



УДК 621.452.322:678.073

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-3-38-46>

Научная статья

Research article



Расчет глубины проникновения реакции при химическом газофазном осаждении нитрида бора в пористых телах

А. Н. Тимофеев¹, А. С. Разина¹✉, П. А. Тимофеев¹, А. Г. Бодян²

¹ АО «Композит»

Россия, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, 4

² Технологический университет им. А.А. Леонова (МГОТУ)

Россия, 141070, Московская обл. г. Королев, ул. Гагарина, 42

✉ as.razina@gmail.com

Аннотация. Проведенные с помощью программного комплекса «TERRA» термодинамические расчеты системы B–Cl–N–H показали, что введение водорода в систему B–Cl резко снижает термодинамическую устойчивость BCl_3 с возможностью образования бора в конденсированной фазе, а добавка аммиака, который содержит водород, приводит к образованию нитрида бора в широком интервале температур. Анализ кинетических зависимостей показывает наличие трех областей процесса осаждения нитрида бора: К – кинетическая область (от 1400 К и ниже), Д – диффузионная область (от 1800 К и выше) и П – переходная область. Для кинетической области определена энергия активации процесса $E_a = 134$ кДж/моль. В диапазоне температур 1023–1123 К получены линейные зависимости. Для расчетов глубины проникновения процесса осаждения нитрида бора в пористое тело было принято, что газовая смесь состоит из трихлорида бора, аммиака и аргона ($\text{BCl}_3 + \text{NH}_3 + 30\text{Ar}$). Результаты расчетов показали, что реагентом, лимитирующим глубину проникновения, является трихлорид бора. Были определены глубины проникновения процесса химического осаждения нитрида бора из газовой фазы (CVI-BN – *chemical vapor infiltration boron nitride*) при давлении 0,1 кПа в температурном интервале 1100–1400 К при диаметрах пор 1, 10, 30, 100, 200 и 300 мкм. При наличии результатов порометрии конкретной преформы полученные зависимости глубины проникновения процесса CVI-BN в пористое тело от температуры при определенных условиях позволяют оценить необходимые параметры процессов формирования интерфазы из пиролитического нитрида бора.

Ключевые слова: пиролитический нитрид бора (ПНБ), интерфазное покрытие, термодинамический расчет, химическое осаждение нитрида бора из газовой фазы

Для цитирования: Тимофеев А.Н., Разина А.С., Тимофеев П.А., Бодян А.Г. Расчет глубины проникновения реакции при химическом газофазном осаждении нитрида бора в пористых телах. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2023;17(3):38–46. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-3-38-46>

Calculating the penetration depth of reaction in chemical gas-phase deposition of boron nitride within porous bodies

A. N. Timofeev¹, A. S. Razina¹✉, P. A. Timofeev¹, A. G. Bodyan²

¹ JSC “Kompozit”

4 Pionerskaya Str., Korolyov, Moscow region 141070, Russia

² Leonov University of Technology

42 Gagarina Str., Korolyov, Moscow region 141070, Russia

✉ as.razina@gmail.com

Abstract. The thermodynamic calculations conducted using the TERRA software package for the B–Cl–N–H system revealed that the inclusion of hydrogen into the B–Cl system significantly diminishes the thermodynamic stability of BCl_3 with the possibility

of boron formation in the condensed phase. On the other hand, the introduction of ammonia, which includes hydrogen, results in the synthesis of boron nitride across a broad temperature spectrum. The analysis of kinetic relationships uncovered three distinct regions in the boron nitride deposition process: *K* – kinetic region (up to 1400 K), *D* – diffusion region (above 1800 K) and *T* – transition region. The activation energy for the kinetic region was calculated as $E_a = 134$ kJ/mol. Within the temperature range of 1023–1123 K, linear dependences were observed. The computation of the penetration depth for the boron nitride deposition process assumed a gas mixture of boron trichloride, ammonia, and argon ($\text{BCl}_3 + \text{NH}_3 + 30\text{Ar}$). The results indicated that boron trichloride governs the extent of penetration. The depths of penetration for the chemical vapor infiltration boron nitride (CVI-BN) process, conducted at 0.1 kPa within the temperature range of 1100–1400 K, were determined for pore diameters of 1, 10, 30, 100, 200 and 300 μm . When porosimetry data for a specific preform is available, the acquired penetration depth relationships for the CVI-BN process under specific parameters and process temperatures facilitate the estimation of essential parameters for interphase formation using pyrolytic boron nitride.

Keywords: pyrolytic boron nitride (PBN), interphase coating, thermodynamic calculation, chemical vapor infiltration boron nitride (CVI-BN)

For citation: Timofeev A.N., Razina A.S., Timofeev P.A., Bodyan A.G. Calculating the penetration depth of reaction in chemical gas-phase deposition of boron nitride within porous bodies. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2023;17(3):38–46. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2023-3-38-46>

Введение

Интерес к пиролитическому нитриду бора (ПНБ), обладающему рядом уникальных характеристик (высокие электроизоляционные свойства, химическая стойкость в агрессивных газах, жидкостях и расплавах металлов, термостойкость, небольшой коэффициент поглощения СВЧ-энергии), не ослабевает до настоящего времени [1–5]. Благодаря сочетанию такого комплекса положительных свойств и сохранения их при высоких температурах и в глубоком вакууме этот материал нашел широкое применение в электронике и электротехнике, атомной энергетике и полупроводниковой промышленности, высокотемпературной технике, а также при изготовлении контейнеров и защитных экранов при синтезе особо чистых соединений.

