

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ КАК СТРУКТУРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОКСИДОВ

**Н. В. Молчан, НПЦ «Фармзащита», Московская обл., г. Химки;
В. И. Фертиков, Всероссийский институт легких сплавов, Москва**

Ключевые слова: концентрация электронов, плотность, энтальпия, оксиды, структура
Key words: concentration of electrons, density, enthalpy, oxides, structure

Неорганические материалы, применяемые при изготовлении промышленных силикатных изделий, подвергаются воздействиям, в результате которых они теряют свои индивидуальные свойства, приобретая новые эксплуатационные характеристики, необходимые потребителю. Примером могут служить стекольные расплавы, керамика, огнеупоры, цементы, шлаки. Эти силикатные материалы состоят в основном из оксидов, иногда карбидов и нитридов. Для понимания химических изменений, происходящих во время технологического процесса, необходимо сравнить индивидуальные характеристики веществ до взаимодействия и после окончания процесса. Так, суммарный объем глины и воды после взаимодействия не равен сумме исходных объемов этих двух компонентов. Плотность вещества при переходе из аморфного состояния в кристаллическое возрастает. Мелкозернистое строение сплавов после отжига становится крупнозернистым; при этом происходит увеличение плотности материала. Изменение структуры вещества без изменения химического состава всегда сопровождается изменением взаимодействия электронов в веществе [1, 2].

Цель настоящей работы – установить возможность использования концентрации электронов, определяемой в моль/см³, в качестве величины, позволяющей оценить структуру материала. Указанная цель достигалась путем выявления зависимостей рассчитанной концентрации электронов в рядах однотипных по строению оксидов с энтальпией ($-\Delta H_{298}^{\circ}$, кДж/моль) и коэффициентом уплотнения ($K_{упл}$, %) [3–6].

Плотность вещества обусловлена атомной массой и приближенностью атомов друг к другу. Если рассматривать все вещества в твердом состоянии (ниже их температуры плавления), то появляется возможность сопоставлять полученные результаты. В работах [5, 6] представлена формула для определения концентрации электронов элементных веществ на основании справочных данных [7–9] об их плотности в конденсированном состоянии:

$$C_{\text{электр}} = \frac{d}{M} Z, \quad (1)$$

где $C_{\text{электр}}$ – концентрация электронов в единице объема, моль/см³; d – плотность вещества в конденсированном состоянии, г/см³; M – молярная масса, г/моль; Z – порядковый номер элемента в таблице Д. И. Менделеева.

Результаты вычисления $C_{\text{электр}}$ для элементных веществ приведены на рис. 1.

С использованием упомянутых выше справочных данных о плотности были вычислены также радиусы атомов по формуле

$$R_a = \sqrt[3]{\frac{M}{4/3 \pi N_A}}, \quad (2)$$

где N_A – число Авогадро.

Результаты вычислений по формуле (2) представлены на рис. 2 [5, 6].

Для химических соединений концентрация электронов определяется по формуле

$$C_{\text{электр}} = \frac{\text{Количество электронов в соединении (в одном моле)}}{\text{Объем моля соединения}}. \quad (3)$$

Например, соединение CaSO_4 содержит 68 молей электронов в одном моле вещества ($20 + 16 + 8 \times 4$), молярная масса 136,14 г, плотность 2,983 г/см³, объем соответственно $136,14/2,983 = 45,64$ см³. Концентрация электронов $68/45,64 = 1,490$ моль/см³. Аналогично были вычислены концентрации электронов для ряда бинарных соединений: SiC –

1,583 моль/см³, Al₄C₃ – 1,450 моль/см³, CaC₂ – 1,101 моль/см³, Mg₂C₃ – 1,107 моль/см³, AlN – 1,597 моль/см³, Ca₃N₂ – 1,308 моль/см³, Mg₃N₂ – 1,343 моль/см³.

