

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 10

ТВЕРЬ 2018

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

**Официальный сайт издания в сети Интернет:
www.physchemaspects.ru**

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – 708 с.

ISBN 978-5-7609-1395-1

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1395-1

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2018
© Тверской государственной
университет, 2018

УДК 539.213.27 : 541.8.041.3

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ФОРМИРОВАНИЯ МОНО- И БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ КОАЛЕСЦЕНЦИИ

А.Ю. Колосов¹, В.С. Мясниченко¹, С.С. Богданов¹, В.И. Романовский^{2,3},
Н.И. Непша¹, К.Р. Щербатых¹, Н.Ю. Сдобняков¹

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170102, Тверь, Садовый пер., 35

²УО «Белорусский государственный технологический университет»

220006, Республика Беларусь, Минск, ул. Свердлова, 13а

³НИЦ «Конструкционные керамические наноматериалы», ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСиС»

119049, Москва, Ленинский пр., 4

viplabs@yandex.ru, nsdobnyakov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.359

Аннотация: Проведено моделирование двумя альтернативными методами: методом Монте-Карло и методом молекулярной динамики процесса коалесценции при постепенном термическом воздействии для металлических наночастиц на основе никеля, алюминия, меди, серебра и золота. Были рассмотрены следующие типы моно- и биметаллических систем: в форме сферы и в форме двух перпендикулярных блоков. Установлено, что эволюция процесса коалесценции для монометаллических наночастиц существенно отличается от таковой для биметаллических наночастиц. Такие характеристики, как температура коалесценции, структура и форма манжеты, двугранный угол между наночастицами могут существенно различаться. Утверждается, что нельзя точно предсказать поведение биметаллической системы в процессе коалесценции, зная эволюцию процесса коалесценции для монометаллической системы, состоящей из тех же металлов.

Ключевые слова: моно- и биметаллические наночастицы, молекулярная динамика, коалесценция, метод Монте-Карло, метод молекулярной динамики, двугранный угол.

1. Введение

Изучение наночастиц позволило открыть новые пути в нанотехнологиях, которые в прошлом никогда не были доступны. Наноразмерные частицы имеют перестраиваемые свойства, которые могут приводить к появлению новых материалов с индивидуальной структурой. Типичным примером зависящего от размера свойства наночастиц является длина волны света, испускаемого квантовыми точками: весь спектр видимого света может генерироваться путем тонкой настройки их диаметров. Более того, каждая наночастица имеет внутреннюю атомную структуру, случайным образом ориентированную по отношению к таковой других наночастиц, что также объясняет специфические физические свойства ансамбля частиц. Благодаря широкому применению, от оптических и антикоррозионных покрытий до фотокатализаторов и солнечных элементов, а также от биоимплантируемых устройств и покрытий хирургического оборудования до химических реакторов и

компонент полупроводниковых приборов, можно предположить, что промышленный интерес к технологиям наночастиц будет только расти в последующие годы [1].

Для прикладных решений и, в особенности, функциональных материалов с высокой площадью поверхности управление пористостью и структурой тонкой пленки, получаемой из наночастиц, имеет первостепенное значение, поскольку эти факторы определяют многие другие ее физические свойства. В датчиках, например, облегчается электронный поток, и полученный электрический сигнал усиливается через манжеты, образованные среди наночастиц, что минимизирует контактное сопротивление. Во всем процессе роста пленки, частицы взаимодействуют друг с другом, образуя более крупные частицы или агломераты частиц с соответствующими структурами. В обоих случаях, когда первичные частицы объединяются в нанокластеры, и когда нанокластеры и небольшие наночастицы сливаются полностью или частично в более крупные наночастицы или агрегаты наночастиц, образовавшиеся пленки возникают через механизмы спекания. Поэтому неудивительно, что многие исследования, как экспериментальные, так и теоретические, были сосредоточены на полном понимании и моделировании этих механизмов. Независимо от того, насколько упрощены или сложны эти модели, они имеют общие результаты. Движущей силой спекания является минимизация свободной энергии системы за счет минимизации поверхностной энергии, которая происходит главным образом за счет атомной поверхностной диффузии. Это приводит к созданию манжеты переменной ширины между наночастицами, с последующим уменьшением радиусов вращения пар наночастиц. При определенных условиях (температура, размер и состав наночастиц и т.д.) возможна полная коалесценция наночастиц [2-4].

