

распределение микротвердости имеет место и для участков шлифа с ЭИЛ, начиная с расстояния 0,004 мм.

Карбид титана-хрома (TiCrC) является перспективным электродным материалом для нанесения износостойких покрытий, так как обладает более высокими значениями твердости, коррозионной стойкости и износостойкости, чем титан [6]. Кинетика массопереноса для пары электродов TiCrC/ВК8 представлена на рис. 6. Видно, что количество перенесенного с анода на катод материала больше, чем аналогичное значение при использовании электрода TiC.

Однако применение TiCrC ограничено его высокой хрупкостью [7]. Поэтому использование более сложного по составу карбида TiCrC+30% (FeCr) более эффективно благодаря наличию металлической связки. Кинетика массопереноса с использованием этого материала в качестве легирующего электрода представлена на рис. 7.

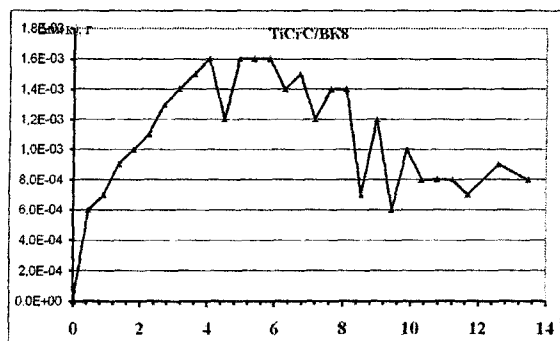


Рис. 6. Кинетика массопереноса при ЭИЛ ВК8 электродом TiCrC.

Оптимальным временем легирования, как и в случае с TiCrC, является время $t=5...6$ мин.

Анализ рентгенограмм, полученных на установке ДРОН-7, показал, что, например, при легировании сплава ВК8 карбидом титана в измененном поверхностном слое присутствуют элементы основы и легирующего электрода, однако новые фазы на поверхности не образуются.

Выводы

1. Установлено, что при ЭИЛ ВТС наибольший массоперенос наблюдается в случае использования легирующего

Н.А. Леоненко, А.А. Гальцов,
Г.Г. Капустина, Н.Л. Швец

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР, ОБРАЗОВАННЫХ ПРИ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРИРОДНЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ ОБЪЕКТЫ

It is found that in response to laser radiation particle agglomeration of thin, ultra depressive gold is initiated in gold-bearing heavy mineral products, including those of the man-made origin. In present work it is applied scanning probe microscopes (LEO elektronmikroskopie GmbH and AFM) for analyzes of fractal structure of heavy mineral products after laser radiation.

Целесообразность исследования поведения минеральных сред при высококонцентрированном энергетическом воздействии обусловлена необходимостью поиска новых способов комплексного извлечения ценных компонентов из минерального сырья в связи с существующими труд-

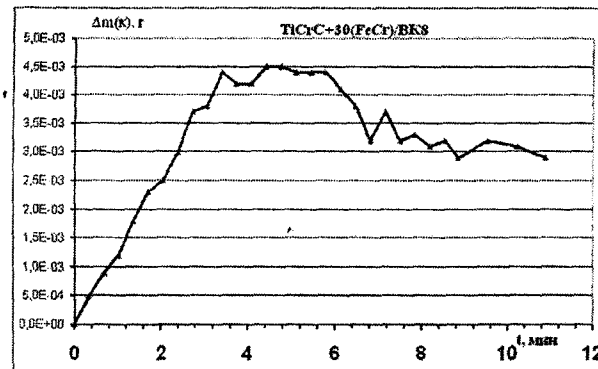


Рис. 7. кинетика массопереноса при ЭИЛ ВК8 электродом TiCrC+30% (FeCr).

щих электродов TiCrC и TiCrC+30%(FeCr) по сравнению с чистыми металлами Hf, Zr, Ti, W, и карбидом титана.

2. Показано, что содержание в материале анода TiCrC металлической связки на основе железа (FeCr) приводит в процессе ЭИЛ к увеличению количества перенесенного на катод материала и образованию поверхностного слоя большей толщины.

