

В.Д. Гончаров, канд. техн. наук, В.И. Яковлев, канд. техн. наук,  
А.А. Ситников, д-р техн. наук, А.В. Собачкин,  
М.Н. Сейдуров, канд. техн. наук, Барнаул, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ ИЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СВС-МЕХАНОКОМПОЗИТОВ

*Работа посвящена актуальной теме получения износостойких электродуговых покрытий из синтезированных порошковых наноструктурированных композиционных материалов нового класса методом механически активированного высокотемпературного синтеза. Рассмотрены приемы получения механоактивационной попередней обработки порошковых смесей в планетарной шаровой мельнице АГО-2 и высокотемпературного синтеза в механоактивированном прекурсоры. Выведено характер зносу важконавантажених виробів, наплавлених електродуговим способом експериментальним порошковим електродом. Встановлено, що введення в поверхневий шар наплавленого покриття синтезованих високотвердих часток (карбідів металів) за допомогою порошкових електродів з СВС-матеріалів істотно підвищує зносостійкість наплавленого шару.*

*Ключові слова: механоактиваційна обробка, порошкова суміш, високотемпературний синтез (СВС), композиційний наноструктурований матеріал, порошковий електрод, електродугове наплавлення.*

*Работа посвящена актуальной теме получения износостойчивых электродуговых покрытий из синтезированных порошковых наноструктурированных композиционных материалов нового класса методом механически активированного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Рассмотрены приемы получения механоактивационной предварительной обработки порошковых смесей в планетарной шаровой мельнице АГО-2 и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в механоактивированных прекурсорах. Изучен характер износа тяжело нагруженных изделий, наплавленных электродуговим способом экспериментальным порошковым электродом. Установлено, что введение в поверхностный слой наплавленного покрытия синтезированных высоко твердых частиц (карбидов металлов) с помощью порошковых электродов из СВС-материалов существенно повышает износостойкость наплавленного слоя.*

*Ключевые слова: механоактивационная обработка, порошковая смесь, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), композиционный наноструктурированный материал, порошковый электрод, электродуговая наплавка.*

*The work is devoted to the vital topic of obtaining wear-resistant coatings elektrodugovykh powder synthesized nanostructured composite materials using a new class of mechanically activated self-propagating high temperature synthesis. We consider methods of obtaining mekhanooaktivatsionnyy pre-processing of powder mixtures in a planetary ball mill АГО-2 and self-propagating high-temperature synthesis of mechanically activated precursors. The character of wear heavy-duty products, clad electric arc method experimental powder electrode. It is established that the introduction of the surface layer of the deposited coating synthesized of very hard particles (carbides) with electrodes made of powder SHS materials significantly increases the wear resistance of the deposited layer.*

*Keywords: mekhanooaktivatsionnaya processing, powder mixture, self-propagating high temperature synthesis (SHS) nanostructured composite material, powdered electrode arc welding*

рых другими известными способами требует больших затрат и/или сложного дорогостоящего оборудования либо вообще невозможно.

Эффективным средством, позволяющим целенаправленно влиять на структурное состояние реакционной шихты и параметры СВС, обеспечивая тем самым возможность регулирования механизмов фазо- и структурообразования материалов в процессе синтеза, а также воспроизводимость результатов, является предварительная механоактивационная обработка.

Новым является метод механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, основанный на сочетании механоактивации и СВС и представляющий собой двустадийный процесс. На первом этапе реакционная шихта обрабатывается в течение сравнительно короткого времени в энергонапряженном аппарате – активаторе, на втором – используется в качестве реакционной смеси для СВС.

Известно, что в основе СВС лежит использование тепла, которое выделяется в ходе экзотермической реакции взаимодействия реагентов. СВС представляет собой типичный неизотермический процесс, характеризующийся экстремальными условиями синтеза: высокими скоростями нагрева исходных компонентов ( $10^3 - 10^6$  град/с), резким градиентом температуры (до  $10^5$  К/см), высокими температурами (до 4000 К) и малыми временами синтеза (от долей секунд до нескольких минут).

В зависимости от условий СВС может протекать в двух режимах: сплошного горения и объемного теплового взрыва. Например, в режиме сплошного горения химическая реакция после ее локального инициирования самопроизвольно перемещается по веществу в виде узкой зоны (волны горения). Тепло, подводимое к поверхности образца, прогревает поверхностный слой и инициирует экзотермическую реакцию. Вблизи поверхности формируется фронт горения, который начинает самопроизвольно распространяться вдоль образца. Температура в волне горения изменяется от начальной до максимальной за счет тепловыделения химических реакций температуры горения. Температура горения играет ключевую роль в протекании процесса СВС и формировании конечных продуктов горения. Также известно, что СВС в многокомпонентных системах позволяет получать сложные легированные соединения. Дополнительное использование механоактивации существенно расширяет возможности таких материалов.

