

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-3-113-121>

УДК 621.793

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ TiSiCN

Л. С. Баймолданова^{1,2*}, Б. К. Рахадиллов^{1,2}, М. Б. Баяндинова²

¹ Plasma Science LLP, Усть-Каменогорск, Казахстан

² Восточно-Казахстанский университет им. Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

* E-mail для контактов: lyazbs_82@mail.ru

В данной статье представлены результаты исследования влияния параметров механической активации на морфологические, термические и фазовые характеристики многокомпонентных порошков Ti+SiC и TiCN+Si, предназначенных для формирования функциональных покрытий методом реактивно-плазменного напыления (РПН). С применением методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), термогравиметрического анализа (ТГА) и рентгеновской дифракции (XRD) проведен всесторонний анализ изменений структуры и свойств порошков в зависимости от времени активации. Установлено, что оптимальное время активации составляет 60 минут, при котором достигается наилучшее сочетание характеристик: уменьшение размера частиц, снижение агломерации, повышение термической стабильности и образование фаз с высокой кристалличностью. Обнаружено, что такие условия активации способствуют синтезу новых функциональных фаз, что повышает реакционную способность и однородность композиции. Полученные результаты имеют прикладное значение при разработке наноструктурированных износ- и термостойких покрытий для изделий, эксплуатируемых в условиях высоких температур и механических нагрузок, особенно в таких отраслях, как машиностроение, энергетика и аэрокосмическая промышленность.

Ключевые слова: механическая активация, TiSiCN, карбонитридные покрытия, наноструктурированные материалы, реактивно-плазменное напыление.

ВВЕДЕНИЕ

Реактивно-плазменное напыление (РПН) представляет собой эффективную технологию получения функциональных покрытий, применяемых в различных отраслях промышленности – от машиностроения до микроэлектроники [1–4]. При этом эффективность процесса РПН в значительной степени определяется характеристиками исходных порошковых материалов. Одним из ключевых методов модификации этих характеристик является механическая активация, обеспечивающая структурные и энергетические изменения в порошках, способствующие повышению их реакционной способности.

Механическая активация заключается в интенсивном воздействии на порошковые системы, приводящем к измельчению частиц, увеличению удельной поверхности, внедрению дефектов в кристаллическую решетку и росту внутренней энергии. Эти изменения стимулируют протекание механохимических реакций в твердой фазе. Для описания кинетики таких процессов применяется модифицированное уравнение Аррениуса, учитывающее влияние локальных напряжений и активационного объема:

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a - \sigma V'}{RT}\right), \quad (1)$$

где k – скорость реакции; A – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации, σ – локальное напряжение, V' – активационный объем, R – универсальная газовая постоянная, T – температура. При низких температурах механический вклад становится

особенно значимым, обуславливая преимущественно атермический характер деформации и разрушения [5].

С точки зрения механохимии, разрыв даже одной ковалентной связи может высвободить энергию, значительно превышающую энергию этой связи, за счёт релаксации накопленной упругой энергии в молекулярной цепи. Прочность ковалентных связей может достигать порядка 1 ГПа, что подтверждается исследованиями в области наномеханики одиночных молекул [6].

Как показано в работах Макарова С.В. и Головнева И.Ф. [7, 8], под действием внешнего механического воздействия происходит переход системы в надбарьерное состояние, при котором наблюдается скачкообразный рост накопленной энергии и объема деформации. Это поведение связано с кооперативным перемещением атомов, сопровождаемым локальными фазовыми превращениями и нарушением упорядоченности.

Энергетическая диаграмма механохимических реакций отражает влияние внешнего напряжения на внутреннюю энергию системы: при его воздействии она возрастает до значений, превышающих энергетический барьер реакции [9, 10]. Это приводит к переходу системы в более стабильное термодинамическое состояние, сопровождаемое выделением энергии, что указывает на экзотермический характер процесса. В рамках неравновесной термодинамики, согласно концепции Берже [11], в процессе релаксации происходит адаптация межатомных расстояний к

определённому среднему значению на микроуровне, что ведёт к перестройке зеренной структуры на мезо- и макроуровне. Это явление подтверждено экспериментально при высокоэнергетическом измельчении в шаровых мельницах [12]. Таким образом, механическая активация – это не просто способ измельчения, а фундаментальный инструмент управления фазовыми превращениями, диффузией, дефектообразованием и термодинамикой порошковых систем [13–15]. Этот процесс способствует формированию аморфных и наноструктурированных состояний, улучшает параметры спекания и повышает активность твердофазных реакций. Особую актуальность механическая активация приобретает при подготовке порошков для синтеза композитных покрытий на основе нитридов и карбонитридов титана, таких как TiN, Ti(CN). Несмотря на их высокую твердость и износостойкость, такие покрытия характеризуются ограниченной окислительной стойкостью. Введение кремния в виде второй фазы (например, в TiSiN, TiSiCN) позволяет повысить термическую стабильность и сопротивление окислению [18–21].

Покрытия TiSiCN демонстрируют высокую твердость, низкий коэффициент трения, стойкость к окислению и коррозии, что делает их перспективными кандидатами для применения в агрессивных условиях аэрокосмической, автомобильной и морской промышленности [14, 22–23]. Использование механически активированных порошков Ti+SiC, TiCN+SiC и других систем позволяет существенно оптимизировать формирование покрытий в процессе РПН, улучшая их морфологические и эксплуатационные характеристики.

