Министерство образования и науки
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 9

ТВЕРЬ 2017

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 об 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, 2017. – Вып. 9. – 592 с.

ISBN 978-5-7609-1275-6

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 978-5-7609-1275-6

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2017

© Тверской государственной
университет, 2017

УДК 669.71

КОМПОЗИЦИОННЫЙ ПРИПОЙ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ И ГАЛЛИЕВОГО СПЛАВА

В.М. Скачков, Н.А. Шевырев, Л.А. Пасечник, С.П. Яценко

ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»

620990, Россия, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91

vms@weburg.me

DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.455

Аннотация: В статье рассмотрены новые составы композиционных сплавов на основе галлия. Исследовано влияние состава порошкового наполнителя на структуру и свойства припоя для придания уникальных свойств и расширения областей использования. Изучены прочностные свойства, микроструктура, термическая стойкость полученных образцов.

Ключевые слова: *металлический порошок, композиционные диффузионно-твердеющие сплавы, припой, структура, свойства, микротвердость, дифференциально-термический анализ.*

Галлия в 2016 году в мире выпущено 730 тонн, в том числе за счет переработки отходов 270 тонн [1]. Этот металл получают в качестве побочного продукта при переработке бокситов на глинозем, где его содержание в руде составляет ~50 грамм на тонну [2]. При выщелачивании боксита галлий вместе с алюминием растворяется и накапливается в циркулирующих растворах глиноземного производства, среднее содержание галлия 0,2–0,5 г/дм³. Такая высокая концентрация позволяет его из этих растворов извлекать. Электролитическое осаждение галлия с носителем цинком было разработано в ИХТТ УрО РАН и внедрено на предприятии в г. Пин-Го (Китайская Народная Республика) и на ОАО «УАЗ-СУАЛ» в Свердловской области [3-7]. К сожалению, из-за споров собственников производство галлия на Урале прекращено.

Перспективной областью применения галлия является получение диффузионно-твердеющих композиционных припоев с порошками некоторых металлов, сплавов и инертных наполнителей. Такие составы в зависимости от используемых дисперсных систем обладают большим разнообразием физико-химических свойств и находят применение в технике соединения (склеивания) разнородных материалов, также в хирургической медицине и стоматологии. Применение композиционных диффузионно-твердеющих припоев (КДТП) позволяет в некоторых случаях более просто решать технические вопросы контактирования разнородных материалов, т.е. соединять не только металлические материалы, но и стекло, керамику, ситаллы, кварц, как между собой, так и с металлами, при этом не используются органические клеящие вещества. Получаемые низкотемпературной обработкой соединительные швы, в зависимости от состава, обладают высокими механическими свойствами и

регулируемыми коэффициентами термического расширения, устойчивы к вибрационным нагрузкам и могут использоваться в широком температурном диапазоне.

Свойства образующегося паяного шва не складываются аддитивно из характеристик жидкого (в частности галлия) и твердых ингредиентов. В большинстве случаев наблюдается экстремальное изменение свойств КДТП. Многое зависит от исходного качества жидкого сплава и наполнителей. Для жидкой компоненты КДТП определяющими являются температура плавления, капиллярное течение, смачиваемость паемого материала, способность к взаимной диффузии, инертность к кислороду воздуха, не токсичность. Металлический галлий плавится при температуре $29,72^{\circ}\text{C}$, а его полиморфные формы имеют отрицательные температуры плавления [8]. Жидкий чистый галлий легко переохлаждается и долго остается жидким при температурах ниже плавления. Легкоплавкие сплавы галлия с цинком, индием, оловом, серебром остаются жидкими при температурах ниже комнатной. Изучение фазового перехода плавление-кристаллизация в условиях ограниченного объема (в наноразмерных порах) для сплавов Ga-In показало возможность разделения областей плавления α - и β -модификаций галлия. Снижение температуры кристаллизации $\alpha\text{-Ga}$ до $\sim 260\text{ K}$ установлено при содержаниях 94–96% Ga . В системе с содержанием галлия 85 и 91% снижаются как температура начала плавления $\beta\text{-Ga}$ с 260 до $\sim 240\text{ K}$, так и окончания с 240 до $\leq 230\text{ K}$ [9].