Следует отметить, что механоактивация позволяет модифицировать условия протекания СВС-процессов. Вопросам экспериментального исследования механоактивации на параметры СВС посвящено большое количество публикаций. Большинство авторов в качестве основных видов воздействия механоактивации на СВС отмечают существенное снижение температуры и времени начала взаимодействия реагентов, увеличение скорости химических реакций и повышение полноты превращения для активированных систем. Кроме того, механоактивация позволяет существенно изменить величину и

Сверхнормативная изношенность (до 80%) оборудования предприятий, и как следствие грядущий кризис из-за остановки выработавших свой ресурс установок, возможность техногенных катастроф во многом могут быть предотвращены в результате использования методов получения покрытий, как одной из самых эффективных ремонтных технологий, обеспечивающих полное восстановление геометрии и работоспособности большинства изношенных деталей.

Электродуговая наплавка занимает прочные позиции в производстве и реновации деталей машин и механизмов различных отраслей промышленности. В результате наплавки при изготовлении деталей можно получить рабочую поверхность, обладающую необходимым комплексом свойств: износостойкостью, термостойкостью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью и т.п. При ремонте наплавка позволяет восстановить первоначальные размеры и эксплуатационные свойства деталей. В настоящее время возрастает актуальность использования восстановленных деталей при ремонте автомобилей, автотракторной и сельскохозяйственной техники, пищевого и промышленного оборудования. Используя наплавку, можно уменьшить расход металла на изготовление запасных частей оборудования. При восстановлении изношенных деталей затраты на материалы и количество технологических операций сокращается в 5 – 8 раз, что по сравнению с изготовлением новых деталей способствует экономии металла, топливно-энергетических и других природных ресурсов.

При этом за счет модифицирования поверхности детали, можно значительно увеличить срок службы оборудования в целом, что особенно важно, если от надежности и долговечности последнего зависит работа высокопроизводительного оборудования, а замена таких деталей связана с длительными простоями агрегатов. Этим обусловлена большая экономическая и техническая эффективность наплавки в практически любой отрасли машиностроения.

Одним из перспективных методов получения порошковых материалов для защитных покрытий является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС).

В основе метода СВС лежит реакция экзотермического взаимодействия двух или нескольких химических элементов, протекающая в режиме направленного горения после локального инициирования процесса.

Специфическое преимущество СВС-процессов заключается в отсутствии или существенном снижении энергозатрат за счет использования экзотермического эффекта реакций и в высокой скорости синтеза. Благодаря таким особенностям СВС, как высокая температура, превышающая в большинстве случаев температуру плавления хотя бы одного из реагентов, высокая скорость внутреннего саморазогрева, протекание реакций в условиях резкого градиента температур, метод позволяет получать материалы с повышенными свойствами, а в ряде случаев удается синтезировать композиции, получение кото-

характер тепловыделения, температуру и скорость горения, а также механизм и кинетику процессов взаимодействия компонентов (условия протекания химических реакций и их стадийности).

Обычно при изучении влияния механоактивации на гетерогенные реакции авторами рассматриваются два типа воздействия, которые условно можно обозначить как микроструктурные и энергетические. Микроструктурные воздействия сводятся к измельчению реагентов и увеличению площади контакта между ними, что приводит к ускорению реакции. Энергетические воздействия связываются с аккумулярованием дополнительной энергии в кристаллической решетке вследствие накопления остаточных упругих или пластических деформаций при механическом воздействии. Во многих случаях микроструктурные и энергетические аспекты действуют совместно, и различить их сложно. Влияние механоактивации на параметры СВС объясняют влиянием дефектов кристаллического строения и соответствующей энергии, накопленных в металле при периодической пластической деформации во время механоактивации, а также снижением эффективной энергии активации реакции при последующем нагреве в волне СВС.