В данной статье рассматривается механическая активация порошков в мельнице Emax, которая отличается высокой эффективностью за счет использования центробежных сил. Целью исследования является анализ влияния параметров активации на физико-механические свойства порошков. Механическая активация – это процесс, при котором твердые вещества подвергаются интенсивному механическому воздействию, что приводит к изменению их структуры и свойств. Этот процесс часто используется для увеличения реакционной способности материалов, особенно порошков, за счет создания дефектов в кристаллической решетке, уменьшения размера частиц и увеличения удельной поверхности, происходит инициирование механо-химических реакций в твердой фазе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материалов использовали мелкодисперсный порошок Ti (марки ПТОМ-1), размер частиц 30 мкм, мелкодисперсный шлифовальный порошок SiC размер частиц 20 мкм, порошкообразный TiCN, каждый с чистотой 99,99% производства России, также порошки производства Китая TiCN, Si, размерами частиц 15–45 мкм. Всего было подготовлено 16 образцов, различающихся по составу порошков,

стране производства и времени активации. Образцы делились на четыре группы: Ti + SiC и TiCN + Si, с временем активации 0, 30, 60 и 90 минут при скорости вращения 1500 об/мин. Образцы изготавливались с использованием порошков российского и китайского производства. Порошки взвешивали в соответствии с требуемым составом покрытия, рассчитанным из сохранения стехиометрических атомно-массовых соотношений порошков. Образцы маркируются в соответствии с их составом и временем активации, как указано в таблице 1.

Таблица 1. Состав исследуемых порошков и параметры механической активации

№	Маркировка образцов	Состав порошка	Время активации, мин	Скорость вращения, об/мин
1	TiSiCN-1-1	Ti+SiC	0	не активирован
2	TiSiCN-1-2	Ti+SiC	30	1500
3	TiSiCN-1-3	Ti+SiC	60	1500
4	TiSiCN-1-4	Ti+SiC	90	1500
5	TiSiCN-4-1	TiCN+Si	0	не активирован
6	TiSiCN-4-2	TiCN+Si	30	1500
7	TiSiCN-4-3	TiCN+Si	60	1500
8	TiSiCN-4-4	TiCN+Si	90	1500

Механическое смешивание порошков проводили на высокоэнергетической шаровой мельнице Emax (Retsch, Германия) с водяным охлаждением в течение 2 часов при температурном режиме 23–27 °С. Соотношение массы шариков к массе загрузки (порошка) составляло 10:1. Порошки смешивали при скорости шаровой мельницы 1500 об/мин в течение 30, 60, 90 минут. Производилось тонкое измельчение порошков до размера менее 80 нм. Использование водяного охлаждения позволяет поддерживать стабильный температурный режим (23–27 °С), что снижает риск перегрева оборудования и, как следствие, уменьшает его износ. Такие возможности шаровой мельницы позволяют использовать методологию, связанную с взаимодействием импульсов высокой энергии (более 100 кэВ) с материалом, подвергнутым механоактивации и применяемым для создания будущего покрытия TiSiCN. Использовали метод узкого распределения частиц по размерам благодаря особому дизайну размольных стаканов, улучшающему перемешивание образца.

Микроструктуру и элементный состав, и размер синтезированных порошков Ti, SiC, TiCN, Si, TiC исследовали на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA3.

Термогравиметрический анализ (ТГА): Исследования проводили в диапазоне температуры 20–950 °С при скорости нагрева 10 °С/мин, в качестве промышленного газа использовался азот в установке (TGA-1250). Образцы взвешивали на микровесах и обжимали в керамической ювенте. Термограмма, т. е. график процентного соотношения в зависимости от температуры, был использован для изучения изменения

термостойкости порошка. Ошибка в регистрации термограмм составляла ± 2 °C.

Оценка пористости порошков проводилась на основе анализа СЭМ-изображений с использованием метода бинарной обработки изображений в программной среде ImageJ. Полученные микрофотографии были преобразованы в чёрно-белые маски, после чего рассчитывалась площадь пор и твёрдой фазы в процентном соотношении. Расчёт проводился с применением стандартной функции «Analyze Particles», учитывающей заданный порог яркости и масштаб изображения.

Фазовый анализ синтезированных порошков проводили на дифрактометре X'Per PRO. В дифрактометре обеспечивается возможность проводить измерения порошков с использованием CuK α -излучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология порошков (СЭМ)

На рисунке 1 представлены СЭМ-изображения исходных порошков титана (Ti) (а, б) и карбида кремния (SiC) (в, г) в разных масштабах, а на вставках их увеличенные фрагменты. На изображении (а) видна пористая структура порошка Ti с множеством мелких частиц и фрагментов. Некоторые области выглядят гладкими, в то время как другие имеют шероховатую поверхность. На изображении вставки видна более детализированная структура материала с пористыми и неровными поверхностями. На рисунке 1б размеры указаны для различных объектов и пор, что помогает определить их масштаб и сравнить их между собой. Некоторые области выглядят как крупные поры или пустоты, которые могут быть результатом природных процессов или технологических процедур. Эти поры и неровности могут влиять на свойства материала, такие как его прочность, пористость, и способность к адсорбции.

На рисунке 1 (в, г) порошки SiC демонстрируют четкие, угловатые частицы с грубыми поверхностями. Порошки SiC характеризуются остроугольной формой частиц с чётко выраженными гранями и неровной, зернистой поверхностью. Размеры частиц варьируются в пределах от 10 до 40 мкм, что подтверждается СЭМ-изображениями. Морфология частиц отличается выраженной угловатостью, с неправильной геометрией и высокой степенью анизотропии, что указывает на неоднородный характер измельчения и возможное наличие дефектов на кромках. Несмотря на это, общая структура SiC-порошка выглядит более однородной по сравнению с порошком титана, с преобладанием частиц, близких по форме к призматическим или тетраэдрическим. Такая форма частиц способствует увеличению удельной поверхности, что может положительно повлиять на активность при последующей механообработке и реактивно-плазменном напылении.

