

УДК 621.793.3:621.922

UDC 621.793.3:621.922

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ВЛИЯНИЕ ТУГОПЛАВКИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕСС КОМПОЗИЦИОННОЙ ПАЙКИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ****INFLUENCE OF REFRACTORY FILLERS ON THE PROCESS OF COMPOSITE BRAZING OF DIAMOND-ABRASIVE TOOLS**

Козаченко Алексей Дмитриевич  
ОАО «НК»Роснефть»–НТЦ», Россия, 350063, г. Краснодар, ул. Мира, 36, alex58r240@gmail.com

Kozachenko Alexey Dmitriyevich  
“NC “Rosneft” – Research-and-Technical Centre”,  
Russia, 350063, Krasnodar, Mira st. 36,  
alex58r240@gmail.com

Соколов Евгений Георгиевич  
канд. техн. наук, доцент  
РИНЦ SPIN-код= 2578-3895  
Кубанский государственный технологический университет, Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, e\_sokolov.07@mail.ru

Sokolov Evgeniy Georgiyevich  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
RSCI SPIN code 2578-3895  
Kuban State Technological University, Russia,  
350072, Krasnodar, Moskovskaya st. 2,  
e\_sokolov.07@mail.ru

Для пайки абразивных алмазных инструментов с рабочими поверхностями сложной фасонной формы необходимо использовать припой с повышенной вязкостью. Известно, что высокой вязкостью обладают композиционные припои, состоящие из легкоплавкой матрицы и тугоплавкого наполнителя, не расплавляющегося при пайке. Цель работы – установить влияние тугоплавких наполнителей на процесс композиционной пайки алмазно-абразивных инструментов и на этой основе определить оптимальный состав припоя. В работе исследовали композиционные припои Sn-Cu-Co. Установлено, что для придания припою Sn-Cu-Co необходимой вязкости и получения равномерных алмазосодержащих слоев толщиной до 2,5 мм на вертикальных поверхностях и острых кромках инструмента в припой следует вводить не менее 26...28 % (масс.) кобальтового порошка. Установлено, что твердофазное спекание порошков на начальном этапе нагрева композиционного припоя приводит к возникновению в нем внутренних напряжений и образованию трещин. Для предотвращения растрескивания в припой следует вводить инертные добавки, препятствующие твердофазному спеканию. Оптимальной инертной добавкой для припоев Sn-Cu-Co является порошок вольфрама. Минимальное содержание вольфрама, необходимое для предотвращения растрескивания составляет 6 % (масс.). Оптимальное содержание компонентов в композиционном припое для пайки фасонных алмазно-абразивных инструментов составляет, (% масс.): 30 Co, 20 Sn, 43 Cu, 7 W

Brazes with increased viscosity are needed for brazing of abrasive diamond tools with working surface of complex contoured shape. It's known that high viscosity is a property of composite brazes consisting of fusible matrix and refractory filler that is not melting during brazing. Goal of the work is to research the influence of refractory fillers on the process of composite brazing of diamond-abrasive tools and on that basis discover the optimal composition of braze. Composite brazes Sn-Cu-Co were researched in the work. It is determined that at least 26-28% (by mass) of cobalt powder should be included in brazes for giving the braze Sn-Cu-Co necessary viscosity and for creation of uniform diamond-comprising layers with thickness up to 2.5 mm on the vertical layers and sharp edges of tools. It is determined that solid-state sintering of powders on the initial stage of heating the composite braze leads to emerging of internal stresses and forming cracks. Inert additions that prevent solid-state sintering should be include in braze to prevent cracking. Optimal inert addition for brazes Sn-Cu-Co is the tungsten powder. Minimum content of tungsten needed to prevent cracking is 6% (by mass). Optimal content of components in composition braze for brazing shaped diamond-abrasive tools is (% by mass): 30 Co, 20 Sn, 43 Cu, 7 W