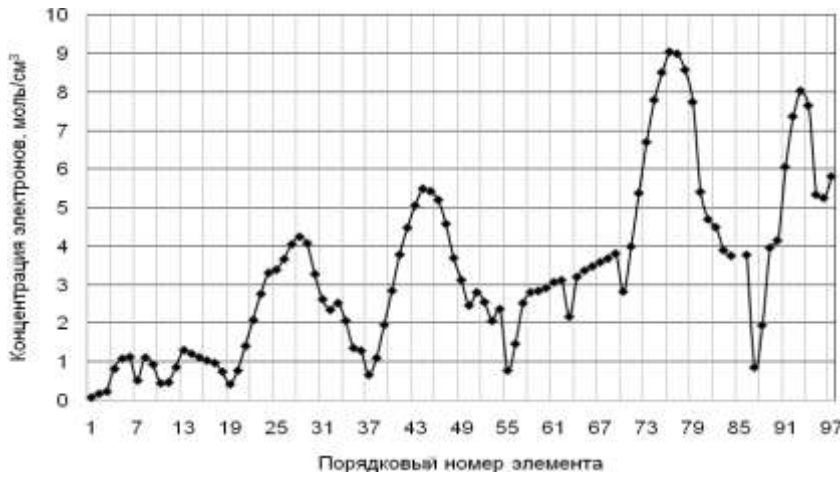


Рис. 1. Концентрация электронов для элементарных веществ

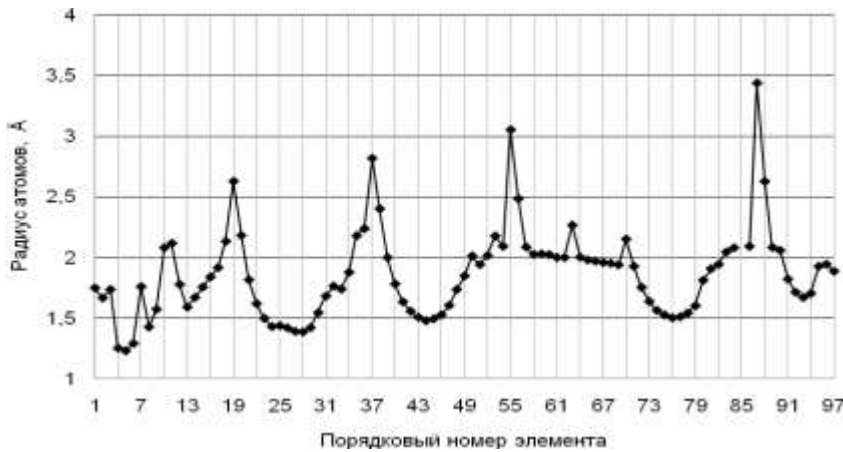


Рис. 2. Радиусы атомов элементов

Таким образом, соединение типа A_aB_b имеет концентрацию электронов

$$C_{\text{электр}} \approx \frac{aZ_A + bZ_B}{M/d}, \quad (3a)$$

а соединение типа $A_aB_bC_c$ –

$$C_{\text{электр}} \approx \frac{aZ_A + bZ_B + cZ_C}{M/d}, \quad (3b)$$

где a – подстрочный индекс элемента A ; Z_A – порядковый номер элемента A ; b – подстрочный индекс элемента B ; Z_B – порядковый номер элемента B ; c – подстрочный индекс элемента C ; Z_C – порядковый номер элемента C .

Технологические процессы влекут за собой изменения в веществах, которые можно оценить с термодинамических позиций. Так, стандартная энтальпия ΔH_{298}^p (кДж/моль) характеризует тепловой эффект реакции. Было выдвинуто предположение о том, что существует взаимосвязь энтальпии с концентрацией электронов в соединении и в исходном веществе (элементе, образующем соединение).