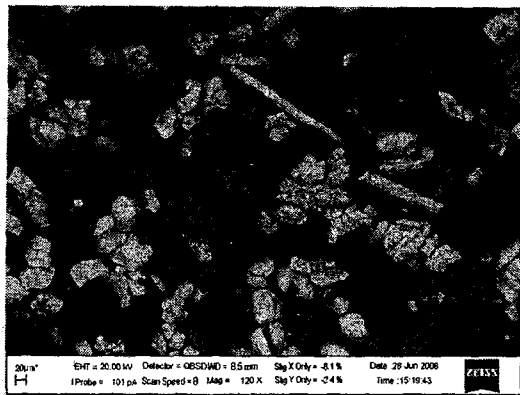
3. Установлено, что микротвердость ИПС ВК8 после ЭИЛ TiC повышается на 1,5 ГПа.

1. Лолодзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. — М.: Машиностроение, 1982.
2. Верховгуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. — Владивосток: Дальнаука, 1995.
3. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Изыскание новых применений электричества // Электронная обработка материалов. — Кишинев; М. — 1977. — № 5. — С. 5-19.
4. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения (справочник). — М: Металлургия, 1976.
5. Борилко А.С., Астапов И.А., Коневцов Л.А., Шпагин А.С. Исследование формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании вольфрамсодержащих твердых сплавов металлами четвертой группы // Вестник АмГУ. — Благовещенск, — 2008. — № 43. — С. 25-28.
6. Комратов Г.Н. Кинетика окисления порошков двойного карбида титана и хрома и карбида хрома // Порошковая металлургия. — 1999. — №9/10. — С. 52-57.
7. Уманский А.П. Структура и свойства плазменных покрытий из композиционных порошковых сплавов системы (TiCrC)-(FeCr) // А.П. Уманский, В.Н. Коновал, А.Д. Панасюк, И.А. Подчерняева и др. / Порошковая металлургия. — 2007. — №3/4. — С. 37-45.

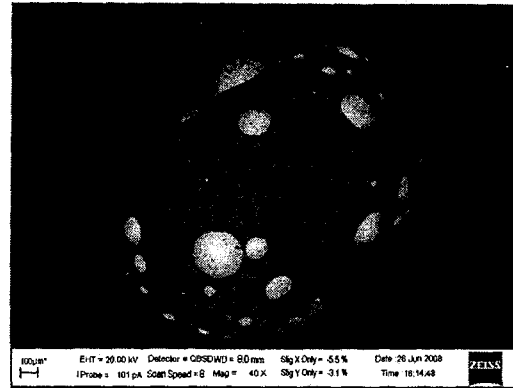
ностями применения для этих целей гравитационных технологий в горной промышленности. Вместе с тем исследование твердофазных термохимических быстропотекающих реакций и выявление фазовых переходов в них представляют определенный научный интерес и могут привести к созданию как новых технологических решений, так и наноструктурированных материалов.

В экспериментальной работе в качестве высококонцентрированного энергетического источника применено лазерное излучение. Научный интерес к работам, посвященным поведению веществ в поле лазерного излучения, о чем свидетельствуют тематика РФФИ и объем патентования по этому направлению в России и за рубежом [1, 2], неустанно растет. Лазерное излучение может обеспечить скорость локальных изменений температуры в веществе до 10^{10} Кс⁻¹ и градиенты температуры до 10^7 Ксм⁻¹, что приводит к сильному взаимодействию тепловых, концентрационных, зарядовых и иных потоков [3]. Такие параметры не могут быть достигнуты при других способах воздействия.

Работа проведена на базе ЦКП «Лазерные и оптические технологии» на лазерной установке с волоконной сис-



а – 120^x



б – 40^x

Рис. 1: а – исходный тяжелый концентрат представлен ильменитом, сфеном, гранатом, пиритом, цирконом, ультрадисперсным золотом; б – агломерат тяжелого концентрата (циркон, ильменит, сфен, гранат, пирит и др. – темная окраска) с «золотыми шарами» (сферические светлые объекты на поверхности темного агломерата) – 40^x.

темой передачи лазерного излучения ЛС-06. Мощность 600 Вт. Режим работы непрерывный, модуляция до 3 кГц. Спектральная ширина 10 нм. Прибор изготовлен в НТО «Полус» (Москва).

Минералогический объект исследования – модельный золотосодержащий тяжелый концентрат с техногенной россыпи Дальневосточного региона [4, 5]. Исходный образец для исследований представлен следующими минералами: ильменит, сфен, гранат, пирит, циркон, ультрадисперсное золото (рис. 1 а).

Химический состав образца до и после лазерной обработки исследован энергодисперсионным спектрометрическим методом.