Таким образом, исследования факторов и условий образования моно- и биметаллических наночастиц очень важны как для фундаментальной, так и для прикладной науки, при этом компьютерное моделирование таких систем позволяет прогнозировать как оптимальные условия функционирования наноустройств на их основе, так и выявлять специфические особенности поведения, когда экспериментальные исследования трудоемки и затратны с точки зрения финансовых вложений [5].

2. Постановка задачи

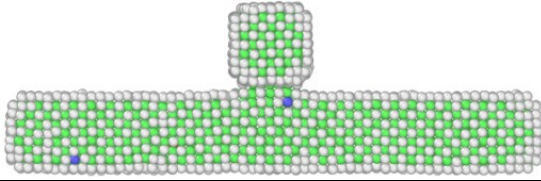
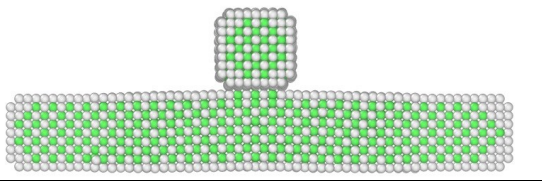
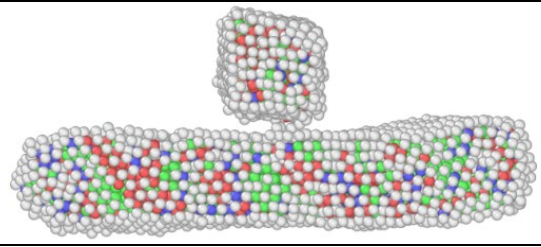
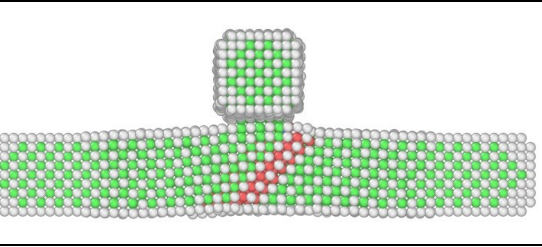
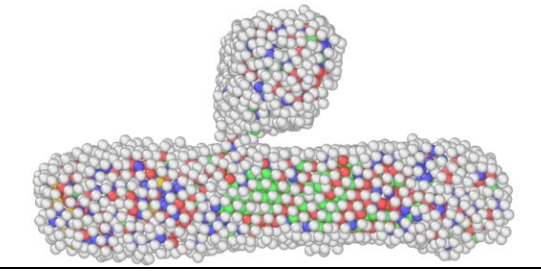
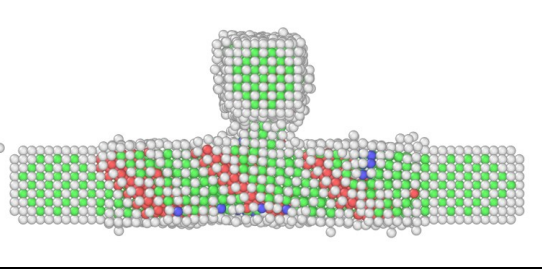
Целью настоящей работы являлось проведение компьютерного моделирования методом Монте-Карло (МК) и методом молекулярной динамики (МД) процесса коалесценции моно- и биметаллических

наночастиц с заданной формой и структурой. Результаты, полученные МК методом сравнивались с методом молекулярной динамики (МД), а затем анализировались условия формирования манжеты моно- и биметаллических наночастиц. Для описания взаимодействия между атомами использовался многочастичный потенциал Гупта [6], параметры которого взяты из работы [7]. Все расчеты проводились на программном обеспечении, созданном в нашей научной группе: для МК метода использовалась программа NanoExpert [8], а для МД метода программа ClusterEvolution [9].

3. Обсуждение результатов

В Таблице 1 представлены результаты моделирования системы вытянутых наночастиц (наноконтактов) $Ag_{2270} - Ag_{2270}$ различными методами при одинаковых условиях. Проведен структурный анализ мгновенных конфигураций и определена температура коалесценции двух наночастиц при различных расстояниях между ними.