Из справочника [10] были выбраны группы однотипных по структуре оксидов Me_2O , MeO , Me_2O_3 и проведено сопоставление величины энтальпии с рассчитанной концентрацией электронов. Концентрацию электронов в исходном металле, образующем оксид, вычисляли по формуле (1), а концентрацию электронов в оксиде – по формуле (3). Кроме того, для всех выбранных оксидов были рассчитаны коэффициенты уплотнения ($K_{\text{упл}}$) по формуле (4) [3]:

$$K_{\text{упл}} = \left(\frac{\sum V_{\text{компон}} - V_{\text{прод}}}{V_{\text{прод}}} \right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $V_{\text{компон}}$ – молярный объем компонента (элемента) в конденсированном состоянии, см³/моль; $V_{\text{прод}}$ – молярный объем продукта (соединения) в конденсированном состоянии, см³/моль.

Величина $K_{\text{упл}}$ представляет собой выраженное в процентах изменение общего объема исходных элементарных веществ по сравнению с объемом соединения. Коэффициент уплотнения позволяет характеризовать любое соединение как продукт, полученный в результате либо разрыхления, либо уплотнения электронных оболочек при взаимодействии составляющих его элементов.

Результаты вычислений содержатся в табл. 1–4.

Таблица 1

Взаимосвязь энтальпии с концентрацией электронов в металле и оксиде типа Me_2O , а также с коэффициентом уплотнения

Оксид	$-\Delta H_{298}^{\circ}$, кДж/моль	Концентрация электронов, моль/см ³		Коэффициент уплотнения, %
		в оксиде	в металле	
Li_2O	599	0,95	0,23	123
Na_2O	418	1,15	0,47	100
K_2O	363	1,13	0,42	141
Rb_2O	337	1,63	0,66	136
Cs_2O	320	1,83	0,77	131
Cu_2O	171	2,72	4,07	-8,8
Ag_2O	31	3,15	4,58	-14,4

Таблица 2

Взаимосвязь энтальпии с концентрацией электронов в металле и оксиде типа MeO , а также с коэффициентом уплотнения

Оксид	$-\Delta H_{298}^{\circ}$, кДж/моль	Концентрация электронов, моль/см ³		Коэффициент уплотнения, %
		в оксиде	в металле	
CaO	637	1,69	0,77	99
BeO	607	1,45	0,82	45
SrO	604	2,08	1,1	90
MgO	601	1,77	0,86	87
BaO	538	2,39	1,47	69
RaO	523	–	1,95	–
TiO	519	2,31	2,09	37
TcO	433	–	5,05	–
VO	432	2,67	2,76	34
NbO	415	3,27	3,78	20
MnO	385	2,41	3,39	9
ZnO	353	2,66	3,28	14
SnO	286	2,78	2,46	32
FeO	271	2,72	3,66	14
CdO	258	3,54	3,69	-9
NiO	240	3,6	4,05	38
GeO	237	1,99	2,35	4
CoO	239	0,79	4,05	24
PbO	218	3,8	4,49	8
CuO	156	3,03	4,07	16
PdO	119	3,83	5,2	11
HgO	90	4,54	5,41	12

Коэффициент корреляции между энтальпией и концентрацией электронов в металле, образующем оксид типа Me_2O (см. табл. 1), равен -0,881. Критический коэффициент корреляции для такой выборки при доверительной вероятности 0,995 составляет 0,875 [11]. Таким образом, можно считать, что энтальпия находится в обратной зависимости от концентрации электронов в металле, образующем оксид: чем меньше концентрация электронов в исходном металле, тем выше энтальпия образования для системы Me_2O .

Коэффициент корреляции между энтальпией и концентрацией электронов в металле, образующем оксид типа MeO (см. табл. 2), составляет -0,842. Критический коэффициент корреляции для такой выборки при доверительной вероятности 0,9995 равен 0,652. В этом случае также наблюдается указанная зависимость: чем меньше концентрация электронов в исходном металле, тем выше энтальпия образования для системы MeO .