В результате лазерного воздействия по данным микроскопического анализа зарегистрировано образование обожженных темных сфер, состоящих из минералов тяжелого концентрата. Их диаметр варьировал в пределах 500÷3000 мкм. Вместе с тем зарегистрировано осаждение на этих поверхностях частиц расплавленного золота каплевидной, сферической формы с размером от 50÷500 мкм и более (рис. 1 б).

Электронно-микроскопическое исследование образцов проведено на растровом электронном микроскопе «LEO EVO 40HV» (Карл Цейс, Германия), оснащенном энергодисперсионным анализатором «INCA-ENERGY». При сканировании исследуемых объектов использован детектор вторичных электронов (SE-детектор), позволяющий получить информацию о топографии образца. Дополнительно к детектору вторичных электронов (SE-детектор) применен детектор обратнорассеянных электронов (QBS-детектор). С помощью QBS-детектора фазы с более высоким средним атомным числом при получении изображений отражаются в контрасте более ярко по сравнению с фазами с меньшим атомным числом. Поскольку разность атомных весов минералов, содержащихся в концентрате, велика, получается более контрастное изображение, позволяющее визуально выявлять ряд минералов в исходном концентрате, а также исследовать агломерированные объекты после лазерного воздействия.

Для проведения локального качественного и количественного химического анализа минералогических объектов применен энергодисперсионный спектрометр (EDX) «INCA-ENERGY». Чувствительность метода составляет ~0,1%. Ширина электронного пучка ~20-30 нм. Глубина проникновения электронного пучка ~1 мкм.

Установлено, что после лазерного воздействия на многокомпонентный минералогический объект представляет интерес поведение циркона – ZrSiO₄ силиката циркония. Элементный анализ циркона в исходном тяжелом концентрате до лазерной обработки представлен на рис. 2.

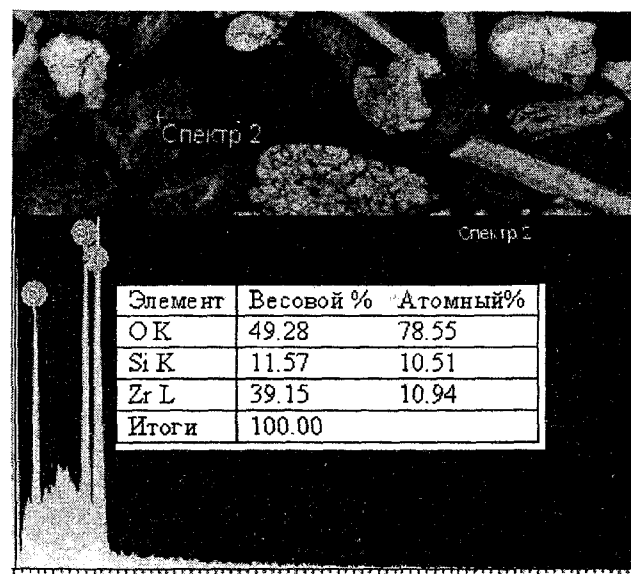


Рис. 2. Элементный анализ циркона в исходном тяжелом концентрате до лазерной обработки.