Следует отметить, что СВС-реакцию можно проводить и с использованием «инертных» в химическом плане добавок (матриц), при использовании которых реакция синтеза предварительно механоактивированных веществ происходит в объеме этой матрицы. Подобные добавки являются эффективным средством управления процессом формирования структуры синтезируемого композита. «Инертные» матрицы, не меняющие состав конечных продуктов, снижают температуру и скорость горения и приводят к сильному модифицированию структуры СВС-материалов (существенно уменьшается размер зерна, повышается однородность структуры). Это связано с тем, что, выполняя функции разбавителя (поскольку в продуктах реакции не обнаружено соединений исходных реагентов с материалом матрицы) матрицы одновременно являются дополнительными центрами кристаллизации на ранней стадии структурообразования, способствуя процессу гетерогенного зародышеобразования уже на стадии первичного структурообразования. При этом тормозятся процессы рекристаллизации и роста зерен в волне горения. Дополнительное использование механоактивации не только обеспечивает равномерное распределение реагирующих частиц по объему матрицы, но и влияет на морфологию и дефектность структуры порошковых смесей.

В общем случае продукт механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза характеризуется более тонкой (с наноразмерными включениями) и гомогенной структурой при повышенной глубине превращения по сравнению с СВС-продуктами без использования механоактивации. При этом в зависимости от типа активатора и режима механообработки можно существенно менять как механизм процесса, так и фазовый состав получаемого продукта. Кроме того, особенности взаимодействия

вия реагентов в механоактивированных материалах (снижение температуры и увеличение скорости химического реагирования) обеспечивает возможность проведения процесса на воздухе без окисления. При этом механоактивация позволяет получать методом СВС легированные материалы с повышенной концентрацией легирующих элементов (выше значения предельной растворимости). Исходные порошки в зависимости от способа получения могут иметь различную форму частиц – от правильной глобулярной до осколочной. Однако после обработки порошковой смеси в активаторе ее частицы приобретают характерную осколочную форму, а в целом смесь представляет собой слоистый композит. Выполнено исследование образцов композита с помощью методики растровой электронной микроскопии (РЭМ), результаты которой приведены на рис. 1.

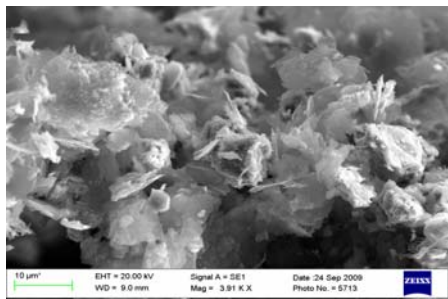


Рисунок 1 – РЭМ-изображение порошковой смеси исходного механокомпозита после обработки в активаторе

Термограмма проведения СВС-реакции была получена с использованием микротермопар типа ВР-5/20 и с помощью АЦП и компьютерной программы (рис. 2).

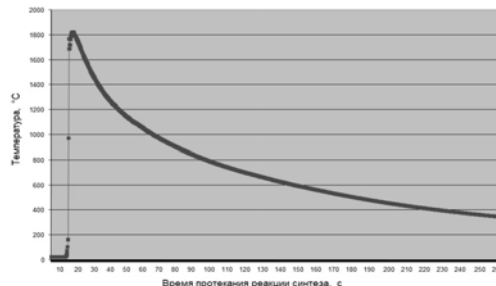


Рисунок 2 – Термограмма СВ-синтеза карбида титана в никель-хромовой матрице

Результаты РЭМ-анализа приведены на рисунке 3.

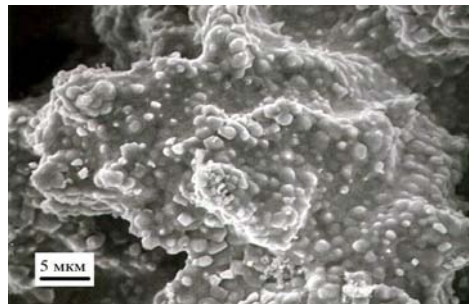


Рисунок 3 – SEM-изображение продукта СВС-реакции

С целью выявления рациональных режимов ручной дуговой наплавки порошковым электродом были выполнены практические испытания с построением ВСХ – внешней статической (вольт-амперной) характеристики. При этом проверялось пять показателей сварочных свойств: начальное зажигание дуги, стабильность процесса наплавки, разбрызгивание металла, качество формирования шва, эластичность дуги. Исследования проводили с помощью сварочного выпрямителя марки ТИТАН-ВС-220А на постоянном токе обратной полярности. Экспериментальные порошковые электроды с содер-

жением TiC+PR-H70X17C4P4-3 (X % масс.) – СВС-механокомпозит имели степень содержания (разбавления) металла матрицы от 80 %, 70 % и 60 %.