Взаимосвязь энтальпии с концентрацией электронов в металле и оксиде типа Me_2O_3 , а также с коэффициентом уплотнения

Оксид	$-\Delta H_{298}^{\circ}$, кДж/моль	Концентрация электронов, моль/см ³		Коэффициент уплотнения, %
		в оксиде	в металле	
Ac ₂ O ₃	2047	3,7	3,96	33
Sc ₂ O ₃	1909	1,85	1,41	44
Y ₂ O ₃	1905	2,19	1,96	32
Er ₂ O ₃	1898	3,61	3,68	32
Tm ₂ O ₃	1888	3,78	3,81	32
Ho ₂ O ₃	1881	3,44	3,58	30
Lu ₂ O ₃	1878	3,93	3,99	36
Dy ₂ O ₃	1866	3,41	3,47	25
Tb ₂ O ₃	1865	3,16	3,37	29
Sm ₂ O ₃	1835	3,54	3,12	47
Pr ₂ O ₃	1833	3	2,84	36
Gd ₂ O ₃	1816	3,19	3,2	26
Yb ₂ O ₃	1815	4,16	2,82	66
Nd ₂ O ₃	1808	3,14	2,91	35
Ce ₂ O ₃	1801	2,93	2,8	34
La ₂ O ₃	1793	3,19	2,52	34
Am ₂ O ₃	1761	4,24	5,34	13
Al ₂ O ₃	1675	1,95	1,3	62
Eu ₂ O ₃	1638	2,79	2,17	68
Ti ₂ O ₃	1521	2,15	2,09	33
B ₂ O ₃	1272	1,2	1,08	-18
V ₂ O ₃	1218	2,27	2,76	24
Cr ₂ O ₃	1141	2,47	3,31	24
Ga ₂ O ₃	1104	2,7	2,62	57
Mn ₂ O ₃	958	2,11	3,39	4
In ₂ O ₃	924	3,17	3,12	37
Fe ₂ O ₃	824	2,49	3,66	18
Sb ₂ O ₃	721	2,45	2,62	14
As ₂ O ₃	666	1,76	2,52	-15
Bi ₂ O ₃	575	3,63	3,9	22
Tl ₂ O ₃	411	4,12	4,7	22
Rh ₂ O ₃	356	3,75	5,42	24
Au ₂ O ₃	3	4,36	7,74	8

Коэффициент корреляции между энтальпией и концентрацией электронов в металле, образующем оксид типа Me_2O_3 (см. табл. 3), равен -0,445. Критический коэффициент корреляции для такой выборки при доверительной вероятности 0,995 составляет 0,442, а при доверительной вероятности 0,975 – 0,349. Таким образом, в данном случае, хотя и с меньшей вероятностью, все же прослеживается та же зависимость: чем меньше концентрация электронов в исходном металле, тем выше энтальпия образования для системы Me_2O_3 .

Иными словами, чем выше концентрация электронов в исходном металле, тем меньше энергии высвобождается при образовании соответствующего оксида.

Коэффициент корреляции между концентрацией электронов в оксиде и концентрацией электронов в металле, образующем оксид типа Me_2O_3 (см. табл. 3), равен 0,769. Критический коэффициент корреляции для такой выборки при доверительной вероятности 0,9995 составляет 0,547.

Необходимо отметить, что при различной концентрации электронов в веществах, вступающих в реакцию, статистическая концентрация электронов в конечном продукте будет формироваться путем перераспределения электронов из большей концентрации в меньшую с образованием нового объема и, как следствие, новой плотности соединения.

В качестве примера может быть предложена сравнительная таблица концентраций электронов и коэффициентов уплотнения в однотипных по способу образования двойных оксидах (см. табл. 4). Величина коэффициента уплотнения со знаком «+» свидетельствует о том, что образование соединения происходило со сжатием электронных оболочек исходных компонентов, а величина коэффициента уплотнения со знаком «-» указывает на обратный

процесс – разрыхление электронных оболочек. При этом чем больше концентрация электронов в полученном соединении, тем выше плотность данного продукта.