Таблица 1. Сравнение результатов, полученных при моделировании МК и МД методами на примере системы $Ag_{2270} - Ag_{2270}$ при различных начальных расстояниях D . Цвет определяет тип наблюдаемой структуры: зеленый – атомы ГЦК структуры, красный – атомы ГПУ структуры, синий – атомы ОЦК структуры, белый – нераспознанные атомы

МД	МК
 <p style="text-align: center;">$D = 0,2 \text{ нм}, T = 300 \text{ К}$</p>	 <p style="text-align: center;">$D = 0,2 \text{ нм}, T = 332 \text{ К}$</p>
 <p style="text-align: center;">$D = 0,45 \text{ нм}, T = 552 \text{ К}$</p>	 <p style="text-align: center;">$D = 0,45 \text{ нм}, T = 469 \text{ К}$</p>
 <p style="text-align: center;">$D = 0,7 \text{ нм}, T = 621 \text{ К}$</p>	 <p style="text-align: center;">$D = 0,7 \text{ нм}, T = 850 \text{ К}$</p>

МК метод показывает несколько другие результаты, нежели метод молекулярной динамики. Температура коалесценции становится ощутимо выше, однако структура частиц более упорядочена. Частица деформируется только в месте контакта, тогда как по краям кристаллическая решетка остаётся неизменной, вплоть до температуры плавления.

В рамках данной работы были проведены расчеты пар монометаллических частиц в форме сферы с количеством атомов $N = 3997$: $Ni-Al$, $Ni-Cu$, и форме двух перпендикулярных блоков содержащих по $N = 2270$ атомов в каждом: $Cu-Cu$, $Cu-Ag$, $Cu-Au$, $Ag-Ag$, $Ag-Au$, $Au-Au$, а также биметаллических пар сферических частиц с таким же количеством атомов: $(Ni-Al)-(Ni-Al)$, $(Ni-Cu)-(Ni-Cu)$, и наночастиц в форме блоков соответственно: $(Cu-Ag)-(Cu-Ag)$, $(Cu-Au)-(Cu-Au)$, $(Au-Ag)-(Au-Ag)$. В биметаллических системах каждая наночастица содержала по 50% одного и другого сортов. При различных расстояниях 0,2–0,7 нм частицы нагревались до тех пор, пока между ними не произойдет контакт, затем строились калорические кривые потенциальной части внутренней энергии, и анализировалась структура системы.

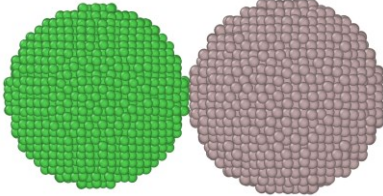
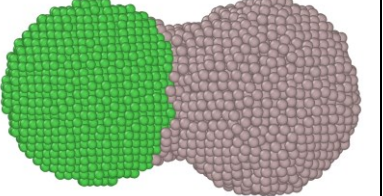
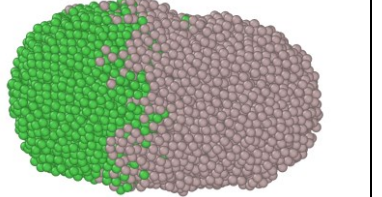
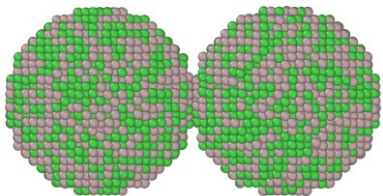
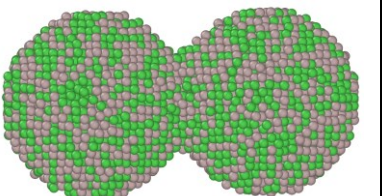
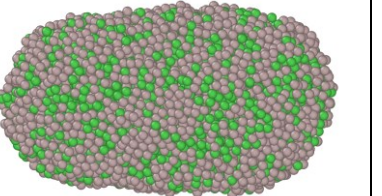
Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что температура и механизм коалесценции для биметаллических наночастиц отличаются от таковых для монометаллических частиц одинаковых пар металлов, причем в некоторых случаях различия существенны. Например, в случае пары металлов $Cu_{2270}-Ag_{2270}$ температура коалесценции выше на ~ 100 К, в сравнении с системой биметаллических частиц $(Cu-Ag)_{2270}-(Cu-Ag)_{2270}$.

Моделирование МД методом показывает плохую «склонность» к коалесценции наночастиц меди при низких температурах. Самой упорядоченной и предсказуемой, в части формирования структуры, системой является система $Au_{2270}-Ag_{2270}$, которая показывает линейную зависимость температуры коалесценции от расстояния между частицами. В то время как самыми «непредсказуемыми» системами являются системы, в которых присутствует медь.

