

УДК 621.742

В.Н. Анциферов, И.В. Анциферова

Научный центр порошкового материаловедения
Пермского национального исследовательского
политехнического университета

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СПЕКАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОРАЗМЕРНЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПОРОШКОВ (НАУЧНЫЙ ОБЗОР)

Приведен анализ наиболее значимых российских и зарубежных публикаций, посвященных процессу спекания с использованием нанодисперсных порошков. Показано, что свойства спеченных сплавов определяются характеристиками исходного сырья и промежуточных продуктов твердосплавного производства, которые изменяются в зависимости от различных технологических параметров. Установлено, что конечные физико-механические и эксплуатационные свойства твердосплавных композитов, модифицированных наночастицами, находятся в прямой зависимости от параметров их микроструктуры, соотношения объемных долей и размеров частиц. Уменьшение частиц до наноразмерного состояния существенно влияет на диффузионные процессы. С помощью добавок наночастиц можно значительно снизить температуру спекания.

Ключевые слова: нанопорошки, твердые сплавы, структура, микроструктурные параметры, спекание, легирующие добавки, активация спекания, удельная поверхность, плотность, температура спекания.

V.N. Antsiferov, I.V. Antsiferova

Scientific Center of Powder Material Science,
Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

FEATURES OF SINTERING USING NANOSIZED CARBIDE POWDERS (SCIENTIFIC REVIEW)

The article presents the analysis of the most important Russian and foreign publications on the process of sintering with the use of nanosized additives. It is shown that properties of sintered alloys are determined by the characteristics of raw materials and intermediate products carbide production that vary depending on various process parameters. It is established that the ultimate physical, mechanical and operational properties of carbide composites modified with nanoparticles are directly dependent on their microstructure, the ratio of volume fractions and particle sizes. Reduction of particle size to nanoscale condition significantly affects the diffusion processes. Using nanoparticles additives can significantly reduce the sintering temperature.

Keywords: nanopowders, hard alloys, dispersion, structure, microstructural parameters, sintering, alloying additives, activation of sintering, specific surface area, temperature of sintering.

В настоящее время установлено, что свойства спеченных твердых сплавов определяются составом, микроструктурой и особенностями внутризеренной структуры компонентов твердых сплавов (субмикроструктурой) [1]. При этом свойства спеченных сплавов в значительной степени определяются характеристиками исходного сырья и промежуточных продуктов твердосплавного производства, которые изменяются в зависимости от различных технологических параметров.

Среди методов получения материалов порошкового материаловедения важное значение имеют материалы с наноразмерными фазами. В работе [2] приведены исследования по получению порошковых сталей с легирующими наночастицами. При использовании механически легированной порошковой стали с наноструктурой получают изделия с высоким уровнем прочности при снижении температурно-временных параметров спекания.

В работе [3] представлены результаты исследования закономерностей механизмов спекания нанопорошков оксида алюминия в процессе горячего прессования в графитовых формах при пропускании через порошок электрического тока. Достаточно близкую к теоретической плотность (на уровне 95 %) у исследуемых нанопорошков Al_2O_3 удалось получить уже при температуре 1400 °С.

С учетом огромной разницы между температурами начала спекания микронных и наночастиц большой интерес представляет использование ультрадисперсных порошков в качестве активаторов спекания материалов на основе вольфрама. Уменьшение частиц до наноразмеров существенно влияет на диффузионные процессы. С помощью добавки наночастиц вольфрама можно значительно снизить температуру спекания и не загрязнить матрицу. Данный способ активации целесообразно использовать для жаропрочных композиционных материалов систем вольфрам – карбиды тугоплавких металлов. В связи с непосредственным влиянием активирующих добавок на свойства таких материалов необходимо изучение механических характеристик с целью установления взаимосвязи между выбором процесса спекания и конечными свойствами.

Проведены исследования по получению высокоплотных компактов из вольфрама с помощью активированного спекания с использованием добавок никеля, механоактивации исходных порошков; затем проведено сравнение вышеуказанных методов с использованием доба-

вок наночастиц вольфрама в количестве 10–30 мас. % в качестве активатора. Плотность после спекания композиционных материалов на основе вольфрама без дополнительной обработки составляет 95–98 % от теоретической; при использовании холодного изостатического прессования плотность увеличилась на 1,0–1,1 %.