Для построения ВСХ сварочного выпрямителя применялись измерительные клещи марки АРРА-А16 и балластный реостат РБ-302У2 (1...4 шт.). При подключении сварочного выпрямителя к балластному реостату устанавливали величину номинального тока. Замер значения тока проводили в течение 2 мин. (отклонение тока от номинального не превышало 5 %).

Затем для определения пределов регулирования сварочного тока выполняли изменение тока от минимального до максимального значения с замером тока. При определении напряжения холостого хода и номинального рабочего напряжения производили замеры напряжения на клеммах источника без нагрузки и под нагрузкой.

Для оценки вида ВСХ при подключении активной нагрузки к выходным клеммам выпрямителя определялись соответствующие значения тока и напряжения.

Серия экспериментов позволила определить вид ВСХ с оценкой рабочего диапазона наплавки порошковым электродом (рис. 4).

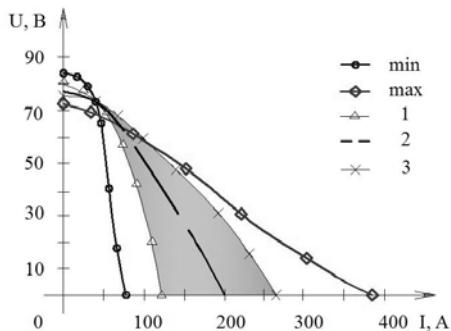


Рисунок 4 – Внешняя статическая характеристика с указанием рабочего диапазона наплавки порошковым электродом: min – минимальный сварочный ток, max – максимальный сварочный ток. В затемненной области: 1, 2, 3 – семейство ВСХ для наплавки порошковыми электродами со степенью разбавления металлом матрицы от 80 %, 70 % и 60 %, соответственно

Вторая серия экспериментов была выполнена при наилучших показателях сварочных свойств (согласно РД 03-614-03), а именно: начальное зажига-

ние дуги – легкое, стабильность процесса наплавки – высокая, разбрызгивание металла – малое, качество формирования шва – очень хорошее, эластичность дуги – высокая.

Таким образом, подобранные режимы по сварочному току от 230 до 254А являются наиболее рациональными для наплавки экспериментальными порошковыми электродами диаметром 5 мм с содержанием TiC+PR-H70X17C4P4-3 (X % масс.) – СВС-механокомпозит со степенью разбавления металлом матрицы от 80 %, 70 % и 60 %.

При исследовании общей структуры покрытий применялось химическое травление 3 % раствором азотной кислоты в этиловом спирте, а при исследовании тонкой структуры покрытий применяли химическое травление в течение 5 мин. водным раствором 20 % красной кровяной соли  $K_3[Fe(CN)_6]$  и 20 % КОН. Для определения общего характера внутреннего строения матрицы СВС-механокомпозитов микрошлифы подвергались электрохимическому травлению раствором 15 % хлорной кислоты в уксусной кислоте «ледянке» (время травления 30 с; источник постоянного тока, напряжение 3 В).

Анализ показал, что по мере уменьшения степени разбавления СВС-механокомпозита состава TiC+X % Me (P6M5, PR-H70X17C4P4-3) металлом матрицы значительно возрастает количество крупных карбидных частиц различной формы, выделяющихся внутри зерна (рис. 5). Использование при наплавке матрицы типа TiC+P6M5 (X % масс.) приводит к выпадению мелких карбидов по границам в виде сетки.

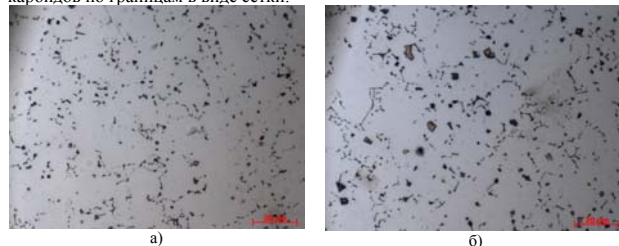


Рисунок 5 – Микроструктура наплавленного металла из порошков СВС-механокомпозитов состава TiC+P6M5 (X % масс.): а – 60; б – 20

В качестве оборудования для исследования износостойкости наплавки использовалась машина трения, предназначенная для испытаний различных фрикционных и смазочных материалов на трение и износ с максимальным моментом трения 40 Н·м и максимальной частотой вращения шпинделя 3000 мин<sup>-1</sup>.