В Таблице 2 показано сравнение эволюции систем сферических монометаллических частиц $Ni_{3997}-Al_{3925}$ и биметаллических частиц $(Ni-Al)_{3961}-(Ni-Al)_{3961}$ в процессе плавления и последующего процесса коалесценции. Начальное состояние между наночастицами составляло 0,0 нм. Как видно из Таблицы 2 монометаллические частицы, в данном случае, взаимодействуют лучше, чем биметаллические. Однако в случае биметаллических частиц образуется устойчивый контакт между частицами с сохранением кристаллической структуры, тогда как в

монометаллической системе наблюдается атомная диффузия и частица алюминия растекается по частице никеля, оставляя её ядро упорядоченным. Очевидно, это происходит потому, что свободная поверхностная энергия частицы алюминия меньше, чем у никеля.

Таблица 2. Сравнение эволюции систем сферических монометаллических частиц $Ni_{3997} - Al_{3925}$ и биметаллических частиц $(Ni - Al)_{3961} - (Ni - Al)_{3961}$ в процессе плавления: серым цветом показаны атомы алюминия, зеленым цветом – никеля

		
$T = 293 \text{ K}$	$T = 380 \text{ K}$	$T = 995 \text{ K}$
		
$T = 293 \text{ K}$	$T = 635 \text{ K}$	$T = 1067 \text{ K}$

Определенный практический интерес вызывает исследование температурных зависимостей двугранного угла манжеты, который позволяет определять соответствующие размерные зависимости для энергии границ и поверхностной энергии [10]. Известно, что в состоянии равновесия, выражение для рассматриваемого двугранного угла имеет вид:

$$\gamma_{gb} = 2\gamma_s \cos(\psi/2), \quad (1)$$

где γ_{gb} – энергия границы наночастицы, γ_s – поверхностная энергия.

На рис. 1 показаны соответствующие зависимости для систем, представленных в Таблице 2. Очевидно, что форма таких зависимостей для моно- и биметаллических систем, будет похожа на петлю гистерезиса, при этом важной технологической характеристикой, например, для нанопайки или формирования рельефа, будет запаздывание образования устойчивой манжеты для биметаллических наночастиц, по сравнению с монометаллическими.

Таким образом, начальная структура моно- или биметаллических частиц может определять размерные зависимости для энергии границ и поверхностной энергии в температурном интервале технологического использования. При этом оценка отношения γ_{gb} / γ_s в области высоких температур ($\sim 900 \text{ K}$) для моделируемых систем (см. рис. 1) показывает, что отношение для биметаллической системы оно будет превышать

соответствующую величину для монометаллической системы более чем в 5 раз.

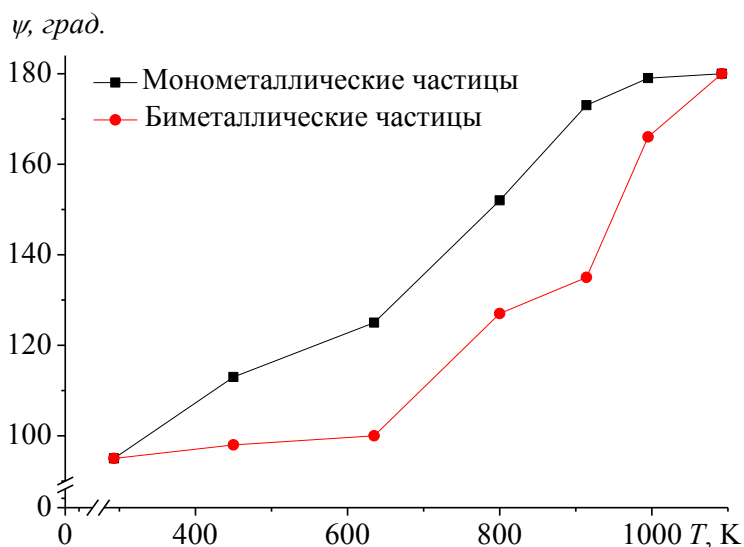


Рис. 1. Температурные зависимости двугранного угла для сферических монометаллических частиц $Ni_{3997} - Al_{3925}$ и биметаллических частиц $(Ni - Al)_{3961} - (Ni - Al)_{3961}$.

4. Заключение

В рамках данной работы было проведено моделирование процесса коалесценции наночастиц двумя альтернативными методами. Можно утверждать, что процессы коалесценции моно- и биметаллических наночастиц и процессы атомной диффузии на их поверхности существенно отличаются друг от друга. Различия в температуре коалесценции и в конечной структуре полученной наночастицы могут быть существенны. При этом будут различаться и такие характеристики моделируемой системы, как площадь контакта, форма манжеты, двугранный угол между наночастицами. В этой связи становится нетривиальной задачей прогнозирование поведения биметаллической системы, на основе результатов моделирования монометаллической системы, состоящей из тех же металлов. Нами наблюдаются определенные различия при сравнительном анализе результатов, полученных с помощью МК и МД методов, в частности, для МК результатов фиксируемая температура коалесценции ощутимо выше, но и при этом структура частиц более упорядочена.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 17-53-04010 Бел мол а, № 18-38-00571 мол а, № 18-03-00132 а) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X17PM-032).