Сходные данные получены в работе [4]. Показано, что максимальная плотность, до 96,5 % от теоретической, достигается в брикетах с добавкой 20 % нанопорошка вольфрама. Наивысшую плотность (98 %) и малый размер зерен после спекания при 1850 °С имеют образцы из субмикронного порошка вольфрама (размер зерна 0,8–1,0 мкм) с добавкой 20 % наночастиц. При этом размер зерна 2,0–2,5 мкм.

Таким образом, в результате проведенных исследований мы заключаем, что необходимо использовать для изготовления композитов порошок вольфрама дисперсностью 0,8–1,0 мкм в количестве 10–20 мас. %.

Также в работах [5–7] подробно исследованы закономерности процесса активированного спекания с использованием наночастиц вольфрама. Показано, что на начальных стадиях спекания при температурах 1000–1100 °С основную роль играет взаимодействие между наноразмерными частицами и поверхностным слоем микронных порошков, стимулирующее поверхностную диффузию. При свободном спекании это приводит к более интенсивному уплотнению под действием капиллярных сил за счет межчастичного скольжения с последующим ростом исходных микронных частиц, обусловленным присоединением наночастиц, распределенных в объеме. К настоящему времени представлено несколько работ по установлению закономерностей влияния технологических параметров на структуру и физико-механические свойства псевдосплавов W–Ni–Fe и Mo–Cu, получаемых из ультрадисперсных порошков и механоактивированной шихты [8, 9].

По данным исследования влияния гранулометрического состава шихты на структуру и свойства псевдосплава ВНЖ 95 состава W–3,5%Ni–1,5%Fe, установлено, что замена в стандартной шихте 10 и 20 % промышленных порошков на соответствующие экспериментальные наноразмерные порошки снижает температуру спекания с 1500 °С (стандартная шихта) до 1400 °С, но не приводит к заметному повышению механических свойств. При получении псевдосплава ВНЖ 95 из шихты, содержащей 100 % наноразмерных порошков, темпера-

тура спекания составляет 1300 °С и уменьшается на 200 °С по сравнению с температурой спекания псевдосплава из стандартной шихты. Пределы макроупругости и текучести псевдосплава ВНЖ 95, полученного полностью из наноразмерных порошков, примерно в 1,5 раза выше, чем соответствующие показатели промышленного псевдосплава. В отличие от монотонно возрастающей зависимости плотности от температуры при спекании псевдосплава ВНЖ 95 из промышленных порошков аналогичная зависимость при спекании псевдосплава ВНЖ 95 из экспериментальных наноразмерных порошков является немонотонной и состоит из трех стадий. По мнению авторов, первая стадия отражает ускорение процесса диффузионного массопереноса при повышении температуры. Вторая стадия обусловлена ростом зерен при повышении температуры спекания и увеличением характерных путей диффузии. На третьей стадии происходит замедление скорости роста зерен, их размер квазистабилизируется и, как на первой стадии, «побеждает» процесс диффузионного массопереноса, интенсивность которого растет с температурой.

Предложена и исследована модель, описывающая эффект процесса торможения спекания псевдосплава W–Ni–Fe наночастицами карбида ниобия. Торможение спекания тем сильнее, чем выше объемная доля частиц и чем меньше их радиус.

Наибольшее распространение карбид вольфрама приобрел как основа для получения твердых сплавов. Введение металлической фазы, главным образом кобальта, приводит к повышению трещиностойкости и позволяет спекать сплав WC–Co как методом жидкофазного спекания при температурах несколько выше образования эвтектики, так и новыми методами [10, 11].

Из-за проблем, возникающих при использовании традиционных методов спекания твердых сплавов для нанопорошков, в последнее время все больший интерес вызывают новые методы компактирования. Это СВЧ-спекание [12], электроразрядное компактирование [13], плазменное спекание под давлением [14], спекание индукционным нагревом [15] и электроимпульсное плазменное спекание (Spark Plasma Sintering). Поскольку указанные процессы обеспечивают высокую скорость нагрева и снижение температуры спекания, то в полученных с их помощью материалах размер зерна, как правило, оказывается заметно меньшим, чем при обычном спекании.