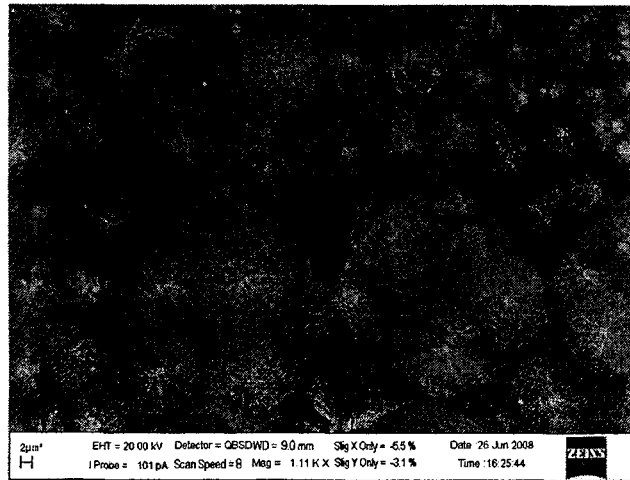
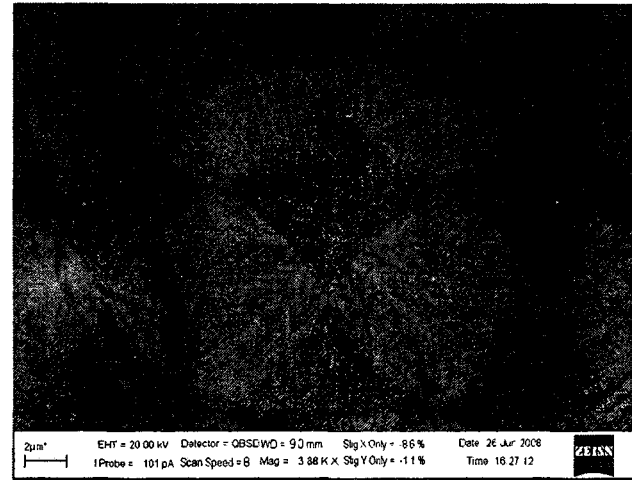
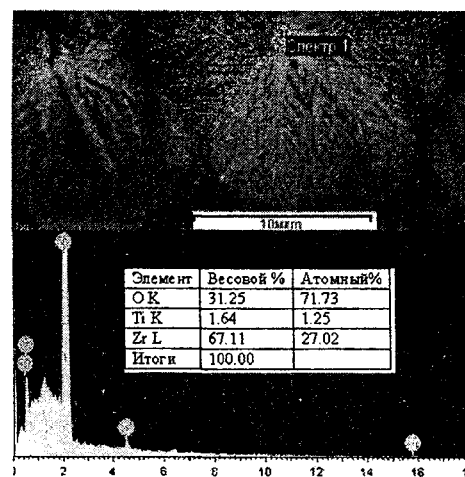
Необходимо подчеркнуть, что в россыпных месторождениях Дальневосточного региона циркон – минерал-спутник золота и при гравитационном обогащении попадает в тяжелые шлихи вместе с золотом и другими тяжелыми минералами.

Выявлено, что при высококонцентрированном энергетическом лазерном воздействии циркон образует на поверхностях темных больших агломератов фрактальные структуры (рис. 3, 4). Известно, что такого рода структуры возникают в результате конденсации в сложных неравновесных условиях [6].

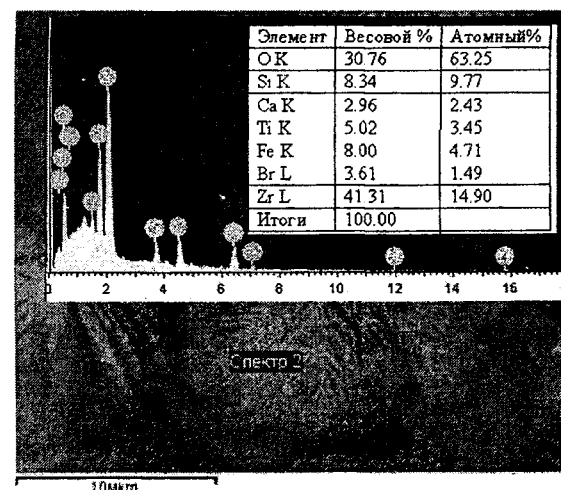
Элементный состав центральной части фрактальной структуры и ее лучей проанализирован локальным энергодисперсионным спектрометрическим методом (рис. 5).

Как видно из рис. 3-5, геометрически фрактальные агрегаты на плоскости представлены октаэдрическими формами с расходящимися от центра «перистыми лучами». Элементный состав центральной части фрактальной структуры трехкомпонентный, содержит циркон, титан, кислород (рис. 5 а). Конечные элементы «перистых лучей» октаэдра имеют более сложную многокомпонентную структуру (рис. 5 б).

Особенности фрактальных структур исследованы методами атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Рис. 3. Поверхность темного агломерата – 1100^х.Рис. 4. Фрактальные структуры циркона на поверхности большого темного агломерата, образованные при лазерном воздействии – 3880^х.