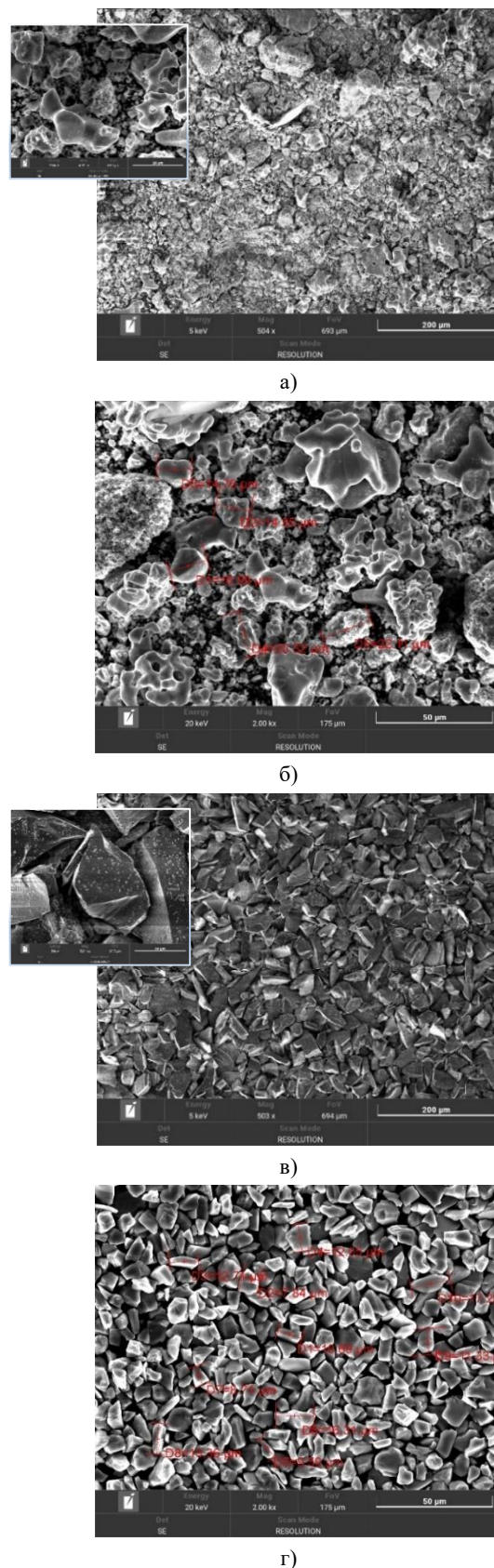
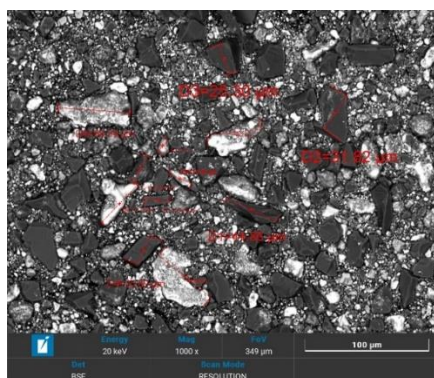
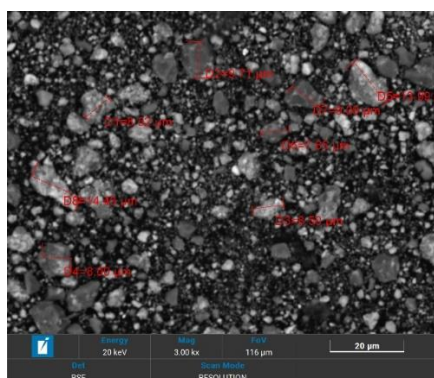


Рисунок 1. СЭМ-изображения исходных порошков титана Ti (а, б) и карбида кремния SiC (в, г) с размерами 200 и 50 мкм

На рисунке 2 представлены СЭМ-изображения порошков после активации Ti+SiC. Изображение (а) показывает аналогичную гетерогенную смесь частиц Ti и SiC с 30-минутной активацией и размером порошка Ti+SiC, где средний размер частиц составляет 31,8 мкм. Однако частицы выглядят менее спеченными и более четко отделенными друг от друга по сравнению с 60-минутной активацией. По текстуре видны более явные границы между частицами, а текстура поверхности показывает сочетание гладких и грубых областей. Изображение (б) показывает гетерогенную смесь частиц Ti и SiC после 60-минутной активации Ti+SiC, где средний размер частиц составляет 9,9 мкм. По текстуре частицы выглядят более компактными с комбинацией гладких и грубых областей, что указывает на частичное спекание или синтез во время активации. Масштабная линейка показывает 20 мкм, что указывает на то, что смесь состоит из частиц меньшего размера. Масштабная линейка изображения (20 мкм) позволяет визуально оценить, что после 60 минут активации большинство частиц имеют размер менее 10 мкм, а часть из них – существенно меньше.