Для выбора параметров испытаний использовался ГОСТ 17367-71 «Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы».

Исследования проводились с использованием специально изготовленных образцов представляющих собой гладкие цилиндрические образцы соответствующих размеров. В качестве абразивного материала был выбран диск, который изготавливался из абразивной листовой шкурки марки Л2Э620×50С115А25-ВМА ГОСТ 6456-82. В качестве абразивного материала использован электрокорунд нормальный А15 зернистостью 25 (ГОСТ 3647-71).

Результаты испытаний по определению весового износа наплавленных покрытий в зависимости от степени разбавления металла матрицы карбидами представлены в таблице и на рисунке 6.

Таблица – Результаты исследования износостойкости наплавленных покрытий

Серия испытаний	Степень разбавления металлом матрицы, % масс			Сравнительное испытание (сталь 45)
	90	80	70	
	Весовой износ, г			
1	0,0487	0,0523	0,0372	0,2581
2	0,0391	0,0341	0,0259	0,2422
3	0,0471	0,0382	0,0228	0,2329
4	0,0464	0,0302	0,0132	0,2174

По результатам исследования износостойкости установлено, что наплавленные дугowym способом покрытия из порошков СВС-механокомпозиатов, обеспечивает повышение износостойкости и твердости покрытия.

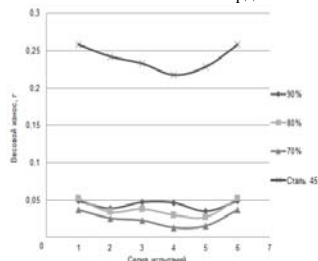


Рисунок 6 – Весовой износ наплавленных образцов

**Выводы:**

По итогам работы можно сделать вывод, что метод механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза позволяет

создавать и использовать порошковые СВС-материалы в качестве материала порошкового электрода (проволоки). Использование порошковых электродов для электродуговой наплавки обеспечивает структуру наплавленного слоя с равномерным распределением упрочняющего карбидного зерна по объему наплавки.

Таким образом, применяемый способ повышения износостойкости с помощью порошковых электродов из СВС-материалов позволит существенно (в 3-5 раз) увеличить срок службы быстрознашивающихся деталей и узлов (рабочих органов сельскохозяйственной техники, например стрелчатых лап культиваторов и сеялок).

**Список использованных источников:** 1. Влияние механической активации исходных компонентов на СВС сплайдов нитибы / О. А. Шкода, О. Г. Терехова, Л. Д. Чалых // Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: материалы и технологии. Новосибирск: Наука, 2001. С. 216-221. 2. Реновация деталей металлургического оборудования наплавкой / Ф. П. Каченко, А. И. Белыев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 3-6. 3. Перспективные способы наплавки и механической обработки восстанавливаемых деталей / А. В. Иванов, О. Л. Пирозерская // Техно-технологические проблемы сервиса. 2010. № 3 (13). С. 7-9. 4. Влияние механоактивации на процессы фазо- и структурообразования при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе / Н. З. Ляхов, Т. Л. Такао, Т. Ф. Григорьева. Новосибирск: Параллель, 2008. 168 с. 5. Структура и свойства наплавленных электродугowych покрытий из порошков механоактивированных СВС-композиатов / А. А. Ситников, В. И. Яковлев, М. Н. Сейдуров и др. // Обработка металлов. 2011. № 3 (52). С. 51-54. 6. Интегральные технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / В. В. Евстигнеев, Б. М. Вольпе, И. В. Милова и др. М.: Высшая школа, 1996. 284 с. 7. Покрытия из механоактивированных СВС-материалов для рабочих органов сельскохозяйственных машин, наплавленные ручным дугowym способом / А. А. Ситников, В. И. Яковлев, А. В. Собачкин и др. // Ползуновский вестник. 2012. № 1/1. С. 273-277. 8. Людоговский А. В. Газотермическое напыление покрытий: учебное пособие. М.: РГОТУПС, 2006. 43 с. 9. Собачкин А. В. Структура износостойких покрытий из порошков СВС-механокомпозиатов, наплавленных ручным дугowym способом // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. С. 182-184. 10. Износостойкие покрытия из СВС-материалов, наплавленные порошковым электродом / А. В. Собачкин, А. А. Ситников, В. И. Яковлев // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 10-ой Всероссийской научно-практической конференции. Новосибирск: Издательство Новосибирского государственного технического университета, 2012. С. 199-203.