Прочность контакта галлиевого припоя с подложкой определяется характером взаимодействия между ними. Общая энергия связи в системе складывается из химического (E_{ch}) и Ван-Дер-Ваальсового (E_{vdw}) взаимодействия. Оценка E_{vdw} проводится по количеству атомов вещества на 1 см^2 площади поверхности и потенциала дисперсионного взаимодействия между атомами с учетом поляризуемости, первых ионизационных потенциалов и расстояниями между атомами. Для кварца, стекла, оксидных материалов величина вклада E_{vdw} в энергию связи жидкий галлий – твердый оксид (кварц, например) не превышает 10^{-5} Дж/см^2 . Это значение в 3–5 раз ниже получаемых экспериментальных значений [10]. Следовательно, дополнительный вклад в энергию взаимодействия дает химическая составляющая E_{ch} , которая оценивается по изменению энергии Гиббса. В данном случае ее величина составляет около 200 эрг/см^2 и отвечает образованию между оксидной пленкой галлия и кварцем соединений типа шпинели.

Величина краевого угла смачивания галлием и его эвтектическими сплавами (Ga-In , Ga-Sn , Ga-In-Sn) материалов из кварца (SiO_2), оксидной

керамики (Al_2O_3) и графита (C) мало меняется при термообработке вплоть до $500^\circ C$ и выдержке в течение 1 часа. Его величина значительно превышает 90° и изменяется от 130° до 120° . Введение в галлий и его сплавы переходных металлов, например, титана и скандия, обладающих высоким сродством к кислороду и углероду, приводит к резкому улучшению смачивания подложек при высоких температурах. При температуре $1000^\circ C$ значения углов смачивания кварцевого стекла и графита сплавом $Ga-1\% Sc$ составляют 30° и 25° , а сплавом $Ga-1\% Ti$ – 60° и 30° , соответственно. Подтверждением химического взаимодействия галлий содержащих расплавов с подложкой является образование переходных слоев на межфазной границе, т.е. визуально наблюдаемое изменение рельефа поверхности подложки под каплей. Прочность сцепления жидких сплавов с подложками после термообработки составляет, $кг/мм^2$: Ga/SiO_2 – 1,5; сплав $Ga-In/SiO_2$ – 1,5; сплав $Ga-Sn/SiO_2$ – 1,6; сплав $Ga-In-Sn/SiO_2$ – 1,7; Ga/Al_2O_3 – 0,8; Ga/C – 0,2.

Затвердевание композиции на основе из галлиевых сплавов с порошками меди или сплавов $Cu-Sn$ происходит в основном с образованием среднетемпературных соединений. Анализ микроструктуры частиц свидетельствует, что на первоначальной стадии затвердевания композита $Ga+Cu$ вокруг частиц образуется тончайший слой 1–2 мкм фазы, состоящей из легкоплавкого сплава насыщенного медью. По мере увеличения продолжительности термообработки происходит нарастание слоя фазы богатой медью. При введении 60 % неактивированного медного порошка сферической формы (~ 40 мкм) толщина слоя при температуре $100^\circ C$ за 10 час увеличивается до 6–8 мкм. Повышение температуры термообработки до $200^\circ C$ приводит к образованию пористой структуры сплава. Пористость снижается при использовании порошков-наполнителей с повышенной активностью и реакционной способностью. Термообработка при $150^\circ C$ в течение 6 часов пасты, содержащей 55–65 % медного порошка сферической формы, приводит к полному взаимодействию между компонентами. Подготовленные навески сплава и порошков смешивают в плотно закрытой фторопластовой ампуле в течение 10–20 секунд в амальгаматоре. Полученная паста обладает хорошими технологическими параметрами, сохраняя пластичность в течение 20–30 минут. Продление «времени жизни» пасты до нескольких недель достигается заморозкой с последующим оттаиванием перед использованием. Для предупреждения расслаивания пасты в переохлажденном состоянии рекомендуется при смешивании компонентов введение в жидкий сплав соответствующего интерметаллического соединения (ИМС), например, Ga_4Cr [8, 11]. Переохлаждение некоторых галлиевых эвтектических сплавов до начала

кристаллизации в присутствии ~1% ИМС не превышает 2 °С. Изменение скорости охлаждения в пределах от 0,1° до 8° в минуту, не влияет на величину переохлаждения сплава перед кристаллизацией.