а)

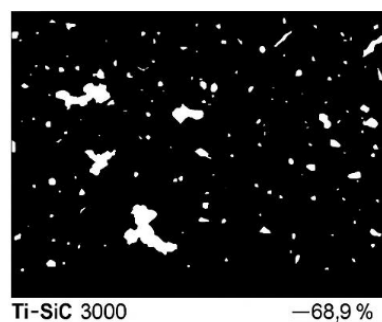


б)

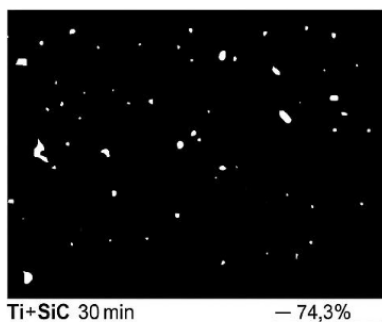
Рисунок-2. СЭМ-изображения порошков Ti+SiC после активации в течение 30 (а) и 60 минут (б)

Итак, смешанные порошки Ti+SiC демонстрируют выраженные изменения морфологии в зависимости от времени механической активации. На рисунке 3 представлены результаты бинарного анализа

СЭМ-изображений для оценки пористости порошков после 30 и 60 минут активации. При 30-минутной активации (масштаб $\times 1000$) наблюдается высокая степень пористости, составляющая $\sim 74,3\%$, с выраженными границами между частицами и значительным количеством межчастичных пустот. В то время как после 60 минут активации (масштаб $\times 3000$) наблюдается уплотнение структуры и снижение пористости до $\sim 68,9\%$. Частицы становятся более компактными, частично спеченными, с меньшими порами и более равномерным распределением твердой фазы. Эти результаты подтверждают, что увеличение времени активации способствует улучшению структурной однородности смеси и может положительно повлиять на свойства формируемого покрытия при РПН.



а)



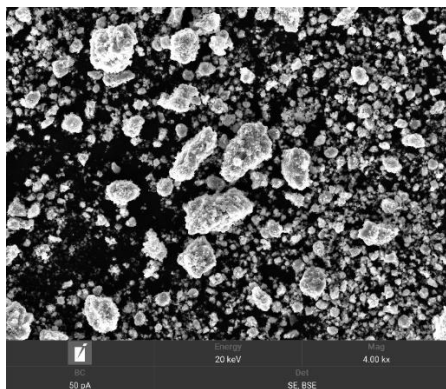
б)

Рисунок 3. Оценка пористости порошков Ti+SiC после механической активации в течение 30 (а) и 60 минут (б)

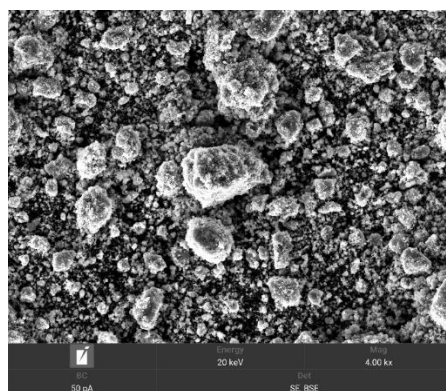
Частицы смеси Ti+SiC после активации демонстрируют гетерогенную структуру с различными размерами и формами частиц. Такая морфология может способствовать улучшению механических свойств покрытия, таких как твердость и износостойкость, но также может привести к неравномерному распределению материала при напылении.

Итак, смесь Ti+SiC может быть подходящей для реактивно-плазменного напыления благодаря ее высокой температурной устойчивости и возможности создания покрытий с хорошей адгезией и термоизоляционными свойствами. Однако, высокая пористость и гетерогенная структура могут потребовать дополнительных шагов по оптимизации параметров напыления и последующей обработки покрытия для достижения желаемых характеристик.

На рисунке 4 представлены СЭМ-изображения порошков TiCN+Si после механической активации в течение 30 (а) и 60 минут (б). Изображение (а) демонстрирует морфологию порошков после 30-минутной активации, при которой частицы TiCN приобретают относительно однородную и сглаженную форму, тогда как частицы кремния (Si) сохраняют более крупные размеры и выраженную гранулированную поверхность. Наблюдается тенденция к агломерации, преимущественно за счёт частиц Si, что может привести к неоднородности распределения компонентов при последующем формировании покрытия. Изображение (б) показывает структуру после 60-минутной активации, где наблюдается значительное уменьшение размера частиц, снижение степени агломерации и более равномерное распределение фаз TiCN и Si. Полученная морфология указывает на улучшение дисперсности системы и потенциальное повышение однородности напыляемого покрытия, а также улучшение его адгезионных и физико-химических характеристик.



а)



б)

Рисунок 4. СЭМ-изображения порошков TiCN+Si после активации в течение 30 (а) и 60 минут (б)

На изображении 4 (б) наблюдается дальнейшее измельчение частиц по сравнению с активацией в течение 30 минут. Размеры частиц становятся более однородными, уменьшается количество крупных агломератов. Частицы TiCN и Si лучше смешаны и

распределены, что способствует более равномерному нанесению покрытия при плазменном напылении. Размер частиц остается в диапазоне от 2 до 10 микрометров, что подходит для эффективного использования в реактивно-плазменном процессе.

Итак, сравнивая изображения 4 (а) и 4 (б) считаем, что активация в течение 60 минут является более оптимальной для использования порошков TiCN и Si в процессе реактивно-плазменного напыления. Продолжительная активация приводит к улучшению морфологии частиц, снижению агломерации и выравниванию их размера, что позволяет достичь более высокого качества покрытия.