Ключевые слова: АЛМАЗНЫЙ ИНСТРУМЕНТ, КОМПОЗИЦИОННАЯ ПАЙКА, ВЯЗКОСТЬ, СПЕКАНИЕ, КОБАЛЬТ, ВОЛЬФРАМ

Keywords: DIAMOND TOOL, COMPOSITE BRAZING, VISCOSITY, SINTERING, COBALT, TUNGSTEN

Абразивные алмазные инструменты с рабочими поверхностями сложной фасонной формы применяются в различных отраслях промышленности:

- в камнеобработке широко используются алмазные фасонные ролики-фрезы для получения различных деталей из природного камня, в частности, элементов лестниц, карнизов, столешниц и других изделий;

- в машиностроении применяют правящие алмазные ролики для придания фасонного профиля шлифовальным кругам, изготовленным из корунда и карбида кремния;

- в нефтегазовой промышленности применяют алмазные долота со сложными фасонными поверхностями для бурения скважин в твердых породах.

Такие инструменты, как правило, имеют металлический корпус, на который нанесен алмазосодержащий слой, состоящий из зерен алмаза и охватывающей их металлической связки.

В настоящее время основной технологией производства камнеобрабатывающих фасонных алмазных инструментов является пайка твердыми припоями в вакууме [1,2]. При данной технологии в качестве припоя используют сплавы, содержащие хром, марганец, титан, кремний или алюминий. Припой наносят на стальную подложку в виде металлического листа с аморфным строением или в виде суспензии, содержащей порошок твердого припоя. При последующем нагреве до температуры, не превышающей 1100°C, припой оплачивается, охватывает частицы сверхтвердых материалов (алмазы) и закрепляет их на подложке. Наличие в составе припоя карбидообразующих элементов (Cr, Mn, Ti, Si, Al) обеспечивает химическое взаимодействие расплава с алмазами и хорошее их смачивание. Недостаток данного способа – невысокая вязкость расплавленных припоев, и как следствие, невозможность получения многослойных алмазосодержащих покрытий на сложных фасонных поверхностях. Указанная

проблема может быть решена при использовании композиционных припоев, содержащих металлические порошки тугоплавкого наполнителя и легкоплавкой матрицы и органическое связующее [3,4]. При пайке тугоплавкий наполнитель частично растворяется в жидкой матрице, повышает ее вязкость и препятствует стеканию припоя с покрываемых поверхностей к основанию изделия, что позволяет получать алмазосодержащие покрытия значительной толщины на сложных поверхностях. В работах [4,5] показано, что в качестве тугоплавкого наполнителя целесообразно использовать порошок кобальта, а для создания легкоплавкой матрицы – порошки олова и меди. Однако влияние состава композиционных припоев на процессы пайки алмазных инструментов изучено недостаточно.

Цель настоящей работы – установить влияние тугоплавких наполнителей на процесс композиционной пайки алмазно-абразивных инструментов и на этой основе определить оптимальный состав припоя.

С этой целью были проведены экспериментальные исследования. Композиционные припои готовили смешиванием порошков технически чистых олова, меди и кобальта. Частицы порошков имели равноосную форму и следующие размеры, мкм: олово – 17...30, медь – 45...70, кобальт – 1,5...2. В смесь металлических порошков вводили 5 %-ный водный раствор поливинилового спирта до получения пастообразной массы. Припои без алмазов наносили на стержни диаметром 10 мм из стали Ст3 слоем толщиной 2,5 мм. Смесь припоя с алмазами АС150 (размер зерна 400/315 мкм), содержащую по объему 25 % алмазов, наносили на ролики фасонного профиля из стали 45 с максимальным диаметром 75 мм, толщина слоя 2,5 мм.

Образцы с нанесенным припоем высушивали и затем спекали в вакууме и в среде аргона при температурах 820...1100 °С.

Исследование микроструктуры и твердости сплавов проводили на образцах без алмазов. Структуру изучали с помощью металлографического

микроскопа AxioObserver.A1m фирмы Carl Zeiss при увеличениях  $\times 200 \dots 1000$ . Твердость образцов после спекания измеряли по методу Роквелла, шкала «В», на твердомере ТК-2М.