С разработкой волокон карбида кремния и материалов на их основе ПНБ стал применяться в качестве интерфейса между волокном и матрицей, обеспечивая высокие механические характеристики композиционного материала $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$ [6–10]. Создание керамических волокон других составов (Si_3N_4 , AlN , BN и пр.) и композитов на их основе также обеспечит востребованность ПНБ в качестве как интерфейса, так и матрицы.

Вместе с тем следует отметить, что параметры получения интерфейса на волокнах или матрицы композиционного материала методом химического осаждения из газовой фазы (CVI – *chemical vapor infiltration*) в пористом теле существенным образом зависят от пористой структуры преформы (размер пор, извилистость и др.). В настоящее время в конструкциях применяются композиционные материалы различных схем армирования и способов получения волокнистых преформ [11–13], каждая из которых обладает своей пористой структурой, что, соответственно, требует разработки своих параметров процессов CVI.

В данной статье представлены результаты расчетов допустимых областей параметров процесса осаждения нитрида бора методом CVI для различных размеров пор и толщин пористых тел.

Термодинамические расчеты системы B–Cl–N–H

Для определения допустимых областей параметров процесса химического осаждения нитрида бора из газовой фазы (температура (*T*), давление (*P*), соотношение исходных реагентов газовой смеси) с помощью программного комплекса «TERRA» (Россия, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана) были проведены термодинамические расчеты системы B–Cl–N–H.

На первом этапе были проанализированы равновесные составы систем B–Cl, N–H, B–Cl–N и B–Cl–N–H для оценки начальных температур диспропорционирования трихлорида бора и аммиака, влияния на этот процесс водорода и азота при различном давлении в системе. Расчеты показали (рис. 1, а), что при $P = 10$ кПа BCl_3 устойчив до $T = 1800$ К, после чего начинается процесс диспропорционирования на дихлорид и моноклорид бора. В системе N–H, образованной аммиаком, процесс его разложения на азот и водород практически полностью завершается при $T = 600$ К и $P = 10$ кПа (рис. 1, б).

Добавка азота в систему B–Cl не приводит к формированию нитрида бора и не влияет на термодинамическую устойчивость трихлорида бора (рис. 1, в), однако введение водорода в систему B–Cl резко снижает термодинамическую устойчивость BCl_3 (рис. 1, г) с возможностью образования бора в конденсированной фазе, доля которой увеличивается с повышением содержания водорода в смеси. Расчеты также показали, что снижение давления в системе