В качестве исходных материалов были использованы нанопорошки WC и ингибиторы TaC и VC с размером частиц соответственно 60, 10 и 80 нм. Нанопорошки карбида вольфрама были получены в двухстадийном процессе, в котором на первой стадии из оксида вольфрама и углеводорода в струе восстановительного газа, генерируемой дуговым плазмотроном, синтезировались нанопорошки системы W–C. На второй стадии из этих порошков в результате низкотемпературного печного синтеза был получен однофазный монокарбид вольфрама со средним размером частиц 30–80 нм. Составы WC–Co, содержащие 8 мас. % кобальта, были получены восстановлением солей кобальта, осажденных на частицы карбида вольфрама из раствора. В этом же процессе в состав композиции вводились нанопорошки карбидов-ингибиторов – ванадия и тантала. Содержание VC и TaC в смеси составляло 0,7 и 1,0 мас. % соответственно. Электроимпульсное плазменное спекание осуществлялось на установке Dr.Sinter Model-625 Spark Plasma Sintering System производства SPS Syntex Inc. Ltd., Япония. Наноразмерный порошок чистого карбида вольфрама спекался в интервале температур 1400–1950 °C без выдержки, скорость нагрева варьировалась от 25 до 2400 °/мин. Спекание при скорости подъема температуры до 500 °/мин включительно осуществлялось в программном режиме. Большие скорости обеспечивались ручной регулировкой величины тока, пропускаемого через образец. После достижения заданной температуры нагрев выключался, и остывание образца и пресс-формы происходило естественным путем. Все опыты проводились при давлении прессования 60 МПа. Усадка образцов отслеживалась при помощи дилатометра, входящего в комплект установки. Температура измерялась пирометром, сфокусированном на внешней стороне пресс-формы. Спекание проводилось в вакууме при давлении 4 Па в графитовых пресс-формах с внутренним диаметром 10 мм, внешним диаметром 30 мм и высотой 30 мм при 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000 °C.

Метод электроимпульсного плазменного спекания позволяет твердофазно спекать карбид вольфрама, в том числе наноразмерный, и получать материалы с уникальным сочетанием свойств «твердость/трещиностойкость». Применение метода по отношению к сплавам системы WC–Co с введением нанокарбидов TaC и VC также позволяет получать высокие механические свойства.

Авторами работы [16] подробно исследованы закономерности влияния добавок нанопорошков WC, ZrO₂, Al₂O₃, W на процессы спекания композиционных материалов на основе железа и кобальта. Для достижения равномерного распределения наночастиц по объему шихты порошки смешивались с использованием методов ультразвукового диспергирования и механического легирования. Показано, что наночастицы, находящиеся на контактных поверхностях раздела зерен, оказывают значительное влияние на кинетику спекания, и это влияние определяется термодинамическими особенностями взаимодействия металла и частицы. Методом электронной микроскопии наночастицы упрочняющей фазы были обнаружены как в теле зерна, так и по границам зерен. Исследования механических свойств показали значительное увеличение твердости, предела прочности на изгиб и износостойкости благодаря эффекту дисперсионного упрочнения.

Исследования, проведенные авторами работы [17], показали, что при остывании расплава наночастицы являются центрами кристаллизации и препятствуют образованию игольчатой структуры из кристаллов Cu₆Sn₅ и Cu₃Sn, делают процесс кристаллизации более равномерным и способствуют формированию мелкозернистой структуры, а следовательно, улучшают механические свойства. Исследование механических свойств показали, что добавки модификатора приводят к существенному повышению твердости сплава. Наиболее резкое повышение твердости происходит при концентрации модификатора в диапазоне 0,25–0,43 мас. %. Дальнейшее увеличение концентрации приводит лишь к незначительному увеличению твердости.