Для приготовления жидкого сплава навески чистых компонентов помещали в тигель и нагревали до температуры плавления наиболее тугоплавкого компонента с выдержкой 1–2 часа. Затем сплав охлаждали до температуры жидкой эвтектики и фильтровали через стеклянный пористый фильтр (100 мкм). Для сплава 70 % *Ga*–22,5 % *In*–7,5 % *Sn* с температурой кристаллизации <70 °С смесь компонентов нагревали до температуры ~100 °С. Составы других галлиевых КДТП с порошками *Cu* или *Cu*–10 % *Sn* (≤ 70 мкм) приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Составы галлиевых КДТП и их свойства

Условное обозначение КДТП	Содержание компонентов, мас.%					Прочность на срез, кг/мм ²	Усилие на отрыв с образца, кг/мм ²	Температура плавления исходного сплава, °С
	Жидкий сплав				Порошок <i>Cu</i>			
	<i>Ga</i>	<i>In</i>	<i>Sn</i>	<i>Ag</i>				
ГМ-60	40	-	-	-	60	5,0	2,5-3,0	29,7
ГМ-66	34	-	-	-	66*	6,0	2,5-3,0	29,7
ГИМ-65	30	5,0	-	-	65	5,2	2,5-2,8	15,7
ГОМ-58	29,4	-	12,6	-	58	4,6	2,5-3,0	20,5
ГИСМ-63	26,9	9,4	-	0,7	63	4,1	2,8-3,5	14,5
ГОСМ-55	28,5	-	15,5	1,0	55	4,6	3,0-3,5	20,0
ГОСМ-60	28,6	-	10,5	0,9	60*	5,1	3,5-4,4	20,0
ГИОМ	29,4	9,5	3,1	-	58	4,2	3,5-4,0	10,0

Примечание: Время смешения – 10 с, температура термообработки $T_{\text{т}}$ – 120 °С, время затвердевания ≥ 10 ч, прочность на отрыв нержавеющая сталь–нержавеющая сталь 1,1–1,3 кг/мм²

* использован порошок сферический медно-оловянный *Cu*–10 % *Sn*, ≤ 40 мкм

Для хорошей адгезии КДТП с поверхностью образца большое значение имеет подготовка поверхности и способ нанесения пасты. Для электрохимического галлирования поверхности образца можно использовать сернокислотный галлиевый или щелочной галлатный растворы. Сплав или электролитический галлий наносится тонким слоем. Для непроводящих материалов возможно создание покрытий при деструкции некоторых соединений из водных растворов или солевых расплавов, а также введение промежуточных проводящих электрический ток пластин между соединяемыми керамическими изделиями [12].

Введение в композит материалов, не взаимодействующих при выбранной температуре, требует обеспечения полного взаимодействия жидкой фазы матричного сплава с одновременно вводимым наполнителем

порошком Cu или $Cu-Sn$. Микроструктура композита после термообработки при варьировании содержания жидкой фазы $Ga-In-Sn$ в исходной пасте, состоящей из медно-оловянного порошка и галлий-индий-оловянного сплава, представлена на рисунке 1. Максимальные значения микротвердости композита достигаются при соотношении $Cu-Sn$ порошка к жидкому $Ga-In-Sn$ сплаву как 7:3, т.е. твердой компоненты должно содержаться в пасте 65–70 % (см. рис. 2).

Рис. 1. Микроструктура КДТП с порошком $Cu-10\% Sn$ при содержании жидкого сплава $Ga-In-Sn$: а – 25 %; б – 30 %; в – 40 %, увеличение $\times 500$.

Рис. 2. Изменение микротвердости (HV) КДТП от соотношения в исходной пасте сферического медно-оловянного порошка ($Cu-10\% Sn$, ≤ 40 мкм) к жидкому $Ga-In-Sn$ сплаву.