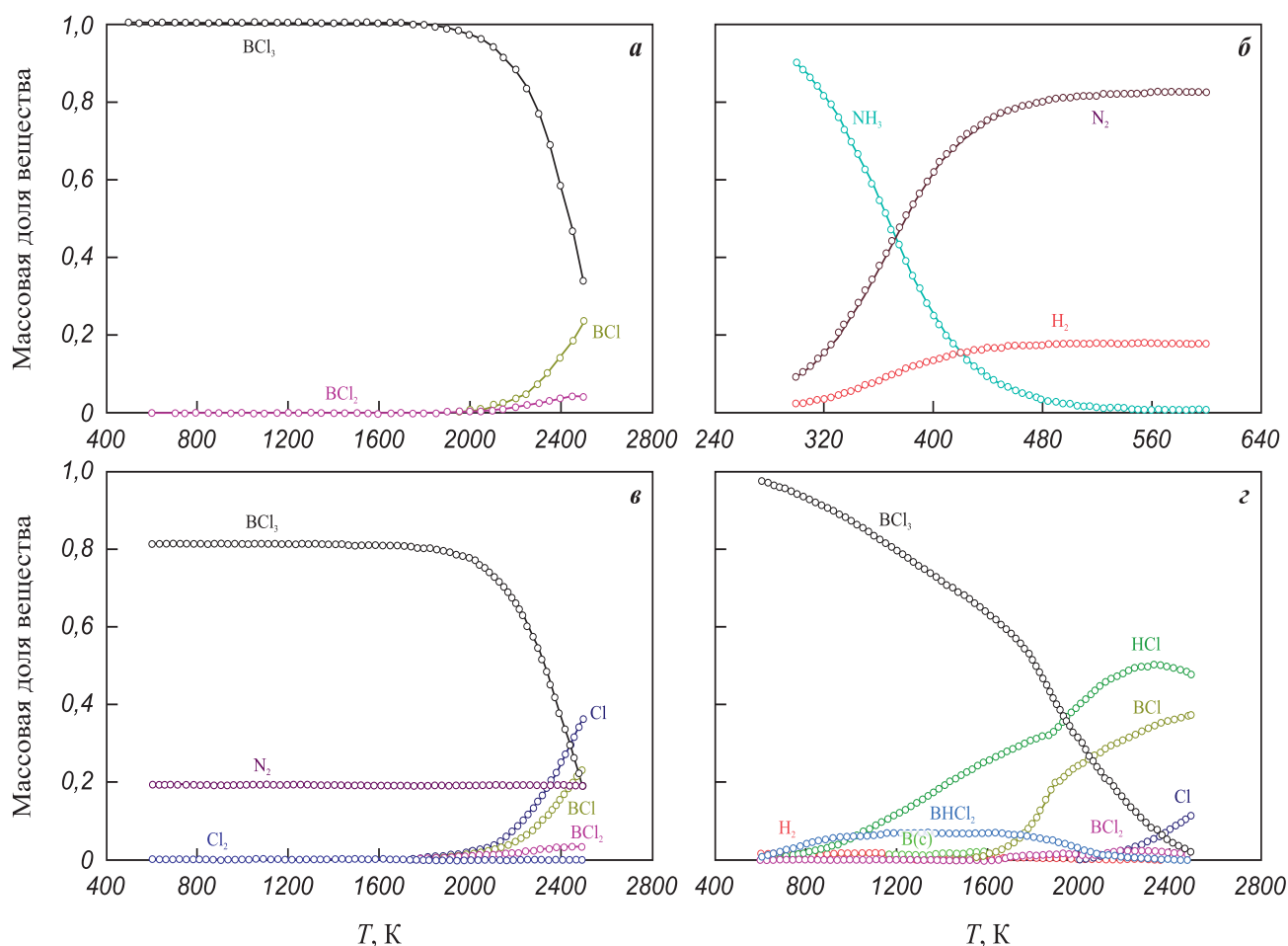


Рис. 1. Равновесный состав систем при давлении 10 кПа
а – система В–Сl, образованная газовой смесью BCl_3 ; б – В–N, образованная NH_3 ;
в – В–Сl–N, образованная $\text{BCl}_3 + \text{N}_2$; з – В–Сl–H, образованная $\text{BCl}_3 + \text{H}_2$

Fig. 1. Equilibrium composition of systems at 10 kPa pressure
а – В–Сl system formed by the BCl_3 gas mixture; б – В–N formed by NH_3 ;
в – В–Сl–N formed by $\text{BCl}_3 + \text{N}_2$; з – В–Сl–H formed by $\text{BCl}_3 + \text{H}_2$

уменьшает термодинамическую стабильность трихлорида бора и аммиака.

Введение в систему В–Сl аммиака, который содержит водород, снижающий термодинамическую стабильность хлоридов бора, приводит к формированию нитрида бора в широком интервале температур.

На рис. 2 представлены результаты расчетов, показывающие зависимость выхода конденсированного нитрида бора в системе В–Сl–N–H от температуры при давлении 10 кПа и различных соотношениях исходных реагентов. Видно (рис. 2, а), что при $\text{BCl}_3:\text{NH}_3:\text{H}_2 = 1:1:0$ термодинамическая стабильность трихлорида бора сохраняется почти до 2200 К, что не обеспечивает максимальный выход нитрида бора. Введение водорода в газовую смесь $\text{BCl}_3 + \text{NH}_3$ способствует увеличению степени разложения трихлорида бора, а следовательно, возрастает теоретический выход нитрида бора (рис. 2, б, в). При этом повышение концентрации водорода выше

соотношения 1:5 ($\text{BCl}_3:\text{NH}_3:\text{H}_2 = 1:1:5$) не приводит к росту выхода нитрида бора, так как уже происходит практически полное разложение трихлорида бора.

При этом следует отметить, что увеличивать содержание водорода в системе можно, повышая количество аммиака в системе. Так, уже при соотношении $\text{BCl}_3:\text{NH}_3 = 1:3$ (рис. 2, з) теоретический выход нитрида бора в конденсированную фазу почти такой же, как при введении водорода в систему в соотношении $\text{BCl}_3:\text{NH}_3:\text{H}_2 = 1:1:5$ (см. рис. 2, б).

Таким образом, термодинамические расчеты равновесного состава в системе В–Сl–N–H, образованной из газовой фазы исходными реагентами BCl_3 , NH_3 и H_2 , позволили оценить допустимую область параметров процесса химического осаждения нитрида бора. Полученные результаты легли в основу формирования матрицы экспериментов по получению ПНБ.