В работе [6] показано, что на начальном этапе нагрева композиционного припоя при температурах, не достаточных для расплавления и растекания легкоплавкой матрицы, происходит твердофазное спекание порошков. При этом слой припоя, нанесенного на стальную подложку, дает некоторую усадку. После достижения температуры пайки легкоплавкие составляющие припоя расплавляются и под действием капиллярных сил проникают в пустоты между спеченными тугоплавкими частицами. В слое припоя появляются сжимающие капиллярные усилия, стягивающие частицы твердой фазы и приводящие к заметной усадке припоя.

Благодаря наличию тугоплавкого наполнителя композиционный припой хорошо удерживается на вертикальных поверхностях и острых кромках стальной подложки. Это объясняется следующими причинами:

- при достаточно большом содержании тугоплавкого наполнителя, его частицы спекаются между собой и образуют пористый каркас, в капиллярах которого удерживается жидкая фаза;

- в том случае, если содержание тугоплавкого наполнителя недостаточно для образования в припое сплошного каркаса, частицы тугоплавкого наполнителя оказываются разобщенными прослойками жидкой фазы. Не расплавившиеся частицы, находясь в жидкой фазе, повышают ее внутреннее трение и, тем самым, увеличивают вязкость [7];

- тугоплавкий наполнитель растворяется в жидкой фазе и снижает ее жидкотекучесть [8]. Диффузия компонентов тугоплавкого наполнителя в легкоплавкую матрицу приводит, в конечном счете, к ее затвердеванию.

Таким образом, содержание тугоплавкого наполнителя в композиционном припое значительно влияет на механизм и кинетику процесса пайки.

В результате экспериментальных исследований установлено, что при пайке припоями Sn-Cu-Co, содержащими менее 26...28 % кобальта, на образцах наблюдаются подтёки и наплывы, возникающие за счет стекания припоев с вертикальных и наклонных поверхностей к основанию образцов. Содержание порошка кобальта менее 26 % является недостаточным для придания композиционному припою необходимой вязкости.

Вместе с тем, при содержании кобальта более 20 % наблюдается растрескивание слоя припоя. С повышением содержания кобальта трещины на образцах проявляются более выражено, возрастает их количество. На рис. 1 показан внешний вид образцов, на которые нанесены припои с большим содержанием кобальта. Их состав приведен в таблице 1. При спекании в аргоне при 1100 °С с выдержкой 20 мин все припои подверглись сильному растрескиванию. Причина растрескивания заключается в следующем.



Рис. 1. Растрескивание композиционных припоев Sn-Cu-Co и Sn-Co (спекание в аргоне при 1100 °С, 20 мин)

Таблица 1. Составы исследованных припоев Sn-Cu-Co и Sn-Co (номера образцов в таблице соответствуют номерам на рис. 1)

№ образца	Содержание компонентов по массе, %		
	Sn	Cu	Co
1	-	20	80
2	2	18	80
3	4	16	80
4	6	14	80
5	8	12	80
6	10	10	80
7	5	-	95
8	10	-	90
9	15	-	85
10	20	-	80

В работе [9] показано, что растворение кобальта в жидком олове и образование тугоплавких интерметаллидов замедляет растекание олова. Вследствие этого частицы тугоплавкого наполнителя до смачивания их расплавом предварительно подвергаются твердофазному спеканию. На рис. 2 представлена структура, сформировавшаяся в результате этих процессов.