Способность КДТП к расширению при затвердевании определенным образом способствует более глубокому проникновению пасты в поры и трещины сочленяемых деталей изделия. С целью заделки дефектов в литье, закрепления стержней лазеров в обечайке, торцов кварцевых или стеклянных дисков в металлических рамках (пазах), соединения металлизированных плат с крышками (из кобальта, инвара, титана и др.) и т.п. требуется надежное уплотнение пастой соответствующих полостей размерами $\geq 0,2$ мм и глубиной ≥ 1 мм. В таких закрытых полостях необходимое давление возникает самостоятельно, а получаемые сочленения обладают хорошей герметичностью и прочностью. Так для

соединения твердотельных лазеров (рубин, спецстекла) достаточна ширина ободка всего в 2,0 мм. При соединении других материалов приходится исходить из их конструкционных особенностей, как, например, использовать приемы технологии пайки кварцевых изделий для волнового твердотельного гироскопа. Напылением металла на керамическую, кварцевую или другую непроводящую электрический ток поверхность образцов показано, что лучшими адгезионными свойствами обладает покрытие материалов хромом, по сравнению с напылением железом, никелем или медью.

Варьирование состава и структуры припоя вследствие появления новых геттерных фаз приводит к изменению механических свойств. На основе исходного КДТП, содержащего 30% жидкого сплава $Ga-In-Sn$ и 70% порошка $Cu-10\% Sn$, заменой части наполнителя порошками Ni, Hf, Zr и Nb были получены новые композиционные диффузионно-твердеющие сплавы (КДТС). Результаты измерения микротвердости полученных композиций в зависимости от состава приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Изменение микротвердости КДТС при введении порошковых металлических наполнителей

Добавка в КДТС	Введено, масс.%	Микротвердость, HV , ед.тв.	Добавка (50×50)	Введено, масс.%	Микротвердость, HV , ед.тв.
Ni стружка - 120 мкм	5	50	$Ni + Zr$ - 20 мкм	10	61
	10	57		20	33
	15	52	$Ni + Hf$	10	19
Ni порошок - 20 мкм	5	41	- 20 мкм	20	29
	10	38	$Zr + Hf$	10	68
	15	40	- 20 мкм	20	40
Zr стружка - 120 мкм	5	65	$Nb + Zr$ - 20 мкм	10	63
	10	65		20	69
	15	45	$Nb + Hf$	10	31
Zr порошок - 20 мкм	5	46	- 20 мкм	20	28
	10	52			
	15	55			
Hf порошок - 20 мкм	5	63			
	10	50			
	15	52			
Nb порошок - 20 мкм	5	32			
	10	21			
	15	40			

Как видно из Таблицы 2 наибольшую твердость имеют материалы с добавками 5–10 масс.%. На реакцию в системе твердое – жидкий сплав влияние оказывают дисперсность, форма и состояние

поверхности порошка, стабильность или метастабильность используемых сплавов и соединений, их концентрация, а также наличие дефектов кристаллической решетки порошка-наполнителя. Эффективным методом направленного изменения дефектности металлов и сплавов является метод механической активации, обеспечивающий генерацию неравновесных структур дефектов пластической деформации. Такая обработка позволяет существенно повысить реакционную способность и синтезировать новые фазы с высокой химической активностью [13].

Большое значение для некоторых изделий имеют не только герметичность соединения ($0,14 \text{ Па} \approx 10^{-5} \text{ торр}$), например, для шлифованных поверхностей стекла и кварца с коваром и между собой. КДТП могут явиться интенсивными источниками активных газовых компонентов, торр/см^2 : $0,064 \cdot H_2O$; $0,025 \cdot H_2$; $0,031 \cdot CO$; $0,023 \cdot CO_2$. Однако, газовыделение с открытой поверхности покрытия почти полностью прекращается после прогрева до 200°C [14]. Изучение газовыделения в вакууме двух идентичных образцов с покрытием и без него позволило рекомендовать составы КДТС с газовыделением не более $5 \cdot 10^{-9} \text{ л} \cdot \text{мм.рт.ст./с}$. При запайке камер малого размера приборов вакуумной микроэлектроники и оптической электротехники высокая герметичность и сорбционная эффективность геттерных пленок могут быть достигнуты при проведении температурной обработки в высоковакуумных установках в особо чистых помещениях [15].