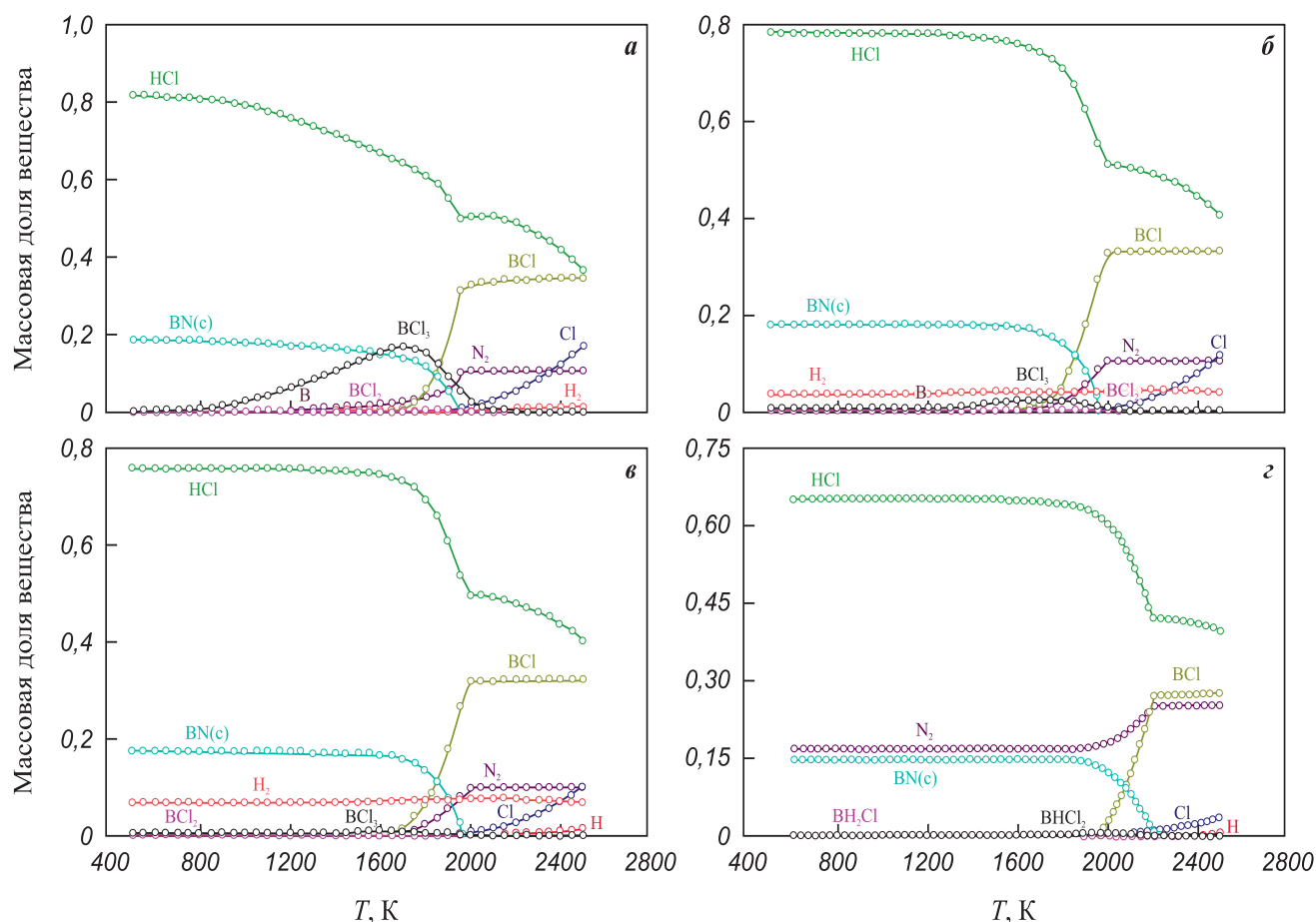


Рис. 2. Равновесный состав в системе B–Cl–N–H при давлении 10 кПа, образованной газовыми смесями $\text{BCl}_3 + \text{NH}_3$ (а), $\text{BCl}_3 + \text{NH}_3 + 5\text{H}_2$ (б), $\text{BCl}_3 + \text{NH}_3 + 10\text{H}_2$ (в) и $\text{BCl}_3 + 3\text{NH}_3$ (г)

Fig. 2. Equilibrium composition in the B–Cl–N–H system at 10 kPa pressure, formed by gas mixtures $\text{BCl}_3 + \text{NH}_3$ (a), $\text{BCl}_3 + \text{NH}_3 + 5\text{H}_2$ (б), $\text{BCl}_3 + \text{NH}_3 + 10\text{H}_2$ (в) and $\text{BCl}_3 + 3\text{NH}_3$ (г)

Методика эксперимента

Для определения кинетических закономерностей процесса осаждения ПНБ использовали следующие реагенты:

BCl_3 – бор треххлористый марки А (ТУ1-00-07526811-23-92);

NH_3 – аммиак (ГОСТ 6221-90);

Ar – аргон марки ВЧ (ГОСТ 10157-79).

Для изучения кинетических закономерностей получения покрытия из ПНБ на беспористых подложках применяли образцы из графита марки С-3 производства АО «Карботек» (Россия, г. Москва) с покрытием из пиролитического углерода, а на пористых подложках – образцы преформы (каркаса), сформированной гидроструйным методом из карбидокремниевой керамической нити Кералан (ТУ 20.60.13-952-56897835-2022) производства АО «Композит» (Россия, Московская обл., г. Королев) [14].

Пористость преформы исследовали методом эталонной порометрии на эталонном контактном

порометре Porotech 3.2 («Porotech Ltd.», Канада) в МГОТУ им. А.А. Леонова (Россия, Московская обл., г. Королев).

Осаждение пиролитического нитрида бора проводили на установке BN 2.0 (МГОТУ им. А.А. Леонова). Наличие интерфазного покрытия BN и его толщину на волокнах каркасов оценивали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе JSM-6610 LV (JEOL, Япония).

Фазовый состав ПНБ определяли с использованием рентгеновского дифрактометра EMRYREAN («PANalytical», Нидерланды).

Результаты и их обсуждение

На основании термодинамических расчетов выбраны следующие параметры процесса химического осаждения покрытия ПНБ на графитовую беспористую подложку (CVD – *chemical vapor deposition*):

$P = 0,1$ кПа для температурного интервала 1023–1123 К при соотношении реагентов $\text{BCl}_3:\text{NH}_3 = 1:1$;

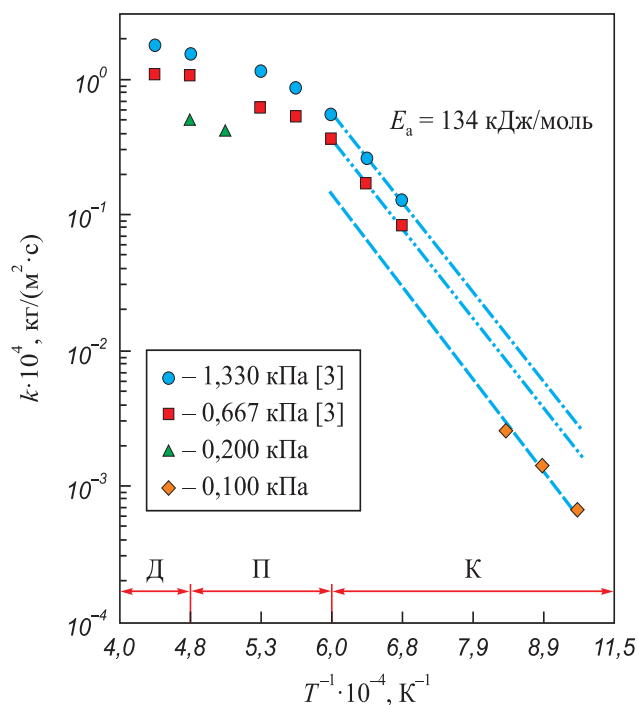


Рис. 3. Зависимость константы скорости осаждения покрытия из пиролитического нитрида бора от температуры

Fig. 3. Dependence of the deposition rate constant of a pyrolytic boron nitride coating on temperature

$P = 0,2$ кПа для $T = 2023 \div 2123$ К при $\text{BCl}_3:\text{NH}_3 = 1:3$.

