

8. Chepak-Gizbrekht M.V. Oxidation of TiAl alloy by oxygen grain boundary diffusion / M.V. Chepak-Gizbrekht, A.G. Knyazeva // Intermetallics. – 2023. – Vol. 162. – 107993 с. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.107993>.

9. Чепак-Гизбрехт М.В. Двумерная модель зернограницной диффузии и окисления / М.В. Чепак-Гизбрехт, А.Г. Князева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 1. – С. 156–166. – DOI: 10.15593/perm.mech/2022.1.12.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНТЕЗА НА ПОДЛОЖКЕ КОМПОЗИТОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ УПРОЧНЯЮЩИХ ОКСИДНЫХ ЧАСТИЦ IN SITU

А. Г. Князева, д.ф.-м.н., проф.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Томская обл., г. Томск, пр. Ленина, 36*

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
634055, Томская обл., Томск, пр. Академический, 2/4*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: anna-knyazeva@mail.ru*

Аннотация. Представлены разные варианты моделей управляемого синтеза композитов из смесей порошков, способных к экзотермическим превращениям. Основные реакции идут в области действия подвижного источника тепла. Упрочняющие оксидные частицы формируются вследствие металлотермических реакций. Двумерные термокинетические и двухуровневые модели реализованы численно. Результаты качественно согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: синтез композитов, управление лазером, упрочняющие частицы, численный эксперимент.

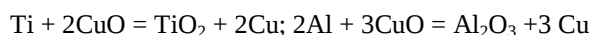
Abstract: Different variants of models of controlled synthesis of composites from powder mixtures capable of exothermic transformations are presented. The main reactions take place in the area of action of a mobile heat source. Strengthening oxide particles are formed due to metallothermic reactions. Two-dimensional thermokinetic and two-level models are realized numerically. The results are in qualitative agreement with experimental data.

Keywords: synthesis of composites, laser control, hardening particles, numerical experiment.

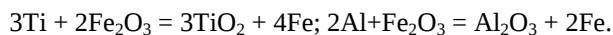
Синтез композитов и композитных покрытий в современных лазерных и электронно-лучевых технологиях – сложный многофакторный процесс. Гибридные технологии, сочетающие в себе, например, селективное лазерное плавление и синтез горением, – зависят от еще большего количества факторов, среди которых химические реакции (которые и приводят к изменению состава и формированию свойств) – наиболее сложны для интерпретации. Поэтому распространенные в литературе модели 3D-технологий, как правило, не учитывают деталей физико-химических превращений. Популярный в литературе метод фазового поля, претендующий на визуальное представление предполагаемых закономерностей, не позволяет моделировать реальные процессы, поскольку требует информации для новых материалов, которой нет в базах данных. Наиболее подходящим для моделирования эволюции состава многокомпонентных и многофазных систем в неравновесных условиях является макрокинетический подход, позволяющий выделить основные стадии и явления, создать иерархию редуцированных моделей, выработать критерии для оптимизации технологических процессов [1]. В настоящей работе этот подход используется для моделирования синтеза композитов из смесей порошков вида $\text{Al-Ti-Cr}_2\text{O}_3$, $\text{Al-Ni-Fe}_2\text{O}_3$, Ti-Al-CuO , $\text{Ti-Al-Fe}_2\text{O}_3$, расположенных на подложке.

В первых двух случаях в системе возможно протекание только по одной реакции восстановления хрома или железа алюминием [2, 3]. Весь комплекс реакций можно разделить на две группы – формирование упрочняющих частиц и формирование состав матрицы. Поскольку реакции протекают в неравновесных условиях с неоднородным полем температуры, в результате синтезированный композит содержит как исходные вещества, так и продукты реакций. Соответствующая термокинетическая модель включает уравнение теплопроводности с химическим тепловыделением и уравнения химической кинетики. Двухуровневая модель включает две подзадачи – тепловую и диффузионно-кинетическую. Предполагается, что химические реакции, скорость которых лимитируется диффузией, протекают на мезоуровне. В этом случае образование фаз описывается с помощью введения так называемой реакционной ячейки и моделируется в рамках теории реакционной диффузии. Подобные модели, как и термокинетические, имеют аналоги в макрокинетике [4].