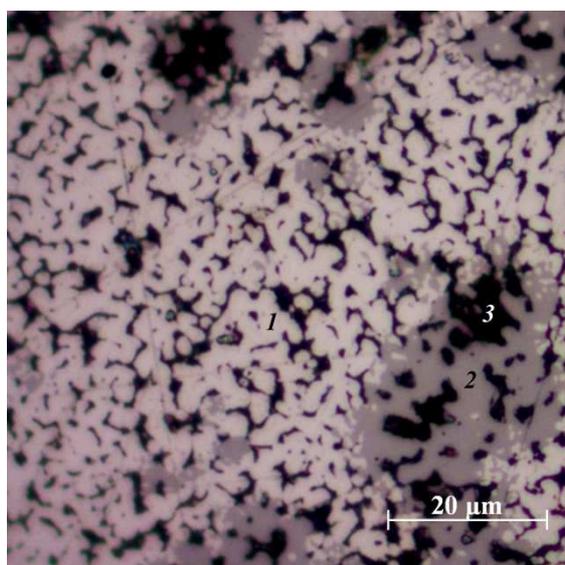


Рис. 2. Структура сплава Sn-Co после спекания при 820° С, ×1000:

1 – частицы кобальта; 2 – интерметаллид CoSn; 3 – поры

Отчетливо видно, что частицы кобальта, не смоченные оловом, при температуре 820 °С спеклись между собой, между ними наблюдаются так называемые «шейки» [10]. Образование и последующее утолщение «шеек» при спекании сопровождается сближением частиц порошка и усадкой припоя.

Поскольку припой нанесен на жесткую стальную основу, не подверженную усадке, в слое возникают внутренние напряжения, приводящие к его растрескиванию.

Растрескивание припоя можно предотвратить, ослабив процесс твердофазного спекания. С этой целью в состав композиционных припоев вводили порошки тугоплавких веществ, не подверженных спеканию в интервале температур 800...1100 °С. В качестве таких веществ были выбраны порошки вольфрама и карбида вольфрама.

В работе [11] приведены сведения о слабом спекании вольфрамового порошка при температурах 1150...1300 °С в восстановительной среде. По данным [12] усадка порошка карбида вольфрама при температурах спекания до 1400 °С равна нулю. Кроме тугоплавкости и высоких температур спекания указанные вещества обладают большой твердостью, необходимой для обеспечения износостойкости связки алмазного инструмента. Величина твердости составляет для металлического вольфрама 342 HV [13], для карбида вольфрама – 1730...1850 HV [11,13].

Твердофазное спекание и усадка многокомпонентных порошковых смесей во многом зависят от характера взаимодействия компонентов, от процессов их взаимной диффузии и растворения. Согласно литературным данным, вольфрам и карбид вольфрама взаимодействуют с компонентами композиционного припоя Sn-Cu-Co следующим образом:

- с оловом вольфрам не взаимодействует до температуры 1680 °С [14];

- с медью вольфрам и карбид вольфрама не взаимодействуют до температуры ее плавления [11,15];

- вольфрам и карбид вольфрама при нагреве растворяются в кобальте. Спекание и усадка смеси порошков карбида вольфрама и кобальта становятся заметны при температуре 800 °С [12,15].

Анализ приведенных данных показывает, что в композиционном припое Sn-Cu-Co с добавкой порошков вольфрама или карбида вольфрама может происходить твердофазное спекание путем диффузионного взаимодействия тугоплавких добавок с частицами кобальта. В связи с этим, для выбора оптимальной инертной добавки, препятствующей твердофазному спеканию припоя, проведено экспериментальное исследование взаимодействия порошков вольфрама и карбида вольфрама с кобальтом.

Были приготовлены смеси порошков следующего состава (содержание компонентов по массе):

- 1) 50% W, 50 % Co;
- 2) 50% WC, 50 % Co.

Размер частиц составлял: вольфрам – 4...16 мкм, карбид вольфрама – 1...2 мкм. Порошки смешивали с поливиниловым спиртом до пастообразной консистенции, затем помещали в обечайки из стали Ст3 с внутренним диаметром 16,5 мм, и устанавливали их на графитовом основании. Спекание смесей проводили в вакууме при температурах 820 и 1000 °С с выдержкой 40 мин. При спекании смеси не приваривались к обечайкам, но давали усадку, отделяясь от их внутренних стенок. После спекания образцы удаляли из обечаек и измеряли их диаметр штангенциркулем. Величину линейной усадки определяли, как разность диаметров образцов до и после спекания, выраженную в процентах. Минимальная усадка, равная 9,1 %, наблюдалась у смеси вольфрама с кобальтом при температуре спекания 820 °С. Максимальная усадка, равная 15,2 % – у карбида вольфрама с кобальтом при температуре 1000 °С. Структуры этих сплавов представ-

лены на рисунках 2 и 3.