В обоих случаях в качестве газа-носителя трихлорида бора применялся аргон.

Так как температуры начала разложения аммиака и трихлорида бора существенно отличаются (см. рис. 1, а, б), то целесообразно обеспечить их раздельную подачу в зону реакции для исключения преждевременного взаимодействия, что было реализовано в установке BN 2.0 с помощью коаксиальной трубки.

На рис. 3 приведены зависимости константы скорости осаждения покрытия из нитрида бора от температуры, полученные в работе [3] (где в качестве газа-носителя использовался водород) и авторами данной статьи. Термодинамические расчеты показали, что в области низких температур (1000–1200 К) теоретический выход нитрида бора в конденсированную фазу примерно одинаков для смеси $\text{BCl}_3:\text{NH}_3 = 1:1$ как с водородом, так и без него. В то же время в области высоких температур введение в смесь водорода или повышение содержания аммиака увеличивают теоретический выход нитрида бора в конденсированную фазу. В ходе экспериментальных исследований к аналогичным выводам пришли также авторы работ [15–19].

Анализ кинетических зависимостей, полученных в работе [3], показывает наличие трех областей процесса осаждения нитрида бора:

К – кинетическая область (от 1400 К и ниже);

Д – диффузионная область (от 1800 К и выше);

П – переходная область.

Для кинетической области определена энергия активации процесса $E_a = 134$ кДж/моль. В диапазоне температур 1023–1123 К нами также получены линейные зависимости. При этом их параллельность зависимостям, полученным в работе [3], указывает примерно на ту же энергию активации, несмотря на различные значения давления процессов. Это может быть связано с тем, что в рассматриваемом интервале $P = 0,1 \div 0,2$ кПа скорость осаждения не имеет сильной связи с давлением и, соответственно, с концентрацией реагентов, находящихся в кинетической области. Тогда скорость процесса определяется скоростью реакции, механизм которой одинаков в условиях процессов авторов [3] и наших.

Возможно, в дальнейшем при уточнении результатов будет проведена коррекция расчетов по энергии активации. Тогда для кинетического участка константа скорости процесса осаждения нитрида бора (k , кг/(м²·с)) при давлении 0,1 кПа из реакционной смеси $\text{BCl}_3 + \text{NH}_3$ в соотношении 1:1 может быть записана следующим образом:

$$k = 0,24 \exp\left(-\frac{134\,000}{RT}\right), \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура процесса осаждения ПНБ, К.

Следует также отметить, что плотность ПНБ, полученная в диапазоне $T = 1023 \div 1123$ К, составляет $\sim 1,4 \cdot 10^3$ кг/м³, в то время как для температурного интервала 2023–2123 К – она порядка $2,0 \cdot 10^3$ кг/м³. Исходя из результатов работы [3] можно предположить, что зависимость (1) распространяется как минимум до 1400 К, а возможные отклонения будут связаны с изменением плотности ПНБ.

Определение кинетической области – весьма важный этап, после которого можно перейти к моделированию процесса осаждения ПНБ на поверхности пористой преформы. Главная задача при исследовании кинетики процесса осаждения ПНБ в пористой преформе – определить глубину проникновения реакции образования покрытия на поверхности пор с целью оценки максимальной толщины преформы, во всем объеме которой на поверхности пор будет осажден ПНБ. Для такой оценки достаточно использовать расчетно-теоретическую модель, представленную в работе [20]. В виде уравнения для реакции первого порядка она может быть записана следующим образом:

$$L_{\max} \approx \left[\frac{\lambda d \sqrt{\frac{RT}{3M}} \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{\lambda}\right) \right]}{4X^3 k} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где L_{\max} – глубина проникновения реакции в пористую преформу, м; λ – длина свободного пробега молекулы газа, м; d – диаметр поры, м; M – масса молекулы газа, кг; k – константа скорости гетерогенной реакции на поверхности, кг/(м²·с); X – коэффициент извилистости, кг/м³.

Для газовой фазы, состоящей из смеси молекул нескольких разных веществ 1, 2, 3 ..., длина пробега равна [19]

$$\lambda_1 = KT \left[\pi \left(N_1 \sigma_1^2 \sqrt{2} + N_2 \sigma_2^2 \sqrt{1 + \frac{M_1}{M_2}} + N_3 \sigma_3^2 \sqrt{1 + \frac{M_1}{M_2}} + \dots \right) \rho \right]^{-1}, \quad (3)$$

где N – мольная доля; K – константа Больцмана, Дж/К; σ – диаметр молекулы, м; P – давление в системе, Па; ρ – плотность газовой фазы, г/см³.

Для расчетов было принято, что газовая смесь имеет состав $\text{BCl}_3 + \text{NH}_3 + 30\text{Ar}$, где трихлорид бора и аммиак определяются термодинамическими расчетами, а аргон выбран в качестве газа-разбавителя. С целью исключения в расчетах случайных ошибок, связанных с использованием значений диаметра молекул (σ) из разных источников, была применена единая методика расчета по формуле

$$\sigma = 1,329 \cdot 10^{-8} \left(\frac{M}{\rho} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

где ρ – плотность конденсированной фазы, кг/м³ ($\rho_{\text{BCl}_3} = 1,345 \cdot 10^3$ кг/м³ [21]).