На основании проведенных исследований по СЭМ можно заключить, что механическая активация в течение 60 минут является оптимальной для подготовки порошков для РПН. Более длительная активация приводит к улучшению морфологии частиц и их поверхностных свойств, что способствует формированию покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, такими как повышенная твердость, износостойкость и адгезия. А по составу порошков демонстрируют лучшие результаты после 60 минут активации.

Термогравиметрический анализ (ТГА)

Кривые ТГА многокомпонентной системы Ti+SiC, представлены на рисунке 5. Из рисунка было замечено, что участки плато показывают, что масса образца остаётся стабильной в определённом диапазоне температур или времени. А снижения массы (пики вниз), где происходит потеря массы образца может быть связано с деградацией, окислением, испарением компонентов или другими термическими процессами. Также стабилизация после потери массы указывает, что процесс завершился, и масса больше не изменяется в пределах данного диапазона температуры или времени.

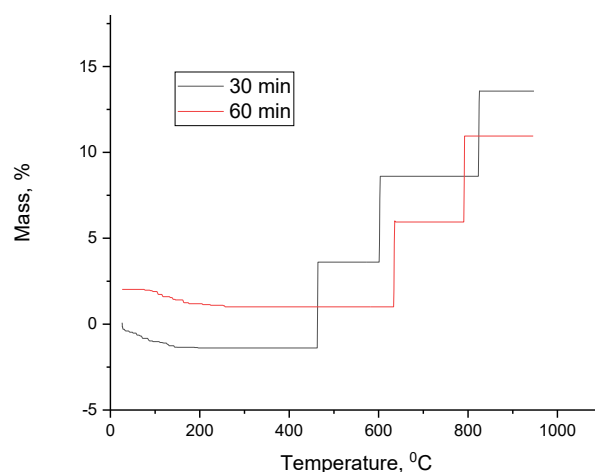


Рисунок 5. Кривые термогравиметрического анализа (ТГА) многокомпонентной системы (порошков) Ti+SiC по времени активации: 30 минут (а); 60 минут (б)

Начальная масса образцов перед термогравиметрическим анализом составляла 3,12 мг. На представленных ТГА-кривых изменения массы выражены в процентах от начальной массы образца. В первые 10 минут было незначительное изменение массы, связанное с начальной стабилизацией образца и удалением поверхностной влаги и летучих компонентов. Далее до 600 °C масса образца уменьшается из-за испарения адсорбированной влаги, в зависимости от температуры может начаться разложение легколетучих компонентов.

Образец, где активация была 60 минут, представлен красным цветом. В первые 10 минут было незначительное изменение массы, связанное с начальной стабилизацией образца и удалением поверхностной влаги и летучих компонентов. Далее с 47 минуты при температуре 670 °C образец переходит в другую фазу стабильности. Масса образца стабилизируется, указывая на завершение процесса синтеза. Температура поддерживается при 670 °C на определённом уровне, это указывает на временную стабилизацию массы.

К концу анализа образец достигает состояния стабильности, представляя остаточные продукты после термической обработки.

На рисунке 6 показаны результаты ТГА для многокомпонентной системы Ti+SiC при различной продолжительности активации: 30 минут (черная линия) и 60 минут (красная линия). В начальной стадии процесса (0–480 °C) замечено незначительное изменение массы для обеих кривых. Это связано с удалением адсорбированных газов и влаги с поверхности порошков. Черная линия показывает небольшое уменьшение массы, что связано с деградацией или окислением поверхности. Увеличение массы происходит ступенчато, что указывает на этапы реакции. Черная линия (30 минут активации) показывает более заметное увеличение массы на начальных стадиях, что может свидетельствовать о более активной реакции. Процесс синтеза наиболее активно реализуется в виде роста массы при температурах: 480 °C, 520 °C, 610 °C, 710 °C, 800 °C, 880 °C.

Красная линия (60 минут активации) показывает более плавное увеличение массы, что может свидетельствовать о более равномерной реакции или о том, что часть активных компонентов уже прореагировала на начальных стадиях. Следует отметить, что число этапов всего три: 500 °C, 610 °C, 880 °C. Важно отметить, что процессы, проходящие при температурах 500 °C, 610 °C, 880 °C характерны для обеих кривых, что свидетельствует о возможности формирования одинаковых продуктов реакций при перечисленных температурах.

По проведенному термогравиметрическому анализу для трех разных составов и времени активации, можно сделать вывод о том, что время активации существенно влияет на термическую устойчивость и реакционную способность порошков.

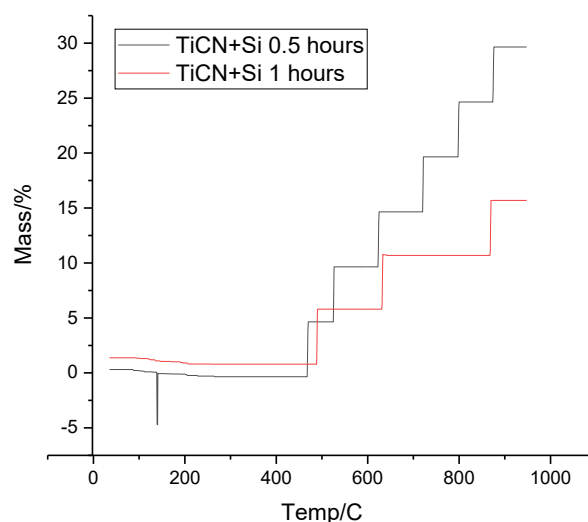


Рисунок 6. Кривые термогравиметрического анализа (ТГА) многокомпонентной системы (порошков) TiCN+Si по времени активации: 30 минут (а); 60 минут (б)

Рентгеноструктурный анализ

На основании рентгеновского анализа образцов, состоящих из систем на основе TiC, TiCN, получены важные данные о кристаллической структуре и фазовом составе.