Библиографический список:

1. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований; под ред. М.К. Роко, Р.С. Уильямса, П. Аливисатоса. – М.: Мир, 2002. – 292 с.
2. **Grammatikopoulos, P.** Simple analytical model of nanocluster coalescence for porous thin film design / P. Grammatikopoulos, E. Toulkeridou, K. Nordlund, M. Sowwan // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. – 2015. – V. 23. – I. 1. – P. 015008-1-015008-15.
3. **Jose-Yacaman, M.** Surface diffusion and coalescence of mobile metal nanoparticles / M. Jose-Yacaman, C. Gutierrez-Wing, M. Miki, et al. // *Journal of Physical Chemistry B*. – 2005. – V. 109. – I. 19. – P. 9703-9711.
4. **Arcidiacono, N.R.** On the coalescence of gold nanoparticles / N.R. Arcidiacono, S. Bieri, D. Poulikakos, C.P. Grigoropoulos // *Science direct International Journal of Multiphase Flow*. – 2004. – V. 30. – I. 7-8. – P. 979-994.
5. **Paz Borbón, L.O.** Computational studies of transition metal nanoalloys / L.O. Paz Borbón // *Doctoral Thesis accepted by University of Birmingham, United Kingdom*. – Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, 2011. – 155 с.
6. **Gupta, R.P.** Lattice relaxation at a metal surface / R.P. Gupta // *Physical Review B*. – 1981. – V. 23. – I. 12. – P. 6265-6270.
7. **Cleri, F.** Tight-binding potentials for transition metals and alloys / F. Cleri, V. Rosato // *Physical Review B*. – 1993. – V. 48. – I. 1. – P. 22-33.
8. Свидетельство № 2017615289 Российская Федерация. Программа моделирования термодинамических характеристик сложных наносистем: свидетельство о государственной регистрации для ЭВМ / Н.Ю. Сдобняков, Д.Н. Соколов, П.В. Комаров, А.Ю. Колосов; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет». – № 2017612145; заявл. 16.03.2017; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11.05.2017. – 1 с.
9. Свидетельство № 2011615692 Российская Федерация. Молекулярнодинамическое моделирование и биоинспирированная оптимизация бинарных и тройных металлических наноструктур (КластерЭволюшн): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / В.С. Мясниченко; заявитель и правообладатель заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2011613732; заявл. 23.05.2011; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ. 20.06.2011. – 1 с.
10. Колосов, А.Ю. Об оценке двугранного угла между наночастицами металлов в процессе коалесценции / А.Ю. Колосов, Д.Н. Соколов, Н.Ю. Сдобняков и др. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2016. – Вып. 8. – С. 172-179.

References:

1. Nanotekhnologiya v blizhajshem desyatiletii. Prognoz napravleniya issledovaniy; pod red. M.K. Roko, R.S. Uilyamsa, P. Alivisatosa. – М.: Mir, 2002. – 292 p.
2. **Grammatikopoulos, P.** Simple analytical model of nanocluster coalescence for porous thin film design / P. Grammatikopoulos, E. Toulkeridou, K. Nordlund, M. Sowwan // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. – 2015. – V. 23. – I. 1.

– P. 015008-1-015008-15.

3. **Jose-Yacaman, M.** Surface diffusion and coalescence of mobile metal nanoparticles / M. Jose-Yacaman, C. Gutierrez-Wing, M. Miki, et al. // *Journal of Physical Chemistry B*. – 2005. – V. 109. – I. 19. – P. 9703-9711.

4. **Arcidiacono, N.R.** On the coalescence of gold nanoparticles / N.R. Arcidiacono, S. Bieri, D. Poulikakos, C.P. Grigoropoulos // *Science direct International Journal of Multiphase Flow*. – 2004. – V. 30. – I. 7-8. – P. 979-994.

5. **Paz Borbón, L.O.** Computational studies of transition metal nanoalloys / L.O. Paz Borbón // *Doctoral Thesis accepted by University of Birmingham, United Kingdom*. – Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, 2011. – 155 c.