В работе [18] были изучены закономерности влияния природы и содержания наночастиц в связке на процессы уплотнения при холодном и горячем прессовании металлических связок. Объясняется это тем, что движущей силой процесса спекания является уменьшение суммарной поверхностной энергии и увеличение объемной доли межзеренных границ и плотности дефектов в результате предварительной обработки смесей в планетарной центробежной мельнице (ПЦМ) активирует спекание. Так, например, в результате обработки кобальта в ПЦМ происходит снижение энергии активации спекания с 10,4 до 9,7 кДж/моль. Спекание смесей с наночастицами сильно зависит от природы и концентрации нанодисперсной добавки. Можно выделить два граничных случая: 1) наночастицы химически инертны по отноше-

нию к матрице, как в случае системы Co extrafine с легирующими добавками ZrO_2 ; 2) наночастицы взаимодействуют с матрицей, как в системе Co extrafine с легирующими добавками. Видно, что при спекании связки с наночастицами WC плотность образцов при температуре спекания более $900\text{ }^\circ\text{C}$ не ниже, чем в случае исходной связки. Это свидетельствует об активированном спекании. В случае инертных по отношению к связке наночастиц оксида циркония из-за блокировки границ раздела зерен плотность спеченных образцов уменьшается.

Механическая обработка смеси в ПЦМ увеличивает активность связки при спекании, что связано с измельчением и увеличением дефектности структуры порошка. На эффект увеличения активности накладывается разница в исходной пористости брикетов после холодного прессования. С ростом температуры спекания, когда процессы усадки экспоненциально усиливаются, вклад, связанный с повышением активности порошка после обработки в ПЦМ, перекрывает разницу в исходной плотности брикетов. Уплотнение при спекании смесей «связка – нанопорошок» сильно зависит от типа вводимой добавки.

На основе анализа исследований, можно сделать вывод, что наиболее перспективным является метод искрового плазменного спекания. Данный метод характеризуется высокой скоростью нагрева и малым временем спекания, что позволяет получать керамику с наноразмерным зерном при пониженных температурах.

Также представляет интерес радиальное магнитно-импульсное прессование. В результате экспериментов определили, что в циркониевой нанокерамике, полученной термическим спеканием РМИ-компактов, отсутствует характерный эффект высокотемпературного разуплотнения, что объясняется малой величиной внутренних механических напряжений. При искровом плазменном спекании большие локальные температурные градиенты (10 К/см) между контактной областью и периферией частиц активируют термодиффузионный массоперенос, что позволяет получить мелкое зерно ($< 300\text{ нм}$) вследствие снижения температуры и уменьшения времени спекания.

Установлено, что при РМИ-прессовании нанопорошка оксида алюминия предварительная высокотемпературная дегазация обеспечивает более интенсивное уплотнение компактов.

В исследованиях [19, 20] представлены теоретические разработки влияния закономерностей технологических параметров на структуру

и физико-механические свойства псевдосплавов Ni–Fe и Mo–Cu, получаемых из ультрадисперсных порошков и механоактивированной шихты. Применение механоактивированной шихты позволило получать псевдосплав плотностью не менее 98 % от теоретической, с мелкозернистой структурой. Температура спекания псевдосплава ВНЖ 95 из механоактивированной шихты на 250 °С меньше, чем температура его спекания из стандартных промышленных порошков. Предел прочности псевдосплава ВНЖ 95, полученного из механоактивированной шихты, $\sigma = 920$ МПа, что в 1,5–2 раза выше, чем у псевдосплава, полученного по стандартной промышленной технологии.

Проанализированные в работе результаты влияния легирующих добавок на процесс спекания показали, что существенным фактором для достижения необходимой температуры и пористости является изменение свойств нанопорошков в зависимости от процесса производства. Спекание смесей с наночастицами сильно зависит от природы и концентрации нанодисперсной добавки.

Список литературы

1. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение. – М.: Высшая школа, 2003. – 701 с.
2. Анциферов В.Н. Порошковое материаловедение: монография / под ред. д-ра техн. наук, проф. А.М. Ханова / УрО РАН. – Екатеринбург, 2012. – 456 с.
3. Cha S.I., Hong S.H. // Mater. Sci. A. – 2003. – 356. – P. 381–389.
4. Int. J. Refract. Met. Hard. Mater. / Z. Fang [et al.]. – 2005. – 23. – P. 249–257.
5. Cha S.I., Hong S.H., Kim B.K. // Mater. Sci. A. – 2003. – 351. – P. 31–38.
6. Sivaprahasam D., Chandrasecar S.B., Sundaresan R. // Int. J. Refract. Met. Hard. Mater. – 2007. – 25. – P. 144–152.
7. Int. J. Refract. Met. Hard. Mater / L. Sun [et al.]. – 2008. – 26. – P. 357–361.
8. Bykov Yu.V., Rybakov K.I., Semenov V.E. // J. Phys. D.: Appl. Phys. – 2001. – 34. – P. 55–75.

9. Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. – М.: Изд-во МИСиС, 2004. – 468 с.

10. Int. J. Refract. Met. Hard. Mater / Z. Fang [et al.]. – 2005. – 23. – P. 249–257.

11. Cha S.I., Hong S.H., Kim B.K. // Mater. Sci. A. – 2003. – 351. – P. 31–38.

12. J. Mater. Res. / X.Y. Wu [et al.]. – 2004. – 19. – P. 2240–2244.

13. Powder Metal / A. Sampath [et al.]. – 2002. – 45. – P. 25–27.

14. Kim H.C., Oh D.Y., Shon I.J. // Int. J. Ref. Mater. Hard. Mater. – 2004. – 22. – P. 197–203.

15. Спекание нанопорошков WC и WC–Co с различными ингибирующими добавками методом электроимпульсного плазменного спекания / Ф. Кравченко [и др.] // Научные ведомости. Сер. Математика, Физика. – 2011. – 11 (103). – С. 623–627.

16. Гордеев Ю.И., Абкарян А.К., Лепешев А.А. Влияние добавок легирующих керамических наночастиц на структурные параметры и свойства твердых сплавов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2013. – Вып. 3. – С. 174–181.

17. Зайцев А.А. Разработка дисперсно-упрочненных наночастицами металлических связок и технологии получения алмазосодержащих сегментов для режущего инструмента: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 22 с.

18. Акарачкин С.А. Свойства корундо-циркониевой нанокерамики, полученной из плазмохимических порошков методами радиального прессования и искрового плазменного спекания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2012. – 22 с.

19. Тихий Г.А. Структура, свойства и технология получения тугоплавких псевдосплавов W–Ni–Fe и Mo–Cu при использовании механоактивированной наноразмерной порошковой шихты: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 2008. – 18 с.

20. Тихий Г.А., Белова В.П., Никитин В.И. Исследование псевдосплава системы Mo–Cu, полученного из механоактивированной шихты // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2007. – № 9. – С. 32–35.

References

1. Ryb'ev I.A. *Stroitel'noe materialovedenie* [Building materials]. Moscow: Vysshaia shkola, 2003. 701 p.
2. Antsiferov V.N. *Poroshkovoe materialovedenie: monografiia* [Powder material: monograph]. Ekaterinburg: Ural'skoe otделение Rossiiskoi akademii nauk, 2012. 456 p.
3. Cha S.I., Hong S.H. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2003, vol. 356, pp. 381-389.
4. Fang Z., Maheshwari P., Wang X., Sohn H.Y., Griffo A., Riley R. *Inter J. Refract. Metals and Hard Mater*, 2005. vol. 23, pp. 249-257.
5. Cha S.I., Hong S.H., Kim B.K. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2003, vol. 351, pp. 31-38.
6. Sivaprahasam D., Chandrasecar S.B., Sundaresan R. *Inter J. Refract. Metals and Hard Mater*, 2007, vol. 25, pp. 144-152.
7. Sun L., Jia C., LinCao R., Lin C. *Inter J. Refract. Metals and Hard Mater*, 2008, vol. 26, pp. 357-361.
8. Bykov Yu.V., Rybakov K.I., Semenov V.E. *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, 2001 vol. 34, pp. 55-75.
9. Panov V.S., Chuvilin A.M., Fal'kovskii V.A. *Tekhnologiia i svoistva spechennykh tverdykh splavov i izdelii iz nikh* [Technology and properties of sintered hard alloys and products from them]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo instituta Stalei i Splavov, 2004. 468 p.
10. Fang Z., Maheshwari P., Wang X., Sohn H.Y., Griffo A., Riley R. *Inter J. Refract. Metals and Hard Mater*, 2005, vol. 23, pp. 249-257.
11. Cha S.I., Hong S.H., Kim B.K. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2003, vol. 351, pp. 31-38.
12. Wu X.Y., Zhang W., Wang W., Yang F., Min J.Y. et al. *J. Mater. Res.*, 2004, vol. 19, pp. 2240-2244.
13. Sampath A., Stiglich J.J., Sudarshan J.S., Singh R., Choi K.S. *Powder Metal*, 2002, vol. 45, pp. 25-27.
14. Kim H.C., Oh D.Y., Shon I.J. *Inter J. Refract. Metals and Hard Mater*, 2004, vol. 22, pp. 197-203.
15. Kravchenko F., Pustovoit V.I., Churikov D.V. *Spekanie nanoporoshkov WC i WC-Co s razlichnymi ingibiruiushchimi dobavkami metodom elektroimpul'snogo plazmennogo spekaniia* [Sintering of nanopowders of WC and WC-Co with different inhibitory additives by the