На рисунке 7 представлена рентгенограмма порошка TiCN+Si, где интенсивности пиков отображены в зависимости от углов дифракции.

В ходе проведенного рентгеноструктурного анализа порошка TiCN+Si были получены данные, позволяющие сделать важные выводы о фазовом составе и кристаллической структуре исследуемого материала. Результаты показали, что образец состоит из нескольких фаз, каждая из которых играет свою роль в общем составе материала.

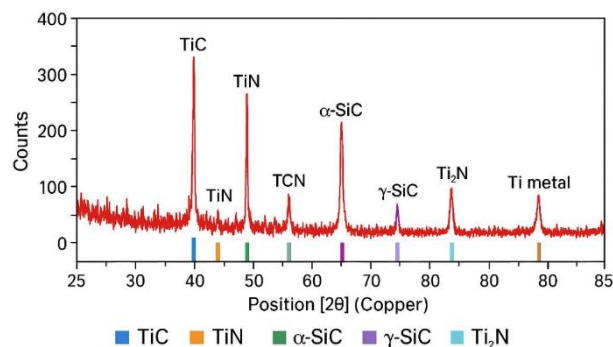


Рисунок 7. Рентгенограмма порошка TiCN+Si после 30 минут механической активации

Рентгеноструктурный анализ порошка TiCN+Si, активированного в течение 30 минут, подтвердил наличие комплекса фаз: TiC, TiN, TiCN, α-SiC, γ-SiC, Ti₂N и остаточного металлического титана. Основные фазы, такие как TiC, TiN и TiCN, обладают кубической решёткой типа NaCl (Fm-3m) и обеспечивают высокую твёрдость и химическую инертность.

Присутствие α - и γ -форм карбида кремния свидетельствует о термически стабильной и многофазной структуре, обеспечивающей термостойкость покрытия.

Высокая интенсивность дифракционных пиков, соответствующих TiC и TiN, указывает на их доминирование в составе. Фаза TiCN выявлена с высокой оценкой соответствия, что подтверждает протекание твердофазных реакций между компонентами смеси. Металлический титан и фаза Ti₂N обнаружены в умеренных количествах, но могут оказывать влияние на механические свойства – такие как пластичность, прочность и адгезия покрытия.

Представленные данные подтверждают многофазный характер материала. Комплексное наложение пиков делает интерпретацию рентгенограммы затруднённой без дополнительной расшифровки, которая реализована в виде подписей на рисунке и соответствующей таблицы фаз. Полученные результаты указывают на перспективность композиции TiCN+Si для применения в условиях высоких механических и термических нагрузок – например, в режущем инструменте, защитных покрытиях и компонентах с повышенной износостойкостью.

Эти результаты получены за счет механохимической обработки, на основании которой синтезируются новые неравновесные фазы, хорошо адаптированные друг к другу благодаря высокоэнергетическим воздействиям. На картинах рентгеновской дифракции видно, как различные фазы дают дифракционные максимумы практически на одних и тех же углах дифракции, что свидетельствует о смещении атомов в соседних зернах таким образом, чтобы эти зерна были адаптированы друг к другу на различных масштабных уровнях: ангстремы, десятки ангстрем, сотни ангстрем, микроны, десятки микрон и т.д. Это так называемый эффект «затягивания частот», который обсуждается в книге Берже «Порядок в хаосе» [11]. Основным результатом нашей работы является выявление возможности создания материалов, пригодных к использованию в процессе РПН для улучшения качества поверхности изделий.

Выводы

Проведённый комплексный анализ показал, что механическая активация порошковых систем на основе Ti, SiC, TiCN и Si оказывает значительное влияние на морфологические, фазовые и термические характеристики материалов.

Оптимальным временем механической активации во всех исследуемых системах признан интервал 60 минут, при котором достигается уменьшение размера частиц, снижение агломерации и улучшение однородности распределения компонентов, что подтверждено данными СЭМ.

Термогравиметрический анализ показал, что порошки, активированные в течение 60 минут, обладают повышенной термической стабильностью и демонстрируют меньшую степень деградации.

Благодаря этим характеристикам они представляют собой перспективный материал для эксплуатации в условиях высоких температур.

Рентгеноструктурный анализ активированных композиций показал наличие нескольких кристаллических фаз, включая TiCN, TiC, TiN, SiC и Ti₂N. После механической активации наблюдается повышение интенсивности и чёткости дифракционных пиков, что может свидетельствовать об упорядочивании структуры и росте степени кристалличности по сравнению с неактивированными образцами. Формирование комплексных карбонитридных фаз указывает на протекание твердофазных реакций и перекристаллизационных процессов в порошковой системе.

Составы Ti+SiC и TiCN+Si также показали высокую реакционную способность и удовлетворительные эксплуатационные свойства, что позволяет рассматривать их в качестве альтернативных материалов при создании защитных покрытий.

Полученные результаты имеют прикладное значение для разработки наноструктурированных и износостойких покрытий, применяемых в машиностроении, энергетике и аэрокосмической отрасли.