6. **Gupta, R.P.** Lattice relaxation at a metal surface / R.P. Gupta // *Physical Review B*. – 1981. – V. 23. – I. 12. – P. 6265-6270.

7. **Cleri, F.** Tight-binding potentials for transition metals and alloys / F. Cleri, V. Rosato // *Physical Review B*. – 1993. – V. 48. – I. 1. – P. 22-33.

8. Svidetel'stvo № 2017615289 Rossijskaya Federaciya. Programma modelirovaniya termodinamicheskikh karakteristik slozhnykh nanosistem: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii dlya EVM / N.Yu. Sdobnyakov, D.N. Sokolov, P.V. Komarov, A.Yu. Kolosov; zayavitel' i pravoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Tverskoj gosudarstvennyj universitet». – № 2017612145; zayavl. 16.03.2017; zaregistrirovano v reestre programm dlya EVM 11.05.2017. – 1 p.

9. Svidetel'stvo № 2011615692 Rossijskaya Federaciya. Molekulyarnodinamicheskoe modelirovanie i bioinspirirovannaya optimizaciya binarnykh i trojnykh metallicheskih nanostruktur (KlasterEvoljushn): svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM / V.S. Myasnichenko; zayavitel' i pravoobladatel' zayavitel' i pravoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Altajskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. I.I. Polzunova». – № 2011613732; zayavl. 23.05.2011; zaregistrirovano v reestre programm dlya EVM. 20.06.2011. – 1 p.

10. **Kolosov, A.Yu.** Ob ocenke dvugrannogo ugla mezhdru nanochasticami metallov v processe koalescencii / A.Yu. Kolosov, D.N. Sokolov, N.Yu. Sdobnyakov i dr. // *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*. – 2016. – I. 8. – P. 172-179.

ON THE REGULARITIES OF FORMATION OF MONO- AND BIMETALLIC NANOPARTICLES IN THE COALESCENCE PROCESS

A.Yu. Kolosov¹, V.S. Myasnichenko¹, S.S. Bogdanov¹, V.I. Romanovskiy^{2,3}, N.I. Nepsha¹,
K.R. Shcherbatykh¹, N.Yu. Sdobnyakov¹

¹*Tver State University*

²*Scientific Investigation Center «Structural Ceramic Nanomaterials»,
National University of Science and Technology «MISIS»*

³*Belarusian State Technological University*

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.359

Annotation: The simulation was carried out using two alternative Monte Carlo and molecular dynamics methods of the coalescence process with gradual thermal action for metallic nanoparticles based on nickel, aluminum, copper, silver and gold. The following types of mono- and bimetallic systems were considered: in the form of a sphere and in the form of two perpendicular blocks. It is established that the evolution of the coalescence process for monometallic nanoparticles differs

significantly from that for bimetallic nanoparticles. Characteristics such as the coalescence temperature, the structure and shape of the neck, the dihedral angle between the nanoparticles can differ significantly. It is argued that it is impossible to accurately predict the behavior of a bimetallic system in the process of coalescence, knowing the evolution of the process of coalescence for monometallic systems consisting of the same metals.

Keywords: mono- and bimetallic nanoparticles, molecular dynamics, coalescence, Monte-Carlo method, molecular dynamics, dihedral angle.

Колосов Андрей Юрьевич – научный сотрудник кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Мясниченко Владимир Сергеевич – научный сотрудник кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Богданов Сергей Сергеевич – аспирант кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Романовский Валентин Иванович – к.т.н., старший преподаватель кафедры промышленной экологии УО «Белорусский государственный технологический университет», НИЦ «Конструкционные керамические наноматериалы», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Непша Никита Игоревич – студент магистратуры кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Щербатых Кристина Романовна – студентка 4 курса, кафедра общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Сдобняков Николай Юрьевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Andrey Yu. Kolosov – Researcher of the General Physics Department, Tver State University

Vladimir S. Myasnichenko – Researcher of the General Physics Department, Tver State University

Sergey S. Bogdanov – postgraduate student of the General Physics Department, Tver State University

Valentin I. Romanovskiy – Ph. D., Senior Lecturer of the Department of Industrial Ecology, Belarusian State Technological University, Scientific Investigation Center «Structural Ceramic Nanomaterials», National University of Science and Technology «MISIS»

Nikita I. Nepsha – Master's Degree student of the General Physics Department, Tver State University

Kristina R. Shcherbatykh – 4th year student, General Physics Department, Tver State University

Nickolay Yu. Sdobnyakov – Ph. D., Docent of the General Physics Department, Tver State University