а

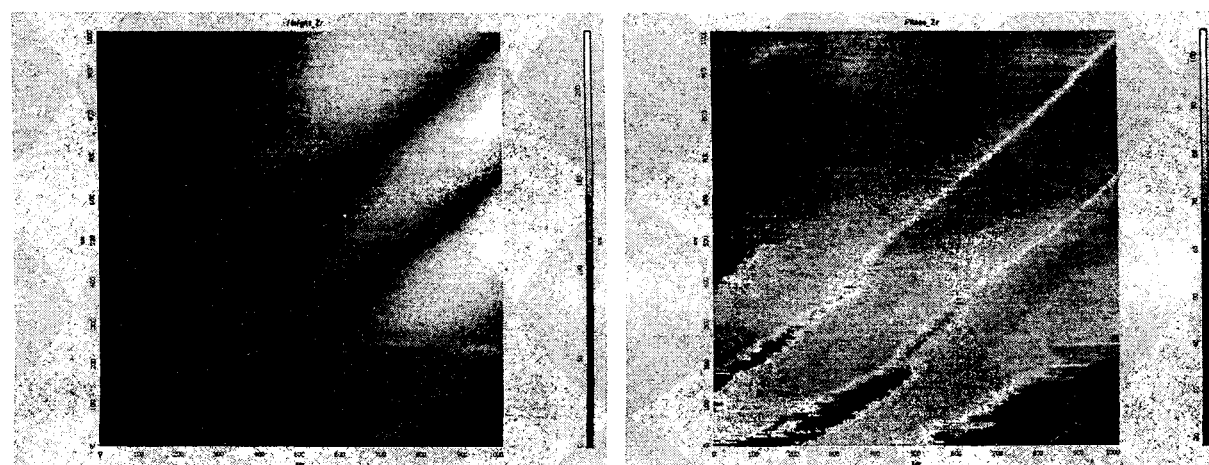


б

Рис. 5. Элементный анализ фрактальной структуры.

С этой целью использован сканирующий зондовый микроскоп NTEGRA Prima (производитель ЗАО NT-MDT, г. Зеленоград). Применен кантелевер с острием 20 нм. Оптическое разрешение микроскопа для выбора области сканирования составляло 1 мкм, наибольшая область ска-

нирования – 100×100 мкм. Сканирование осуществлялось контактным и полуконтактным методами. Для анализа сканируемых изображений использована программа NOVA. Таким образом, получены изображения поверхности фрактальной структуры (рис. 6 а, справа от изображения



а

б

Рис. 1: а – исходный тяжелый концентрат представлен ильменитом, сфеном, гранатом, пиритом, цирконом, ультрадисперсным золотом – 120^х; б – агломерат тяжелого концентрата (циркон, ильменит, сфен, гранат, пирит и др. – темная окраска) с «золотыми шарами» (сферические светлые объекты на поверхности темного агломерата) – 40^х.

расположена шкала, показывающая перепад высот – 300 нм). Фазовый состав данной поверхности изображен на рис. 6 б (справа от изображения представлена шкала фазовых изменений от 20 до 100%). Площадь сканируемой поверхности – 1000×1000 нм.

По результатам исследований выявлено объемное «ступенчатое» строение фрактальных структур. Необходимо подчеркнуть, что примененные методы исследований – сканирующая электронная микроскопия и атомно-силовая микроскопия – могут явиться взаимодополняющими методами исследования сложных фрактальных объектов.

Таким образом, установлено, что энергетическое воздействие лазерного излучения на природные золотосодержащие тяжелые концентраты, содержащие циркон, генерирует высокотемпературный быстропротекающий процесс, сопровождающийся агломерацией тяжелых минералов с образованием объемных фрактальных много-

элементных структур, а также осаждением на таких агломератах сферического золота.

1. Носков А.С., Пармон В.Н. Фундаментальные исследования в области катализа и гетерогенных химических реакций и перспективы их использования // Вестник РФФИ. – 2001. – № 2 (24). – С. 5.
2. Кравцов Н.В. Исследования в области лазерной физики // Вестник РФФИ. – 2002. – № 2 (28) – С. 7.
3. Карлов Н.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. Лазерная термодинамика. – М.: ЦентрКом, 1994.
4. Леоненко Н.А., Кузьменко А.П., Петерсон М.В., Кузьменко Н.А. Лазерная агломерация ультрадисперсного золота из минеральных и техногенных ассоциаций высокоглинистых песков // Записки горного института. – 2007. – Т. 171. – С.113-116.
5. Кузьменко А.П., Леоненко Н.А., Заводинский В.Г., Кузьменко Н.А., Петерсон М.В., Данильченко Д.Г. Лазерная агломерация ультрадисперсного золота из минеральных и техногенных ассоциаций и абляция нанокластеров диоксида циркония на поверхности кремния // Нанотехника. – 2007. – № 3. – С. 94-98.
6. Золотухин И.В. Фракталы в физике твердого тела // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 7. – С. 108-113.