Рис. 3. Дифференциально-термический анализ (Thermoscan-2) КДТП: красная линия — первичный нагрев, синяя линия — повторный нагрев.

Такие КДТС имеют высокую температуру распая, но при этом надо учитывать, что при повышении рабочей температуры выше 200°C в сплаве происходят экзотермические процессы (см. рис. 3, красная линия), связанные с фазообразованиями, которые не протекают при невысоких температурах обработки припоя. При повторном повышении температуры (см. рис. 3, синяя линия) термоэффектов уже не наблюдается.

Интенсивность, у.е.

Интенсивность, у.е.

Рис. 4. РФА исходного (верхний) и отожженного (нижний) КДТП (Shimadzu, излучение CuK_α , интервал углов $10^\circ \leq 2\Theta \leq 70^\circ$, шаг съемки $0,03^\circ$, время на точку 2 с. Идентификацию фаз по картотеке [16]).

Экзотермический эффект при температуре $\sim 210^\circ\text{C}$ указывает, что идет образование новых интерметаллических фаз и окисление некоторой

части металлов. Новые образовавшиеся ИМС (см. рис. 4) в составе КДТС придают последнему большую (~ в 2 раза) твердость, при этом увеличивается хрупкость. Количество фаз в результате высокотемпературной обработки снижается, идет упорядочение атомов металлов в кристаллических структурах, а окисленные фазы на стыках кристаллов повышают дефектность и газопроницаемость спая.

Большая часть составов диффузионно-твердеющих сплавов получена эмпирическим путем, и до сих пор нет полного понимания закономерностей взаимодействия находящихся в твердом состоянии металлов и жидкой составляющей припоя. Неизвестно, какое из интерметаллических соединений образуется первым, если, согласно равновесным диаграммам состояния, в системе освобождающихся элементов может существовать несколько интерметаллидов [17]. Жидкий галлий «растворяет» большинство металлов, образуя сплавы и интерметаллические соединения с довольно низкими механическими свойствами, именно поэтому соприкосновение с галлием приводит многие конструкционные материалы к потере прочности, но ИМС галлия с медью и оловом приобретают прочность и химическую стойкость.

Таким образом, в настоящее время разработано множество различных составов твердеющих паст, получаемых смешиванием жидких галлиевых сплавов, которые хорошо смачивают многие материалы и обладают высокой химической активностью, и мелкодисперсных порошков для придания припоям необходимых физико-химических свойств. Многолетние исследования по разработке составов и способов соединения конкретных деталей позволяют выдать рекомендации по выбору КДТП в зависимости от поверхности материалов, температуры работы с исходной пастой, коррозионной и механической стойкости конечных изделий для работы в условиях интенсивного облучения и повышенных температур и давлений. Важным моментом является возможное снижение механической прочности КДТС при введении наполнителей, что также необходимо учитывать при выборе состава.

Библиографический список:

1. Mineral commodity summaries 2017: U.S. Geological Survey. - Reston, Virginia, 2017. - 202 p.
2. **Скачков, В.М.** Извлечение галлия электролизом из щелочно-алюминатных растворов процесса Байера / В.М. Скачков, Г.М. Рубинштейн, В.Т. Суриков и др. // Химическая технология. - 2016. - Т.17. - № 3. - С. 110-117.
3. Пат. **106248 Российская Федерация, МПК C22B58/00.** Электролизер для извлечения галлия из щелочно-алюминатных растворов процесса Байера / Рубинштейн Г.М., Яценко С.П., Сабирзянов Н.А.; заявитель и патентообладатель Институт химии твердого тела УрО РАН. – № 2011108098/02; заявл. 02.03.11; опубл.

10.07.11, Бюл. № 19. – 2 с.