Таким образом, в интервале температур 820...1000 °С вольфрам спекается с кобальтом менее интенсивно, чем карбид вольфрама. В связи с этим, порошок вольфрама был выбран в качестве «инертной» добавки, препятствующей твердофазному спеканию композиционного припоя. В целях определения количества вольфрама, необходимого для предотвращения растрескивания припоя, проведены следующие исследования.

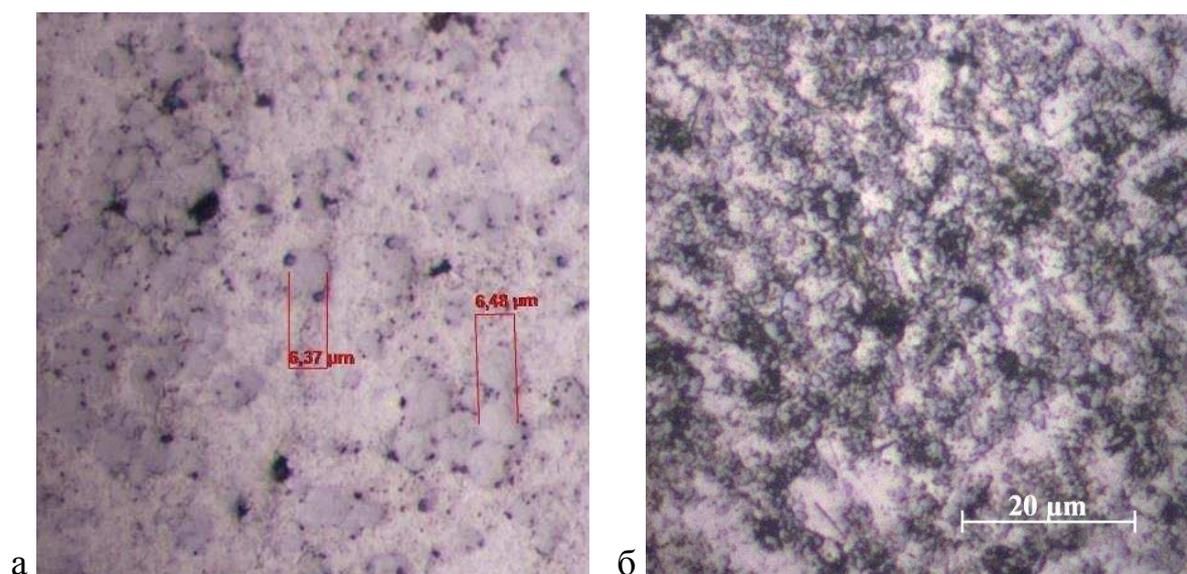


Рис. 3. Спеченные смеси кобальта с тугоплавкими добавками,  $\times 1000$ :

а – кобальт и вольфрам, 820 °С, 40 мин;

б – кобальт и карбид вольфрама, 1000 °С, 40 мин.

В композиционный припой Sn-Cu-Co, содержащий по массе 20% Sn и 43 % Cu, вводили порошок вольфрама в количестве от 4 до 11 % (масс.). При этом содержание порошка кобальта уменьшалось от 33 до 26 % (масс.). В полученные смеси добавляли поливиниловый спирт и наносили пастообразный припой на стержни из стали Ст3 диаметром 10 мм. Образцы спекали в аргоне при температуре 820 °С с выдержкой 40 мин.