Благодарности

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19175967).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Y. Cheng, T. Browne, B. Heckerman, E. Meletis, Mechanical and tribological properties of nanocomposite TiSiN coatings // Surf. Coat. Technol. – 2010. Vol. 204. – P. 2123–2129.
2. D. Ma, S. Ma, K. Xu, Influence of Si content on Nanostructured Ti–Si–N films coated by pulsed-dc plasma enhanced CVD // Surf. Coat. Technol. – 2004. – Vol. 184. – P. 182–187.
3. F. Movassagh-Alanagh, A. Abdollah-zadeh, M. Aliofkhazraei, M. Abedi, Improving the wear and corrosion resistance of Ti–6Al–4V alloy by deposition of TiSiN nanocomposite coating with pulsed-DC PACVD // Wear. – 2017. – Vol. 390. – P. 93–103.
4. S. Abraham, E.Y. Choi, N. Kang, K.H. Kim, Microstructure and mechanical properties of Ti-Si-CN films synthesized by plasma-enhanced chemical vapor deposition // Surf. Coat. Technol. – 2007. – Vol. 202. – P. 915–919.
5. S. N. Zhurkov Kinetic Concept of the Strength of Solids // Intern. J. Fracture Mech. – 1965. – Vol. 1. – P. 311–323. <https://doi.org/10.1007/BF03545562>
6. М. К. Бейер и Х. Клаузен-Шауманн Механохимия: механическая активация ковалентных связей // Chemical Reviews. – 2005. – Vol. 105. – P. 2921. [M. K. Beyer i Kh. Klauzen-Shaumann Mekhanokhimiya: mekhanicheskaya aktivatsiya kovalentnykh svyazey // Chemical Reviews. – 2005. – Vol. 105. – P. 2921. (In Russ.)]
7. Макарова С.В. и Головнева И.Ф. Акустическая волновая корреляция элементарных деформационных актов при высокотемпературной деформации металлов и

- сплавов. Дисс. док. физ.-мат. наук.: 01.04.07. Макаров Сергей Викторович. Барнаул. 2016. [Makarova S.V., Golovneva I.F. Akusticheskaya volnovaya korrelyatsiya elementarnykh deformatsionnykh aktov pri vysokotemperaturnoy deformatsii metallov i spлавov. Diss. dok. fiz.-mat. nauk.: 01.04.07. Makarov Sergey Viktorovich. Barnaul. 2016. (In Russ.)]
8. Болдырев, В. В. Механохимия и механическая активация твердых веществ / В. В. Болдырев // Успехи химии. – 2006. – Т. 75. – № 3. – С. 203–216. [Boldyrev, V. V. Mekhanokhimiya i mekhanicheskaya aktivatsiya tverdykh veshchestv / V. V. Boldyrev // Uspekhi khimii. – 2006. – Vol. 75. – No. 3. – P. 203–216. (In Russ.)]
9. Зельдович, Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер, – М.: Физматлит. – 2008 – 656 с. [Zel'dovich, Ya.B. Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy / Ya.B. Zel'dovich, Yu.P. Rayzer. – Moscow: Fizmatlit. – 2008 – 656 p. (In Russ.)]
10. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Наноструктурные состояния в твердых телах // ФММ. – 2010. – Т. 110. – № 5. – С. 487–496. [Panin V.E., Egorushkin V.E. Nanostrukturnye sostoyaniya v tverdykh telakh // FMM. – 2010. – Vol. 110. – No. 5. – P. 487–496. (In Russ.)]
11. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности: Пер. с франц. – М.: Мир. – 1991. – 368 с., ил. ISBN 5-03-001804-2 [Berzhe P., Pomo I., Vidal' K. Poryadok v khaose. O deterministkom podkhode k turbulentnosti: Per. s frants. – Moscow: Mir. – 1991. – 368 p., il. (In Russ.)]
12. Л.С. Васильев, И.Л. Ломаев. Механизм аномального быстрого диффузионного массопереноса в пластически деформируемых наноструктурах металлов и сплавов // Вестник ТГУ. – 2010/ – Т.15, вып. 3. [L.S. Vasil'ev, I.L. Lomaev. Mekhanizm anomal'nogo bystrogo diffuzionnogo massoperenosa v plasticheski deformiruemykh nanostrukturakh metallov i spлавov // Vestnik TGU. – 2010. – Vol. 15, Issue 3.]
13. Yang, Sheng-Ming, Chang, Yin-Yu, Wang, Da-Yung, Lin, Dong-Yi and Wu, WeiTe. // Journal of Alloys and Compounds. – 2007. – Vol. 440. – P. 375–379.
14. Pogrebnjak A., Buranich V., Ivashchenko V., Baimoldanova L., Rokosz K., Raaen S., Zukowski P., Opielak M., Rakhadilov B., Beresnev V., Erdybaevaba N. The Effect of Substrate Treatment on the Properties of TiAlSiYN/CrN Nanocomposite Coatings // Surfaces and Interfaces. – 2022. – Vol. 30. 101902.
15. S.L. Ma, D.Y. Ma, Y. Guo, B. Xu, G.Z. Wu, K.W. Xu, P.K. Chu, Synthesis and characterization of super hard, self-lubricating Ti–Si–C–N nanocomposite coatings // Acta Mater. – 2007. – Vol. 55. – P. 6350–6355. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.07.046>
16. Y. Wang, J. Li, C. Dang, Y. Wang, Y. Zhu, Influence of carbon contents on the structure and tribocorrosion properties of TiSiCN coatings on Ti6Al4V // Tribol. Int. – 2017. – Vol. 109. – P. 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.01.002>
17. Y. Wang, J. Li, C. Dang, Y. Wang, Y. Zhu, Influence of bias voltage on structure and tribocorrosion properties of TiSiCN coating in artificial seawater // Mater. Char. – 2017. – Vol. 127. – P. 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.03.012>
18. J. Li, Y. Wang, Y. Yao, Y. Wang, L. Wang, Structure and tribological properties of TiSiCN coating on Ti6Al4V by arc ion plating // Thin Solid Films. – 2017. – Vol. 644. – P. 115–119. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.09.053>
19. L. Johnson, L. Rogstro'm, M. Johansson, M. Od'en, L. Hultman, Microstructure evolution and age hardening in (Ti, Si)(C, N) thin films deposited by cathodic arc evaporation // Thin Solid Films. – 2010. – Vol. 519. – P. 1397–1403. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.08.150>
20. Dong Yanchun, Yan Dianran, He Jining, Zhang Jianxin, Xiao Lisong, and Li Xiangzhi. Studies on Nanocrystalline TiN Coatings Prepared by Reactive Plasma Spraying // Nanomechanics and Nanostructured Multifunctional Materials: Experiments, Theories, and Simulations. – Vol. 2008. – Issue 1. – Art. ID 690951. <https://doi.org/10.1155/2008/690951>
21. Yang, Sheng-Ming, Chang, Yin-Yu, Wang, Da-Yung, Lin, Dong-Yi and Wu, WeiTe // Journal of Alloys and Compounds. – 2007. – Vol. 440. – P. 375–379.
22. I. Endler, M. Höhn, J. Schmidt, S. Scholz, M. Herrmann, M. Knaut, Ternary and quaternary TiSiN and TiSiCN nanocomposite coatings obtained by chemical vapor deposition // Surf. Coat. Technol. – 2013. – Vol. 215. – P. 133–140.
23. Smyrnova K.V., Bondar O.V., Borba-Pogrebnjak S.O., Kravchenko Ya.O., Beresnev V.M., Zhollybekov B., Baimoldanova L. The microstructure and mechanical properties of (TiAlSiY)N nanostructured coatings // 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP 2017). – Vol. 2. – P. 01FNC13-1-01FNC13-4.