В результате были получены следующие значения: $\sigma_{\text{BCl}_3} = 5,89 \cdot 10^{-10}$ м; $\sigma_{\text{NH}_3} = 3,88 \cdot 10^{-10}$ м; $\sigma_{\text{Ar}} = 4,15 \cdot 10^{-10}$ м и $\lambda_{\text{BCl}_3} = 9,05 \cdot 10^{-6} T/P$ м; $\lambda_{\text{NH}_3} = 21,5 \cdot 10^{-6} T/P$ м.

Коэффициент извилистости для тканопрошивных и иглопробивных каркасов с плотностью $(0,4\text{--}0,5) \cdot 10^3$ кг/м³ был оценен значением 1,3 [22].

Расчеты показали, что реагентом, лимитирующим глубину проникновения реакции осаждения ПНБ в пористое тело L_{\max} , является трихлорид бора. На рис. 4 представлены расчетные зависимости глубины проникновения реакции осаждения ПНБ на поверхности пор разного диаметра в температурном интервале 1100–1400 К при давлении 0,1 кПа.

Диаметр пор преформ керамоматричных композиционных материалов зависит от схем армирования и возможных последующих технологических переделов до получения пористых заготовок. Так, в поровом пространстве армирующего каркаса структур 3D и 4D можно выделить межжгутую (межстержневую) и межфиламентную пористости. При этом

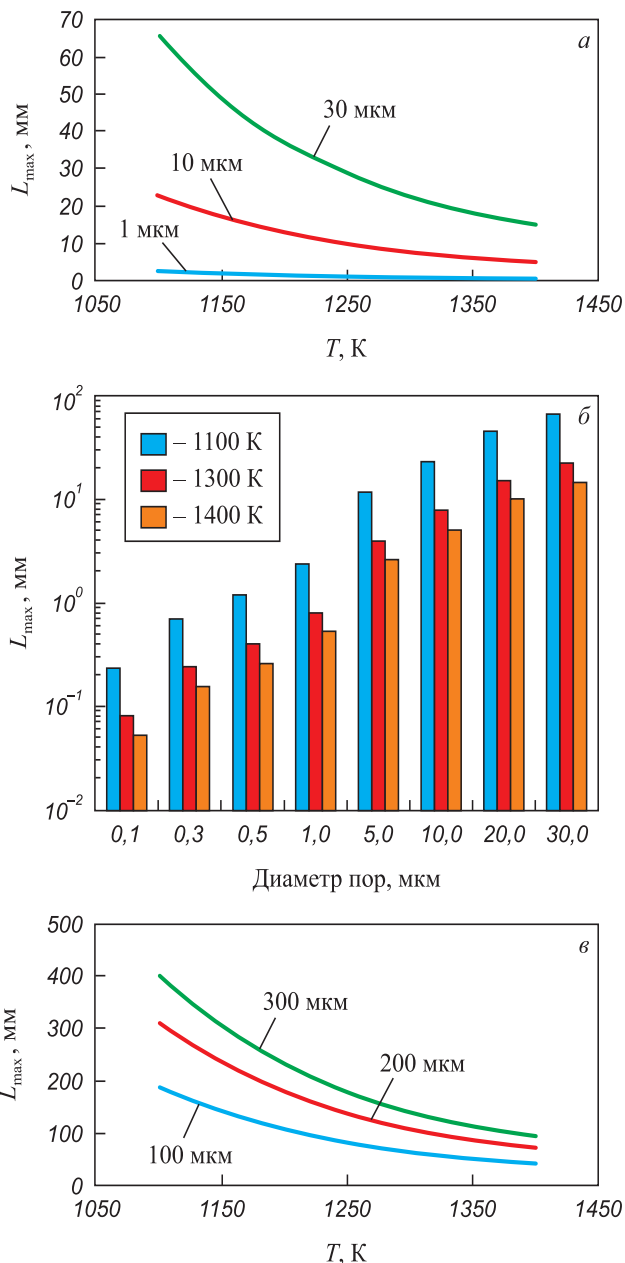


Рис. 4. Глубина проникновения реакции CVI-BN при $P = 0,1$ кПа в пористое тело при $T = 1100\text{--}1400$ К (а), 1100, 1300 и 1400 К (б) и 1100–1400 К (в)
Цифры у кривых – диаметр пор

Fig. 4. Penetration depth of the CVI-BN reaction at $P = 0.1$ kPa into a porous body at $T = 1100\text{--}1400$ K (a), 1100, 1300 and 1400 K (б) and 1100–1400 K (в)
The numbers next to the curves are the pore diameter

в первом случае размер межжгутовых (межстержневых) пор определяется диаметром жгута (стержня). Например, для каркаса 4D из стержней диаметром 0,7 мм диаметр межстержневых пор составляет 135,45 мкм [22].

В преформах со структурой 2,5D на основе углеродной ткани УТ-900П, прошитых углеродной нитью Урал-НШ24, выделяются 3 группы пор [22]:

1) диапазон пор диаметром до 0,8 мкм обусловлен дефектами волокна, пористостью коксовой смолы и пироуглерода;

2) диапазон пор диаметром 0,8–3,6 мкм образован главным образом межфиламентными порами;

3) диапазон пор включает также межжгутовые ($d = 3,6 \div 36,0$ мкм) и межслоевые ($d > 36,0$ мкм) поры.