В двух других системах принципиально возможны по две металлотермические реакции:



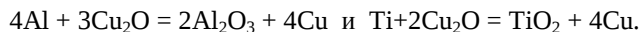
и



В этом случае оба типа моделей становятся более сложными. Так, в смеси Ti-Al-CuO возможно частичное разложение оксида меди, начинающееся еще в твердой фазе:



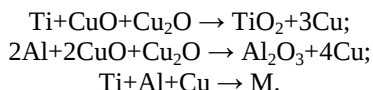
следствием чего будут еще две металлотермические реакции:



Кроме того, возможно формирование и других оксидов титана и алюминия.

В этой системе возможно большое разнообразие интерметаллидов и тройных соединений. Механизмы реакций недостаточно понятны, и учесть все реакции не представляется возможным.

На основе данных эксперимента в [5] была предложена редуцированная схема, включающая реакцию (1) и три суммарных стадии:



Последняя «реакция» дает сложный состав матрицы (М) и при желании может быть расписана более детально.

Двумерная математическая модель для этой системы включает уравнение теплопроводности, осредненное по толщинам подложки и порошкового слоя. Кинетически уравнения для компонентов учитывают их источники и стоки в реакциях. Скорости реакций зависят от температуры по закону Аррениуса, а от концентраций в соответствии с законом действующих масс. При описании плавления вводится интервал температур, в котором изменяется доля жидкой фазы, что позволяет определять положение ванны расплава, двухфазной зоны и твердого материала. Гидродинамика возможного расплава в этом приближении не учитывается. Одно из оснований для этого – малый размер ванны расплава по сравнению с размером всего образца.

Сформулированная модель реализована численно. Использованы расщепление по координатам и метод прогонки. Точность расчетов проверялась по закону сохранения массы и сохранению числа частиц.

Анализ результатов, полученных для разных начальных составов смеси и разных условий управления процессом с помощью лазера позволил выявить двухэтапный процесс синтеза композита.

Первый этап состоит в частичном разложении оксида меди, причем реакция опережает внешний источник тепла и быстро распространяется по предварительно нагретой поверхности. Затем идет постепенное образование оксидов и матрицы. Поскольку нагрев неоднородный, в результате формируется неоднородный состав в слое, зависящий от скорости перемещения лазерного луча, ширины сканирования и мощности лазерного излучения. В связи с изменением состава, изменяются и свойства (плотность, теплоемкость, теплопроводность). Вследствие неравновесности процесса, реакции не завершаются, и продукт содержит набор веществ CuO, Cu₂O, TiO₂, Al₂O₃, Ti, Al, M.

Заметим, что в моделях любого типа вследствие неоднородного температурного поля свойства (теплопроводность, плотность, теплоемкость) изменяются также неоднородно. Их расчет по данным о составе, изменяющемся в процессе синтеза, является дополнительным бонусом моделей. Однако, как показал вычислительный эксперимент, разброс эффективных свойств сравним или меньше того, который следует из экспериментальных исследований.

Получаемые численно результаты качественно согласуются с данными эксперимента [5] для тех же составов. Для получения более однородного состава композита управляющие параметры и состав порошковой смеси должны быть оптимизированы.

Работа выполнена по программе фундаментальных научных исследований ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2022-0003.

Список использованных источников:

1. Рогачев А.С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику / А.С. Рогачев, А.С. Мукасян. – Москва : изд-во Физматлит, 2013. – 400 с.
2. Knyazeva A.G. The synthesis of composites with reinforcing particles on a thin substrate / A.G. Knyazeva, O.N. Kryukova // Materials Physics and Mechanics. – 2021. – Vol. 47. – P. 254–265. – DOI: http://dx.doi.org/10.18149/MPM.4722021_8/
3. Kryukova O.N. Two level model controlled synthesis of a composite on a substrate / O.N. Kryukova, A.G. Knyazeva // Multiscale Science and Engineering. – 2023. – Vol. 5. – P. 10–22. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42493-023-00091-6>.