После спекания трещины отсутствовали на образцах с содержанием вольфрама от 6% и более. Очевидно, что в указанных припоях порошок

вольфрама препятствовал преждевременному твердофазному спеканию частиц меди и кобальта до их смачивания жидкой фазой.

Содержание вольфрама влияет на твердость металлических связок. При увеличении содержания вольфрама от 4 до 11 % (масс.) твердость связки понижается от 97 до 89 HRB.

Таким образом, оптимальным является композиционный припой следующего состава, (% масс.): 30 Co, 20 Sn, 43 Cu, 7 W. При таком содержании компонентов припой не образует наплывов на вертикальных поверхностях образцов, не растрескивается при нагреве. Металлическая связка, образуемая из указанного припоя, обладает твердостью 92...94 HRB, обеспечивающей износостойкость абразивного алмазного инструмента. На рис. 4 показан камнеобрабатывающий алмазный ролик, полученный с помощью припоя указанного состава. При пайке припой хорошо удерживался на кромках и вертикальных поверхностях инструмента. Наплывы припоя и трещины в алмазосодержащем слое отсутствуют.



Рис. 4. Внешний вид камнеобрабатывающего алмазного ролика с металлической связкой Sn-Cu-Co-W

## ВЫВОДЫ

1. Для получения равномерных алмазосодержащих покрытий толщиной до 2,5 мм на вертикальных, криволинейных поверхностях и острых кромках инструмента, следует использовать композиционные припои, обладающие высокой вязкостью. Необходимая для этого величина вязкости достигается при введении в припой не менее 26...28 % (масс.) кобальтового порошка.

2. Установлено, что твердофазное спекание порошков на начальном этапе нагрева композиционного припоя приводит к возникновению в нем внутренних напряжений и образованию трещин. Для предотвращения растрескивания в припой следует вводить инертные добавки, препятствующие твердофазному спеканию. Оптимальной инертной добавкой для припоев Sn-Cu-Co является порошок вольфрама. Минимальное содержание вольфрама, необходимое для предотвращения растрескивания составляет 6 % (масс.).

3. Оптимальное содержание компонентов в композиционном припое для пайки фасонных алмазно-абразивных инструментов составляет, (% масс.): 30 Co, 20 Sn, 43 Cu, 7 W.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Konstanty J. Powder Metallurgy Diamond Tools. Elsevier, Oxford, 2005.
2. US 6679243 B2. Brazed diamond tools and methods for making. Sung Chien-Min. Jan. 20, 2004.
3. Пат. 2457935 РФ, МПК В24D18/00, В24D3/06, В23К35/24. Способ получения абразивного инструмента из сверхтвердых материалов / Е.Г. Соколов, А.Д. Козаченко (РФ). – № 2010145573/02; Заявл. 09.11.2010; Опубл. 10.08.2012 – Бюл. №22. – 6 с.
4. Соколов Е.Г., Артемьев В.П., Козаченко А.Д. Исследование формирования металлической связки алмазно-абразивного инструмента при композиционной пайке // Технология металлов. 2012. №12. С. 35-38.
5. Козаченко А.Д. Порошковые композиции для создания фасонного алмазно-абразивного инструмента // VIII Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». Москва. 15-18 ноября 2011г. / Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2011.С.378-380.
6. Соколов Е.Г., Козаченко А.Д. Исследование связующих веществ композиционных припоев, применяемых для пайки алмазно-абразивного инструмента // Изв. ву-

зов. Сев.-Кав. регион. Техн. науки. 2012. №5. С. 66-68.

7. Ходаков Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование // Российский химический журнал. 2003. Т. XLVII. № 2. С. 33-44.

8. Еланский Г.Н. Строение и свойства металлических расплавов. М.: Metallurgija, 1991.

9. Соколов Е.Г., Козаченко А.Д. Смачивание при композиционной пайке абразивного инструмента из сверхтвердых материалов // Современные технологии в машиностроении: сб. статей XIV международной науч.-практ. конф. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2010. С.124-128.

10. Гегузин Я.Е. Физика спекания – М.: Наука, 1967. – 360 с.

11. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Под ред. Б.С. Митина. – М.: Metallurgija, 1987. – 792 с.

12. Третьяков В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. – М.: Metallurgija, 1975. - 247 с.

13. Энциклопедия неорганических материалов: Справочник: в 2 т. / Под общ. ред. И.М. Федорченко – Киев: Главная редакция УСЭ, 1977.

14. Диаграммы двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т.3. Кн.2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – 448 с.

15. Диаграммы двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т.2. / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с.

#### REFERENCES

1. Konstanty J. Powder Metallurgy Diamond Tools. Elsevier, Oxford, 2005.

2. US 6679243 B2. Brazed diamond tools and methods for making. Sung Chien-Min. Jan. 20, 2004.

3. Pat. 2457935 RF, МПК В24D18/00, В24D3/06, В23K35/24. Sposob poluchenija abrazivnogo instrumenta iz sverhtverdyh materialov / E.G. Sokolov, A.D. Kozachenko (RF). – № 2010145573/02; Zajavl. 09.11.2010; Opubl. 10.08.2012 – Bjul. №22. – 6 s.

4. Sokolov E.G., Artem'ev V.P., Kozachenko A.D. Issledovanie formirovanija metallicheskoj svjazki almazno-abrazivnogo instrumenta pri kompozicionnoj pajke // Tehnologija metallov. 2012. №12. S. 35-38.

5. Kozachenko A.D. Poroshkovye kompozicii dlja sozdaniya fasonnogo almazno-abrazivnogo instrumenta // VIII Rossijskaja ezhegodnaja konferencija molodyh nauchnyh sotrudnikov i aspirantov «Fiziko-himija i tehnologija neorganicheskikh materialov». Moskva. 15-18 nojabrja 2011g. / Sbornik materialov. – M: IMET RAN, 2011.S.378-380.

6. Sokolov E.G., Kozachenko A.D. Issledovanie svjazujushhh veshhestv kompozicionnyh pripoev, primenjaemyh dlja pajki almazno-abrazivnogo instrumenta // Izv. vuzov. Sev.-Kav. region. Tehn. nauki. 2012. №5. S. 66-68.

7. Hodakov G.S. Reologija suspenzij. Teorija fazovogo techenija i ee jeksperimental'noe obosnovanie // Rossijskij himicheskij zhurnal. 2003. Т. XLVII. № 2. S. 33-44.

8. Elanskij G.N. Stroenie i svojstva metallicheskih rasplavov. М.: Metallurgija, 1991.

9. Sokolov E.G., Kozachenko A.D. Smachivanie pri kompozicionnoj pajke abrazivnogo instrumenta iz sverhtverdyh materialov // Sovremennye tehnologii v mashinostroenii: sb. statej XIV mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf. Penza: Privolzhskij Dom znaniy, 2010. S.124-128.

10. Geguzin Ja.E. Физика спекания – М.: Наука, 1967. – 360 с.

11. Poroshkovaja metallurgija i napylennye pokrytija / Pod red. B.S. Mitina. – М.: Metallurgija, 1987. – 792 с.

12. Tret'jakov V.I. Osnovy metallovedenija i tehnologii proizvodstva spechen-nyh tverdyh splavov. – M.: Metallurgija, 1975. - 247 s.
13. Jenciklopedija neorganicheskikh materialov: Spravochnik: v 2 t. / Pod obshh. red. I.M. Fedorchenko – Kiev: Glavnaja redakcija USJe, 1977.
14. Diagrammy dvojnyh metallicheskih sistem: Spravochnik: V 3 t.: T.3. Kn.2 / Pod obshh. red. N.P. Ljakisheva. – M.: Mashinostroenie, 2001. – 448 s.
15. Diagrammy dvojnyh metallicheskih sistem: Spravochnik: V 3 t.: T.2. / Pod obshh. red. N.P. Ljakisheva. – M.: Mashinostroenie, 1997. – 1024 s.