В аналогичной преформе, но из углеродной ткани Урал-ТМ/4, прошитой углеродной нитью Урал-НШ24, преобладают поры размером $r = 0,1 \div 1,0$ мкм (поры кокса и межфиламентные поры) и 1–10 мкм (межнитяные (межжгутовые) поры). Пор радиусом менее 0,1 мкм и более 10 мкм в материале значительно меньше. Отличия в свойствах пористой структуры объясняются разными свойствами тканей Урал-ТМ/4 и УТ-900П. На размер пор также влияют диаметр филамента, диаметр жгута и плотность каркаса.

В работе [14] для нетканого каркаса из карбидокремниевых волокон «Сикволокс» (АО «ГНИИХТЭОС», Россия) были выделены три основных видимых типоразмера пор, вносящих свой вклад в общую пористую структуру: 15, 40 и 250 мкм. Аналогичные результаты получены и для каркасов на основе карбидокремниевых волокон марки Кералан (АО «Композит», РФ) [14].

По результатам проведенных расчетов опробован режим осаждения ПНБ при $T = 1100 \div 1400$ К и $P = 0,1$ кПа в нетканый каркас на основе карбидокремниевых волокон Кералан. На рис. 5 показана микроструктура полученного образца карбидокремниевых волокон с интерфазным покрытием ПНБ.

Результаты определения фазового состава образца волокон показывают наличие на поверхности карбидокремниевых волокон ПНБ гексагональной модификации ($P6mc$), которая обладает низкой сдвиговой прочностью в базовой плоскости, необходимой для реализации работы интерфазного покрытия [8].

Заключение

Таким образом, результаты порометрии конкретных преформ и полученные зависимости глубины проникновения процесса CVI-BN при определенных условиях в пористое тело позволяют оценить необходимые параметры процессов формирования как интерфазы из ПНБ, так и композитов с матрицей из ПНБ.

Список литературы / References

1. Аварбэ Р.Г., Шпак В.С. Тугоплавкие соединения – осаждение из газовой фазы. В сб.: *Химическое газофазное осаждение тугоплавких неорганических материалов*. Л.: ГИПХ, 1976. Т. 78. С. 97–103.

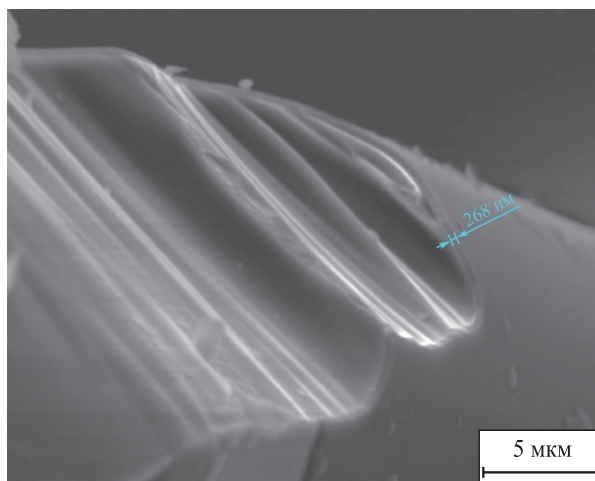


Рис. 5. Внешний вид интерфазного покрытия пиролитического нитрида бора толщиной ≈ 250 нм на карбидокремниевом волокне Кералан


Fig. 5. Formation of a pyrolytic boron nitride interphase coating with a thickness of ≈ 250 nm on Keralan silicon carbide fiber

- URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006955797> (Дата обращения: 10.04.2023).
2. Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хиллов П.А., Лукьяненко Ю.В., Белинис П.Г., Коротыгин А.А. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор). *Труды ВИАМ*. 2015;(9):80–85. <http://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-9-10-10>
Donetskiy K.I., Raskutin A.E., Hilov P.A., Lykianenko Yu.V., Belinis P.G., Korotigin A.A. Branding and woven textile preforms for the manufacturing fiber reinforced plastics (review). *Trudy VIAM*. 2015;(9):80–85. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-9-10-10>
 3. Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Физико-химические свойства молекулярных неорганических соединений (Экспериментальные данные и методы расчета). СПб: Химия, 1987. 312 с.
 4. Белова С.В. Пористые проницаемые материалы. М.: Металлургия, 1987. 335 с.
 5. Любина Дж. Справочник по композиционным материалам. М.: Машиностроение, 1988. 448 с.
 6. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 513 с.
 7. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Колесников С.А., Васильев Ю.Н. Неметаллические композиционные материалы в элементах конструкций и производстве авиационных газотурбинных двигателей: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 368 с.
 8. Evans A.G., Marshall D.B. Overview no. 85 The mechanical behavior of ceramic matrix composites. *Acta Metallurgica*. 1989;37(10):2575–2583. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(89\)90291-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90291-5)