Т а б л и ц а 4

**Концентрация электронов и коэффициент уплотнения в двойных оксидах
(кристаллическое состояние)**

Оксид	Концентрация электронов, моль/см ³	Коэффициент уплотнения, %
2Na ₂ O·SiO ₂ (ортосиликат натрия)	1,307	+12,0
Na ₂ O·SiO ₂ (метасиликат натрия)	1,320	+9,6
Na ₂ O·2SiO ₂ (дисиликат натрия)	1,269	+1,6
MgO·SiO ₂ (клиноэнстатит)	1,849	+25,2
CaO·TiO ₂ (перовскит)	2,046	+38,5
2MgO·2SiO ₂ (энстатит)	1,994	+1,1
2MgO·SiO ₂	1,650	+6,5
MgO·Al ₂ O ₃ (шпинель)	1,757	-7,2
Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ (кианит)	1,783	+7,5
Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ (андалузит)	1,515	-8,7
Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ (силлиманит)	1,577	-5,0
Mg ₂ B ₂ O ₅	1,427	+16,7
Mg ₃ B ₂ O ₆	1,393	+16,1
MgB ₄ O ₇	1,273	+22,8
Ca(OH) ₂	1,122	-4,6
Mg(OH) ₂	1,246	+11,5
Al(OH) ₃ (гиббсит)	1,246	+22,8
CaCO ₃ (кальцит)	1,363	+18,5
MgCO ₃ (магнезит)	1,496	+35,5
CaSO ₄ (ангидрит)	1,490	+12,4
MgSO ₄	1,463	+11,8
NaOH	1,011	+33,4
Na ₂ (SO ₄)	1,315	+16,2
Na ₂ CO ₃	1,099	+14,2
CaO·SiO ₂ (волластонит)	1,454	-1,5
3CaO·2SiO ₂	1,474	-2,4
2CaO·SiO ₂	1,598	+4,1
3CaO·SiO ₂	1,575	+0,6
3CaO·Al ₂ O ₃	1,502	-14,9
5CaO·3Al ₂ O ₃	1,504	-16,6
2CaO·Fe ₂ O ₃	1,965	-5,0
Fe ₂ SiO ₄ (фаялит)	1,747	+13,1

Переходя к поиску причин, обуславливающих различия в свойствах материалов, необходимо рассмотреть общую концепцию взаимосвязи состав – структура – свойства. Свойства веществ и материалов зависят от химического состава и взаимного расположения химических элементов (структуры). Структура материала может быть представлена в виде иерархической последовательности подструктур; самая грубая стадия – макроструктура, основа всего – электронная структура.

Термин «структура» может быть определен в различных масштабах, начиная с субатомарного (как, например, при рассмотрении электрических и магнитных свойств), атомарного (при рассмотрении кристаллических материалов), молекулярного (при рассмотрении полимеров) и заканчивая микроскопическими и макроскопическими масштабами [1].

Для оценки свойств анализируемого объекта следует учитывать все структурные параметры, в том числе на уровне межатомного взаимодействия, поскольку свойства материалов и, соответственно, их структура являются функцией химического состава и внутренней энергии системы. При тождественности структур и химических составов материалы будут обладать одним и тем же набором технологических и эксплуатационных свойств. При одинаковом химическом составе различия в свойствах материалов определяются различиями их структур, изменение которых происходит за счет изменения энергосодержания системы.

Отделение или перемещение одних частей испытуемого образца относительно других частей этого образца связано с внутренним строением объекта испытаний. Все тела состоят из атомов, ядра в которых на пять порядков мельче размеров атома. Таким образом, преодолевается взаимодействие электронных сред, принадлежащих разным структурным группировкам. Справочные данные, собранные в результате физических испытаний веществ, характеризуют взаимодействие электронных сред.

Предложенная величина концентрации электронов ($C_{\text{электр}}$) вещества в конденсированном состоянии, вычисляемая по формулам (1) и (3), характеризует различия в строении электронной среды, которая в свою очередь определяет процессы, происходящие при деформирующих воздействиях и химических реакциях [12].