4. Князева А.Г. Two-level models of composite synthesis: history and potential // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2024. – Vol. 60. – № 1. – P. 42–55. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508224010052>.

5. Knyazeva A.G. Reaction initiation by laser in Ti-Al-CuO-powder mixture / A.G. Knyazeva, M.G. Krinitcyn // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2025. – Vol. 32. – № 1. – P. 117–125. – DOI: 10.3103/S1061386224700365.

КРИТЕРИИ ВЫБОРА МАГНИТА ТРАНСПОРТНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

*С.И. Корягин, д.т.н., проф., О.В. Шарков^а, д.т.н. проф., Н.Л. Великанов, д.т.н., проф.
Балтийский федеральный университет им. И. Канта
236014, г. Калининград, ул. А. Невского, 14
E-mail: ^аosharkov@kantiana.ru*

Аннотация: Магниты, применяемые в робототехнических транспортных устройствах, перемещающихся по ферромагнитным поверхностям, создают и поддерживают силы притяжения между поверхностью и устройством. Выбор параметров электромагнита зависит от типа и размера робототехнического устройства, условий его эксплуатации. Проведена экспериментальная оценка силы притяжения, создаваемой магнитами броневое типа и в виде колесной пары. Выполнено сравнение эффективности этих типов магнитов по критерию добротности.

Ключевые слова: ферромагнитная поверхность, рабочий зазор, добротность электромагнита.

Abstract. Magnets used in robotic transport devices that move on ferromagnetic surfaces create and maintain attractive forces between the surface and the device. The choice of electromagnet parameters depends on the type and size of the robotic device and its operating conditions. An experimental assessment of the attractive force created by armored type electromagnets and in the form of a wheel pair was carried out. The efficiency of these types of magnets was compared according to the quality factor criterion.

Keywords: ferromagnetic surface, working clearance, electromagnet quality factor.

Перспективным направлением в области ремонта и технического обслуживания инженерных конструкций, изготовленных из ферромагнитных материалов, является использование для перемещения инструментов транспортных робототехнических устройств магнитного типа, которые перемещаются непосредственно по рабочей поверхности [1–3].

При перемещении таких робототехнических устройств на них действуют силы, стремящиеся оторвать их от ферромагнитной поверхности: сила тяжести устройства; реакция со стороны рабочих инструментов; нормальная реакция со стороны опорной поверхности. Компенсация действия этих сил и удержание транспортного устройства на ферромагнитной поверхности осуществляется за счет силы притяжения, развиваемой электромагнитами [4].

Сила притяжения электромагнита к ферромагнитной поверхности является следствием его взаимодействия с намагниченной поверхностью и определяется производной от энергии магнитного поля по координате, которую сила стремится изменить:

$$F = dW / d\delta ,$$

где W – магнитная энергия; δ – зазор, между электромагнитом и ферромагнитной поверхностью.

Магнитная энергия в некотором объеме определяется по формуле:

$$W = \int_0^V \frac{\vec{B} \vec{H}}{2} dV ,$$

где $\vec{B}$ – вектор магнитной индукции; $\vec{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; V – объем пространства, занятого полем.

Преимущество применяемых постоянных магнитов по сравнению с электромагнитами очевидно: они не требуют дополнительных мер страховки для робототехнического устройства в случае внезапного отключения электроэнергии в электромагнитах, не выделяют тепла и т. п.

В то же время, сила притяжения постоянных магнитов из бариевых ферритов и сплавов резко изменяется при изменении зазора между магнитом и поверхностью притяжения, а при зазорах свыше 10 мм эти магниты не обеспечивают достаточную силу электромагнитного притяжения.

Использование магнитов, изготовленных из редкоземельных металлов, обладающих высокой добротностью, представляется экономически нецелесообразным. В связи с этим постоянные магниты рекомендуется использовать в гусеничных транспортных устройствах посредством размещения магнитов в траках гусеницы,