9. Toshitsugu M., Hiroyuki N., Toshio H. Density and deposition rate of chemical-vapour-deposited boron nitride. *Journal of Materials Science*. 1988;23(2):509–514. <https://doi.org/10.1007/BF01174677>
10. Moore A.W. Characterization of pyrolytic boron nitride for semiconductor materials processing. *Journal of Crystal Growth*. 1990;106(1):6–15. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(90\)90281-O](https://doi.org/10.1016/0022-0248(90)90281-O)
11. Rozenberg A.S., Sinenko Yu.A., Chukanov N.V. Regularities of pyrolytic boron nitride coating formation on a graphite matrix. *Journal of Materials Science*. 1993;28(20):5528–5533. <https://doi.org/10.1007/BF00367825>
12. Kerans R.J., Hay R.S., Parthasarathy T.A., Cinibulk M.K. Interface design for oxidation-resistant ceramic composites. *Journal of the American Ceramic Society*. 2002;85(11):2599–2632. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.2002.tb00505.x>
13. Разина А.С., Тимофеев А.Н., Коломийцев И.А., Тимофеев П.А., Бодян А.Г. Некоторые технологические основы формирования композиционного материала $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$ с интерфазой из нитрида бора. *Вопросы оборонной техники. Композиционные и неметаллические материалы в машиностроении*. 2021;201(2):50–56.
Razina A.S., Timofeev A.N., Kolomiitsev I.A., Timofeev P.A., Bodyan A.G. Some technological foundations for the formation of a composite material $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$ with an interphase of boron nitride. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Kompozicionnye i nemetallicheskie materialy v mashinostroenii*. 2021;201(2):50–56. (In Russ.).
14. Suzuki M., Tanaka Y., Inoue Y., Miyamoto N., Sato M., Goda K. Uniformization of boron nitride coating thickness by continuous chemical vapor deposition process for interphase of SiC/SiC composites. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2003;111(12):865–871. <https://doi.org/10.2109/jcersj.111.865>
15. Udayakumara A., Sri Ganesh A., Raja S., Balasubramanian M. Effect of intermediate heat treatment on mechanical properties of SiC_f/SiC composites with BN interphase prepared by ICVI. *Journal of the European Ceramic Society*. 2011;31(6):1145–1153. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.12.018>
16. Fuhai L., Maozhong Y., Liping R., Yiccheng G., Zhe Zh., Ke P. Effects of h-BN/SiC ratios on oxidation mechanism and kinetics of C/C–BN–SiC composites. *Journal of the European Ceramic Society*. 2022;42(1):52–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.09.029>
17. Krenkel W. (ed.). Ceramic matrix composites: Fiber reinforced ceramics and their applications. 2008. 440 p. <https://doi.org/10.1002/9783527622412>
18. Богомолов П.И., Козлов И.А., Бируля М.А. Обзор современных технологий изготовления объемно-армирующих преформ для перспективных композиционных материалов. *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2017;1(39):22–27.
Bogomolov P.I., Kozlov I.A., Birulya M.A. A review of modern technologies of manufacturing of three-dimensional preforms for advanced composite materials. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2017;1(39):22–27. (In Russ.).
19. Тимофеев А.Н. Расчетно-теоретическая оценка глубин проникновения реакций по осаждению пиролизических матриц в пористых каркасах. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2012;(3):40–45.
Timofeev A.N. Calculation and theoretical estimation of penetration depth of chemical gas-phase deposition of pyrolytic matrices in porous bodies. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2012;(3):40–45. (In Russ.).
20. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. М., Л.: Химия, 1966. 535 с.
21. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. М.: Мир, 1964. 715 с.
22. Тимофеев И.А. Разработка технологических основ формирования окислительно-стойкой матрицы композиционного материала методом химического осаждения из газовой фазы Si–C–N–H: Дис. к.т.н. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.

Сведения об авторах

Анатолий Николаевич Тимофеев – д.т.н., зам. ген. директора по научной работе, АО «Композит».

 **ORCID:** 0000-0003-3862-5295


 **E-mail:** a_timofeev@mail.ru

Анна Сергеевна Разина – начальник группы АО «Композит».

 **ORCID:** 0000-0003-1205-4121


 **E-mail:** as.razina@gmail.com

Павел Анатольевич Тимофеев – к.т.н., начальник отдела АО «Композит».

 **ORCID:** 0000-0001-7448-8086

 **E-mail:** pa.timofeev@gmail.com


Александр Григорьевич Бодян – мл. науч. сотрудник кафедры техники и технологии, Технологический университет им. А.А. Леонова (МГОТУ).

 **ORCID:** 0000-0001-5203-9300

 **E-mail:** sany193@gmail.com

Information about the Authors

Anatoliy N. Timofeev – Dr. Sci. (Eng.), Deputy General Director for Research, JSC “Kompozit”.

 **ORCID:** 0000-0003-3862-5295

 **E-mail:** a_timofeev@mail.ru

Anna S. Razina – Group Leader, JSC “Kompozit”.

 **ORCID:** 0000-0003-1205-4121

 **E-mail:** as.razina@gmail.com

Pavel A. Timofeev – Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, JSC “Kompozit”.

 **ORCID:** 0000-0001-7448-8086

 **E-mail:** pa.timofeev@gmail.com

Aleksandr G. Bodyan – Junior Researcher, Department of Engineering and Technology, Leonov University of Technology.

 **ORCID:** 0000-0001-5203-9300

 **E-mail:** sany193@gmail.com

Вклад авторов



Contribution of the Authors

А. Н. Тимофеев – постановка задачи, разработка концепции статьи, критический анализ литературы, подготовка текста, формирование выводов исследования.

А. С. Разина – обработка статистических данных, осуществление расчетов, табличное и графическое представления результатов, описание результатов.

П. А. Тимофеев – проведение термодинамических расчетов, корректировка текста статьи, корректировка выводов.

А. Г. Бодян – подготовка эксперимента, проведение эксперимента, сбор статистических данных.

A. N. Timofeev – problem statement, development of the article's concept, critical literature analysis, text preparation, compilation of study conclusions.

A. S. Razina – statistical data processing, calculations implementation, tabular and graphical result presentation, results description.

P. A. Timofeev – thermodynamic calculations, text editing, conclusions correction.

A. G. Bodyan – experiment preparation, experiment execution, statistical data collection.

Статья поступила 05.05.2022 г.
Доработана 19.04.2023 г.
Принята к публикации 21.04.2023 г.

Received 05.05.2022
Revised 19.04.2023
Accepted 21.04.2023