Необходимо отметить, что на рис. 1 пиковые значения концентрации электронов имеют никель, рутений, осмий и нептуний, а минимумы принадлежат калию, рубидию, цезию и францию. Наличие периодической зависимости при возрастании номера химического элемента позволяет сделать вывод о корректности выполненных вычислений.

Величина концентрации электронов для твердых состояний элементных веществ колеблется в пределах от 0,075 моль/см³ для водорода до 9,037 моль/см³ для осмия. Концентрация электронов любых химических соединений в конденсированном состоянии не выходит за эти пределы.

Наличие взаимосвязи величины $C_{\text{электр}}$ (моль/см³) с энтальпией образования оксидов позволяет использовать предложенную величину в качестве показателя, характеризующего структуру материала, изменения которого приводят к изменению свойств материала.

Выводы

1. Предложено использовать величину концентрации электронов элемента или соединения, определяемую в моль/см³, как структурную характеристику материала.
2. На основании справочных данных о плотности элементных веществ в конденсированном состоянии вычислены радиусы атомов элементов.
3. Установлена корреляция между энтальпией образования оксидов одно-, двух- и трехвалентных металлов с концентрацией электронов в исходном металле.
4. Для оценки интенсивности взаимодействия исходных компонентов при образовании соединения предложено использовать коэффициент уплотнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краткая энциклопедия по структуре материалов / пер. с англ.; под ред. Д. В. Мартина. – М.: Техносфера, 2011. – 608 с.
2. Сироткин О. С. Основы инновационного материаловедения. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 158 с.
3. Молчан Н. В., Фертиков В. И. Плотность веществ как результат взаимодействия их составляющих // Технология легких сплавов. – 2009. – № 1. – С. 22–29.
4. Молчан Н. В., Фертиков В. И. Метод оценки реакционной способности водорода, бора, углерода и азота // Технология легких сплавов. – 2009. – № 2. – С. 47–56.
5. Молчан Н. В., Фертиков В. И. Сжимаемость веществ и размеры атомов // Материаловедение. – 2011. – № 6. – С. 2–6.
6. Molchan N. V., Fertikov V. I. Determination of Concentration of Electrons for Description of the Structure of Materials, with Sulfides as an Example // Journal of Materials Sciences and Applications. – 2015. – Vol. 1, № 2. – P. 38–44.
7. International Centre for Diffraction Data. JCPDS PCPDFWIN. – 2002. – V. 2.03.
8. Новый справочник химика и технолога. Основные свойства неорганических, органических и элементоорганических соединений. – СПб.: Профессионал, 2007. – 1276 с.
9. Физические величины: справочник / А. П. Бабищев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский [и др.]; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
10. Лидин Р. А., Андреева Л. Л., Молочко Л. Л. Константы неорганических веществ: справочник / под ред. Р. А. Лидина. – М.: Дрофа, 2006. – 685 с.
11. Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистике / пер. с нем. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 278 с.
12. Молчан Н. В., Фертиков В. И. Концентрация электронов и механические свойства веществ // Материалы конференции «ТестМат-2013». – М.: ВИАМ, 2013. – С. 9.

REFERENCES

1. *Kratkaya entsiklopediya po strukture materialov* [Brief encyclopedia on the structure of materials]. Ed. by D. V. Martin. Moscow: Tekhnosfera, 2011, 608 p (in Russian).

