials: Applied Research. 2018;9(4):732-735. DOI 10.1134/S2075113318040251.*
4. Balanovsky AE, Wu VG. Carburization of the metal surface by plasma surface treatment. *Strengthening Technologies and Coatings. 2017;13(9(153)):403-415.*
5. Reinhold B. Plasma carburizing: exotic with potential. *International Heat Treatment and Surface Engineering. 2009;3-4:136-140. DOI: 10.1179/174951409X12542264514202.*
6. Otto FJ, Herring DH. Vacuum carburizing of aerospace and automotive materials. *Heat Treating Progress. 2005;5(1):33-37.*
7. Semenov MYu, Demidov PN, Ryzhova MYu, Korolev IP. Carbon mass transfer regularities at case-hardening in low-pressure atmospheres and boundary conditions of simulator. *Bulletin of Bryansk State Technical University. 2016;3(51):102-107. DOI 10.12737/22048.*
8. Absattarov SN, Tursunov NK, Bakhteev EM. Modeling thermochemical processes based on data mining. *Universum: Technical Sciences. 2024;9-2(126):5-9.*
9. Fedorov S, Fedorova L, Zaripov V. Increasing the wear resistance of the executive surfaces of machine parts concentrated energy flows. *Proceedings of 2019 International Scientific Conference on Materials Science, 2020: Composites, Alloys and Materials Chemistry; Saint Petersburg: MS-CAMC; 2020;30(3):388-392. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.382.*
10. Smirnov AE, Fakhurtdinov RS, Ryzhova MYu, Pakhomova SA. The definition of conditions of vacuum carburizing on basis of calculation method. *Strengthening Technologies and Coatings. 2018;14(6(162)):269-274.*
11. Semenov M. Yu., Smirnov A. E., Ryzhova M. Yu. Problems of simulation of carbon mass transfer from low-pressure saturating atmosphere into steel. *Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov. 2021;2(788):39-43.*
12. Kula P, Pietrasik R, Dybowski K. Vacuum carburizing-process optimization. *Journal of Materials Processing Technology. 2005;164–165:876-881.*
13. Semenov MYu, Smirnov AE, Fomina LP, Absattarov SNU. Determination of carbon potential and carbon mass transfer coefficient during vacuum carburization of steels *Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov. 2024;1(823):8-13. DOI*
14. Федин В.М. Обоснование применения новой технологии производства шпинтонов / В. М. Федин, Т. А. Попова, К. А. Чернышев, А. И. Фимкин // *Транспортное машиностроение. 2025. № 1(37). С. 68-78. DOI 10.30987/2782-5957-2025-1-68-78. – EDN LVIOSM.*
15. Комаровский Н.В., Отока А.Г. Особенности проведения испытаний зубчатых колес тяговых передач локомотивов и моторвагонного подвижного состава (обзор) // *Транспортное машиностроение. 2024. №9. С. 27-37. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-9-27-37.*
16. Atena H., Schrank F. Neiderdruck-Aufkohlung mit Hochdruck-Gasabsschreckung. *HTM. 2002, vol. 57, no. 4, pp. 247–256. DOI: 10.1515/htm-2002-570407.*
17. Pakhomova S.A., Unchikova M.V., Fakhurtdinov R.S. Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization. *Materials Science Forum. 2016, 870, pp. 383-391. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.383.*
18. Быков Ю.А., Унчикова М.В., Пахомова С.А., Помельникова А.С., Силаева В.И. Методика выбора материала и технологии термической обработки деталей машиностроения // *Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 8. С. 43-47. – EDN: UCLTCZ.*



- 10.30906/mitom.2024.1.8-13. .
14. Fedin VM, Popova TA, Chernyshev KA, Fimkin AI. Grounds for application of a new technology for tail production. *Transport Engineering*. 2025;1:68-78. DOI 10.30987/2782-5957-2025-1-68-78.
15. Komarovskiy NV, Otoka AG. Features of testing cogged wheels of traction gears of locomotives and multiple rolling stock (review). *Transport Engineering*. 2024;9:27-37. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-9-27-37.
16. Atena H, Schrank F. Neiderdruck-Aufkohlung mit Hochdruck-Gasabsschreckung. HTM.

2002;57(4):247–256. DOI: 10.1515/htm-2002-570407.

17. Pakhomova SA, Unchikova MV, Fakhurtdinov RS. Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization. *Materials Science Forum*. 2016;870:383-391. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.383.
18. Bykov YuA, Unchikova MV, Pakhomova SA, Pomelnikova AS, Silaeva VI. Selection method of material and heat treatment technology for mechanical engineering parts. *Blanking Productions in Mechanical Engineering*. 2015;8:43-47.

#### Информация об авторах:

**Пахомова Светлана Альбертовна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материаловедение» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, SPIN-cod 7042-6638, Scopus Author ID:7004146473,

Web of Science Researcher ID N-3773-2018, тел. (499) 267-00-71.

**Гресс Марина Алексеевна** – старший преподаватель кафедры «Материаловедение» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, SPIN-cod 6315-2438, тел. (499) 267-00-71.

**Pakhomova Svetlana Albertovna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Material Science Department at Bauman Moscow State Technical University, SPIN-cod 7042-6638, Scopus Author ID:7004146473, Web of Science Researcher ID N-3773-2018; phone +7(499)267-00-71.

**Gress Marina Alekseevna** – Senior lecturer of Material Science Department at Bauman Moscow State Technical University, SPIN-cod 6315-2438, phone +7(499)267-00-71.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 30.04.2025; одобрена после рецензирования 05.06.2025; принята к публикации 26.06.2025. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 30.04.2025; approved after review on 05.06.2025; accepted for publication on 26.06.2025. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.