**TiSiCN НЕГІЗІНДЕГІ ФУНКЦИОНАЛДЫ ҚАПТАМАЛАРДЫ ҚАЛЫПТАСТЫРУ ҮШІН
МЕХАНИКАЛЫҚ АКТИВАЦИЯ ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ**

Л. С. Баймолданова^{1,2*}, Б. К. Рахадиллов^{1,2}, М. Б. Баяндинова²

¹ *Plasma Science ЖШС, Өскемен, Қазақстан*

² *Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан*

* Байланыс үшін E-mail: lyazbs_82@mail.ru

Бұл мақалада реактивті-плазмалық бүрку (РПБ) әдісі арқылы функционалды жабындар алу мақсатында қолданылатын көпкомпонентті Ti+SiC және TiCN+Si ұнтақтарының морфологиялық, термиялық және фазалық сипаттамаларына механикалық активация параметрлерінің әсері зерттелді. Сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ), термогравиметриялық талдау (ТГА) және рентгендік дифракция (XRD) әдістері арқылы активация уақытына байланысты ұнтақтардың құрылымы мен қасиеттеріндегі өзгерістер жан-жақты талданды. Зерттеу нәтижелері бойынша, ең тиімді активация уақыты 60 минут екені анықталды. Бұл уақытта бөлшек өлшемі кішірейіп, агломерация азайып, термиялық тұрақтылық артып, жоғары кристалдық фазалар түзіледі. Мұндай активация шарттары жаңа функционалды фазалардың түзілуіне ықпал етіп, композицияның реакциялық қабілетін және біртектілігін арттыратыны көрсетілді. Алынған нәтижелер жоғары температура мен механикалық жүктемелер жағдайында жұмыс істейтін бұйымдарға арналған тозуға және температураға төзімді наноқұрылымды қаптамаларды әзірлеуде практикалық мәнге ие. Бұл әсіресе машина жасау, энергетика және аэроғарыш өнеркәсібі сияқты салаларда маңызды.

Түйін сөздер: механикалық активация, TiSiCN, карбонитридті жабындар, наноқұрылымды материалдар, реактивті-плазмалық бүрку.

**OPTIMIZATION OF MECHANICAL ACTIVATION PARAMETERS FOR THE FORMATION
OF FUNCTIONAL COATINGS BASED ON TiSiCN POWDERS**

L. S. Baimoldanova^{1,2*}, B. K. Rakhadilov^{1,2}, M. B. Bayandinova²

¹ *Plasma Science LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

² *Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

* E-mail for contacts: lyazbs_82@mail.ru

This article presents the results of a study on the influence of mechanical activation parameters on the morphological, thermal, and phase characteristics of multicomponent Ti+SiC and TiCN+Si powders intended for the formation of functional coatings via reactive plasma spraying (RPS). A comprehensive analysis of the structural and property changes of the powders depending on activation time was carried out using scanning electron microscopy (SEM), thermogravimetric analysis (TGA), and X-ray diffraction (XRD). It was established that the optimal activation time is 60 minutes, at which the best combination of characteristics is achieved: reduction in particle size, decreased agglomeration, enhanced thermal stability, and formation of highly crystalline phases. These activation conditions were found to promote the synthesis of new functional phases, increasing the reactivity and homogeneity of the composite. The obtained results have practical significance for the development of nanostructured wear- and heat-resistant coatings for components operating under high temperatures and mechanical loads, particularly in industries such as mechanical engineering, energy, and aerospace.

Keywords: mechanical activation, TiSiCN, carbonitride coatings, nanostructured materials, reactive plasma spraying.