2. Sirotkin O. S. *Osnovy innovatsionnogo materialovedeniya* [Fundamentals of materials innovation]. Moscow: INFRA-M, 2011, 158 p (in Russian).
3. Molchan N. V., Fertikov V. I. The density of substances as a result of the interaction of their constituents. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2009, no. 1, pp. 22–29 (in Russian).
4. Molchan N. V., Fertikov V. I. Method of evaluating the reactivity of hydrogen, boron, carbon and nitrogen. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2009, no. 2, pp. 47–56 (in Russian).
5. Molchan N. V., Fertikov V. I. Compressibility of substances and sizes of atoms. *Materialovedenie*, 2011, no. 6, pp. 2–6 (in Russian).
6. Molchan N. V., Fertikov V. I. Determination of Concentration of Electrons for Description of the Structure of Materials, with Sulfides as an Example. *Journal of Materials Sciences and Applications*, 2015, vol. 1, no. 2, pp. 38–44.
7. International Centre for Diffraction Data. *JCPDS PCPDFWIN*, 2002. V. 2.03.
8. *Novyy spravochik khimika i tekhnologa. Osnovnye svoystva neorganicheskikh, organicheskikh i elementoorganicheskikh coedineniy* [The new reference book for chemist and technologist. The basic properties of inorganic, organic and element organic compounds]. St.-Petersburg: Professional, 2007, 1276 p (in Russian).
9. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskiy A. M., et al. *Fizicheskie velichiny: spravochnik* [Physical quantities: reference book]. Ed. by I. S. Grigor'ev, E. Z. Meylikhov. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 1232 p (in Russian).
10. Lidin R. A., Andreeva L. L., Molochko L. L. *Konstanty neorganicheskikh veshchestv: spravochnik* [Constants of inorganic substances: reference book]. Ed. by R. A. Lidin. Moscow: Drofa, 2006, 685 p (in Russian).
11. Myuller P., Noyman P., Shtorm R. *Tablitsy po matematicheskoy statistike* [Tables in mathematical statistics]. Moscow: Finansy i statistika, 1982, 278 p (in Russian).
12. Molchan N. V., Fertikov V. I. Concentration of electrons and mechanical properties of substances. *Materialy konferentsii «TestMat-2013»*. Moscow: VIAM, 2013, p. 9 (in Russian).

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЕЗАГРЕГАЦИЮ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ

***С. А. Шахов, Е. В. Рогова, Сибирский государственный университет
путей сообщения, г. Новосибирск; У. К. Жапбасбаев, Казахстанско-
Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан***

Ключевые слова: порошок, ультрадисперсная добавка, агрегаты, дезагрегация, ультразвук, кавитация

Key words: powder, ultrafine additive, aggregates, disaggregation, ultrasound, cavitation

Одним из перспективных направлений развития материаловедения является регулирование структурообразования материала посредством введения синтезированных извне ультрадисперсных модификаторов. Номенклатура таких добавок постоянно расширяется [1–5], что обусловлено активным развитием приборной базы и накоплением знаний о синтезе вещества.

Выбор ультрадисперсной добавки и процесса, в результате которого формируется структура материала, определяется назначением конечного продукта и требованиями к его свойствам [6–8]. Однако с точки зрения практического применения есть два фактора, затрудняющих использование ультрадисперсных порошков в качестве модифицирующих добавок в технологической практике. Во-первых, ультрадисперсные порошки как искусственного, так и природного происхождения, как правило, консолидированы в достаточно плотные агрегаты. Во-вторых, независимо от типа связи традиционные методы дезагрегации, связанные с механическим воздействием, не эффективны по отношению к объектам такого класса. Если же разрушить агрегаты из ультрадисперсных частиц не удастся, то активирующее действие введенного компонента существенно снижается, так как не реализованным оказывается основное преимущество ультрадисперсного порошка – возможность образовывать значительное количество контактов при очень небольшом его содержании. Достигнуть улучшения качества конечного продукта за счет дезагрегации дисперсной фазы при получении композиционных материалов можно путем использования ультразвукового воздействия на дисперсные системы, позволяющего создавать мощную кавитацию. Под действием кавитации в локальном масштабе образуются интенсивные микропотоки жидкости и сильные локальные ударные волны, обеспечивающие увеличение температуры до 5000 К и давления до 100 МПа, что приводит к интенсификации массопереноса и существенному изменению параметров обрабатываемой среды [9]. К числу основных факторов, определяющих параметры кавитации, относится интенсивность ультразвука. Поскольку при недоста-