Поступила в редакцию 24.05.2012

УДК 621.91

А.И. Грабченко, д-р техн. наук, В.А. Фадеев, д-р техн. наук,  
Харьков, Украина

**О СИСТЕМАХ МИКРО- И НАНОРЕЗАНИЯ**

*Рассмотрено понятие, структура и особенности систем микро- и нанорезания, сравнение их с конвенциональными системами резания, предложено классифицировать уровни систем нанорезания по содержанию в них количества нанообъектов.*

*Розглянуто поняття, структуру і особливості систем мікро- та нанорезання, порівняння їх з конвенціональними системами різання, запропоновано класифікувати рівні систем нанорезання по наявності в них кількості нанооб'єктів.*

*The concept, structure and systems, especially micro-and nanorezaniya, comparing them with the Conventional system Mami cut, asked to classify the levels of systems nanorezaniya in their content of nano-objects.*

Развиваясь и познавая окружающую природу, человечество прежде всего обращало внимание на предметы и явления макромира. Когда пришло время, характеризующее бурным развитием инструментов познания, методов и средств моделирования, всепроникающего значения информационных технологий, ученые и работники различных отраслей производства, медицины, бизнесмены, аграрии и т.д. обращают свои взоры на объекты, различные эффекты и явления в нанометрической области (до 100 нм). Сегодня уже идет речь о практическом использовании нанотехнологий, являющихся междисциплинарным направлением, в комплексе охватывающем различные разделы науки и практики в области физики, механики, химии, биологии, электроники и т.д., для решения глобальных проблем, встающих перед человечеством [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. В соответствие с этим появилось множество новых терминов и понятий с приставкой «нано», используемой в значении «относящейся к нанодиапазону» материального мира: нанообъекты, нанокристалл, нанокластер, наноструктура, наносистема, наноматериалы, наноструктурированный материал, наноаука и др. [9, 10, 11, 12, 13].

Элементарными объектами нанотехнологии (наномасштабными, наноразмерными элементами), позволяющими искусственно конструировать функциональные материалы с заранее заданными свойствами и структурой, являются атомы, молекулы, атомные кластеры и частицы, нанопорошки, нанослойные покрытия, нанотрубки и нанотрубки, квантовые ямы, проволоки, точки и др.

В зависимости от предельно достижимой точности, которая обеспечивается рассматриваемыми процессами резания, их делят на традиционные (конвенциональные) – (с размерами от 100 мкм до 5 мкм), прецизионные (от 10 до 0,5 мкм), ультрапрецизионные (до 0,001 мкм). Следующий диапазон для микро- и нанорезания приближается к предельным теоретическим значениям, ограничением которых являются размеры молекул или атомов вещества (0,2-0,3 нм).

Понятие микрообработки предполагает реализацию различных процессов разделения материала режущим лезвием или модификациями этих процессов в микрометрическом диапазоне (от 1 мкм до 999 мкм), слишком малом для обработки традиционным резанием [14].

В отличие от конвенциональных процессов резания микро- и микрообработка ориентирована на новейшие технологии, которые базируются на изменении структуры молекул или материалов в нанометрическом диапазоне. В ряде случаев реальное удаление (съем) материала ограничивается приповерхностным слоем, толщина которого может составлять всего лишь несколько атомов или атомных слоев.

Таким образом, нанорезание относится к диапазону точности, верхней границей которого является нижняя граница микрорезания, а нижней – параметры кристаллической решетки вещества. При этом в нанометрическом диапазоне измеряются параметры сечения срезаемого слоя, уровень качества поверхности (Ra до 5 нм), размеры изделия (до 1 мкм). Приведенные численные значения диапазонов являются достаточно условными, поэтому рекомендуется воспринимать их как ориентировочные.

В соответствии с [15,16], система конвенционального резания (рабочий процесс) представляет собой сложный комплекс взаимозависимых и взаимобусловленных явлений и процессов, которые сопровождают отделение от заготовки срезаемого слоя и формирование новой поверхности: относительное движение заготовки и инструмента, упругие и пластические деформации и разрушение; стружкообразование, трение и адгезия на рабочих поверхностях инструмента; теплообразование и теплоотвод; наростообразование; износ инструмента; физико-химико-механические изменения обрабатываемого и инструментального материалов; электрические, химические, диффузионные и др. процессы. Принципиально важными объектами системы резания являются свойства обрабатываемых и инструментальных материалов, геометрические параметры режущего лезвия, радиус округления режущей кромки (r), параметры срезаемого слоя, технологическая среда.