4. **Патент 147934 Российская Федерация, МПК C22B58/00.** Электролизер для извлечения галлия из щелочно-алюминатных растворов процесса Байера / Рубинштейн Г.М., Яценко С.П., Скачков В.М.; заявитель и патентообладатель Институт химии твердого тела УрО РАН. – № 2014127215/02; заявл. 03.07.14; опубл. 20.11.14, Бюл. № 32. – 2 с.

5. **Патент 2264481 Российская Федерация, МПК⁷ C25C1/22, C22B58/00.** Способ получения галлия из щелочно-алюминатных растворов глиноземного производства / Яценко С.П., Рубинштейн Г.М., Диев В.Н., Пасечник Л.А., Садовников В.Б.; заявитель и патентообладатель Институт химии твердого тела УрО РАН. – № 2004106896/02; заявл. 09.03.04; опубл. 20.11.05, Бюл. № 32. – 12 с.

6. **Патент 2553318 Российская Федерация, МПК C25C1/22, C22B58/00.** Способ получения галлия из щелочно-алюминатных растворов глиноземного производства / Рубинштейн Г.М., Яценко С.П., Скачков В.М., Лудская Л.П., Устич Е.П., Вайлерт А.В.; заявитель и патентообладатель Институт химии твердого тела УрО РАН. – № 2014107419/02; заявл. 26.02.14; опубл. 10.06.15, Бюл. № 16. – 10 с.

7. **Патент 2406693 Российская Федерация, МПК⁷ C22B58/00, C25C1/22, C25C7/00.** Способ получения галлия из щелочно-алюминатных растворов глиноземного производства и электролизер для его осуществления / Рубинштейн Г.М., Яценко С.П., Диев В.Н.; заявитель и патентообладатель Институт химии твердого тела УрО РАН. – № 97111637/02; заявл. 15.07.97; опубл. 10.03.99. – 2 с.

8. **Яценко, С.П.** Композиционные припои на основе легкоплавких сплавов / С.П. Яценко, В.Г. Хаяк. - Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 186 с.

9. **Латышева, Е.Н.** Полиморфизм сплавов *Ga–In* в условиях наноконфайнмента / Е.Н. Латышева, А.Л. Пирозерский, Е.В. Чарная и др. // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57. – Вып. 1. – С. 124-128.

10. **Найдичев, Ю.В.** Смачивание оксидных материалов расплавами на основе галлия / Ю.В. Найдичев, В.С. Журавлев, Ю.Н. Чувашев, М.Л. Куркина. В кн.: Адгезия расплавов. – Киев: Наукова Думка, 1974. – С. 73-77.

11. Способ получения порошка сплава на основе галлия: а. с. 446356 СССР : МКИ B22F9/00, B01J11/06, C22C31/00 / С.П. Яценко, В.И. Кононенко, Л.М. Скачкова, Р.П. Башук, А.В. Чесноков (СССР). – № 1832719/22-1; заявл. 02.10.72; опубл. 10.11.74, Бюл. № 38. – 2 с.

12. **Yatsenko, S.P.** Method of fluxless soldering of dissimilar materials / S.P. Yatsenko, V.M. Skachkov // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2011. – V. 84. – I. 11. – P. 2002-2004.

13. **Григорьева, Т.Ф.** Механохимический синтез в металлических системах / Т.Ф. Григорьева, А.П. Барикова, Н.З. Ляхов. - Новосибирск: Параллель, 2008. – 311 с.

14. **Яценко, С.П.** Диффузионно-твердеющие металлические композиции на основе легкоплавких сплавов и порошков металлов / С.П. Яценко, А.Н. Сабирзянов // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2006. – Вып. 2. – Ч. 1. – С. 173-174.

15. **Chuntonov, K.A.** Getter films for small vacuum chambers / K.A. Chuntonov, S.P. Yatsenko // Recent Patents on Materials Science. – 2013. – V. 6. – I. 1. – С. 29-39.

16. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47).

17. **Казаков, В.С.** Разработка галлиевых паст-припоев для низкотемпературной пайки медных и титановых сплавов с керамикой: автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06: защищена 14.11.07 / Казаков Владимир Сергеевич. – Красноярск: СФУ, 2007. – 24 с.