method of electro-plasma sintering]. *Nauchnye vedomosti. Seriya Matematika, Fizika*, 2011, vol. 11, no. 103, pp. 623-627.

16. Gordeev Iu.I., Abkarian A.K., Lepeshev A.A. Vliianie dobavok legiruiushchikh keramicheskikh nanochastits na strukturnye parametry i svoistva tverdykh splavov [The influence of alloying additives ceramic nanoparticles on the structural parameters and properties of hard alloys]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva*, 2013, no. 3, pp. 174-181.

17. Zaitsev A.A. Razrabotka dispersno-uprochnennykh nanochastit-sami metallicheskih sviazok i tekhnologii polucheniiaalmazosoderzhashchikh segmentov dlia rezhushchego instrumenta [Development of dispersion-strengthened by nanoparticles of metallic contacts and technology of diamond segments for redusere tool]. *Avtoreferat dissertatsii na soiskanie kandidata tekhnicheskikh nauk po spetsial'nosti 05.16.06 Poroshkovaia metallurgii i kompozitsionnye materialy*. Moscow, 2009, 22 p.

18. Akarachkin S.A. Svoistva korundo-tsirkoniovoi nanokeramiki, poluchennoi iz plazmokhimicheskikh poroshkov metodami radial'nogo pressovaniia i iskrovogo plazmennogo spekaniia [Properties emery-Zirconia nanoceramics obtained from plasma powders by the radial pressing and spark plasma sintering]. *Avtoreferat dissertatsii na soiskanie stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk po spetsial'nosti Materialovedenie 05.09.02*. Tomsk, 2012. 22 p.

19. Tikhii G. A. Struktura, svoistva i tekhnologiiia polucheniia tugoplavkikhpseudosplavov W–Ni–Fe i Mo–Cu pri ispol'zovanii mekhanoaktivirovannoinanorazmernoiporoshkovoishikhty [Structure, properties, and technology of obtaining refractory pseudoalloys W–Ni–Fe and Mo–Cu when using mechanically activated nano-powder mixture]. *Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk*. Samara, 2008. 18 p.

20. Tikhii G.A., Belova V.P., Nikitin V.I. Issledovanie pseudosplava sistemy Mo–Cu, poluchennogo iz mekhanoaktivirovannoi shikhty [The study of pseudoplane system Mo–Cu obtained from mechanically activated charge]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 2007, no. 9, pp. 32–35.

Получено 06.05.2015

Анциферов Владимир Никитович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, академик РАН, научный руководитель Научного центра порошкового материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: director@pm.pstu.ac.ru.

Анциферова Ирина Владимировна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», «Менеджмент и маркетинг» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iranciferova@yandex.ru.

Antsiferov Vladimir (Perm, Russian Federation) – Akademik RAS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Center of Powder Material Science, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: director@pm.pstu.ac.ru.

Anciferova Irina (Perm, Russian Federation) – Doctor of Engineering, Professor, Department “Materials, Technologies and Design of Machines”, Department “Management and Marketing”, Perm National Research Polytechnic University, Scientific Center of Powder Material Science; e-mail: iranciferova@yandex.ru.