

Основные достижения 2020 – 2022

Завершена разработка откольной модели локализации деформации. Согласно откольной модели, локализацию пластической деформации при ударных нагрузках сопровождают мощное ультразвуковое колебание твердого тела, реализуемое в форме стоячих волн, и миграция частиц (элементы внедрения, упрочняющая фаза, примесь) из матричного материала к местам откольной повреждаемости (эффект самозалечивания). Полосы локализованной деформации (ПЛД) зарождаются в зоне интерференции волн разгрузки, где растягивающие напряжения по величине не превышают динамическую прочность, и которая становится узлом стоячих волн. Развитие ПЛД происходит в условиях периодической смены циклов "сжатие - разгрузка". Слабое затухание стоячих волн приводит к длительной деформации образца после того, как фронт ударной волны затухнет. В процессе деформирования возможно возникновения дополнительных гармоник (обертонов) стоячей волны (ПЛД). Возникающие ПЛД – это узлы гармоник стоячей волны со своей собственной длиной волны и собственной частотой колебания. Построение откольной модели локализации деформации позволило выявить причины зарождения полос локализации при высокоскоростном нагружении и образования ПЛД в зависимости от условий нагружения (рис. 1, 2).

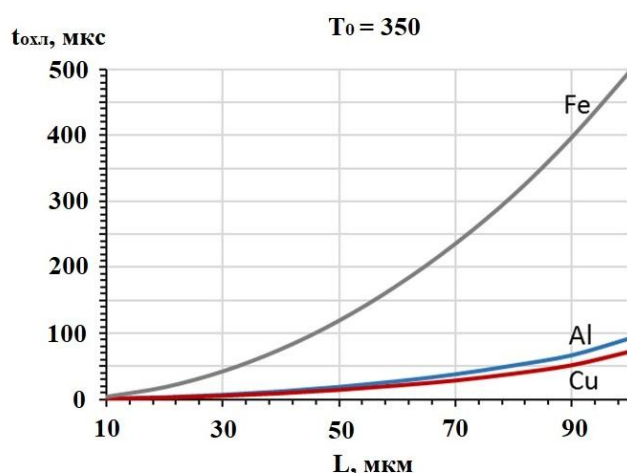


Рис. 1. Зависимость времени охлаждения от толщины полосы локализации

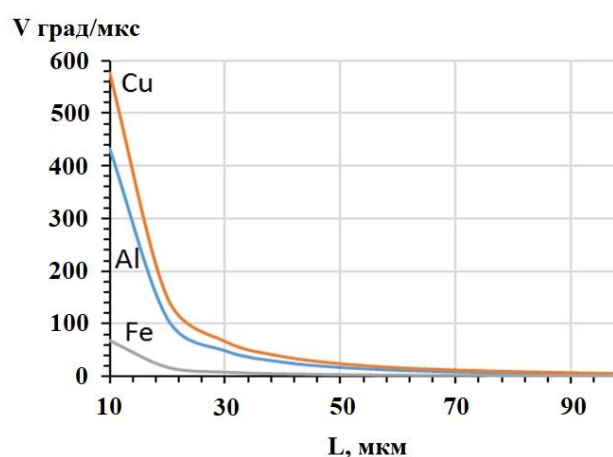


Рис. 2. Зависимость скорости охлаждения от толщины полосы локализации

Проведен поиск оптимальных режимов ударно-волнового компактирования металлических порошков системы Ni-Mg и исследование их влияния на состав, структуру и свойства компактов, предназначенных для легирования износостойких и жаропрочных сталей, чугунов и сплавов специального назначения. Впервые показана возможность получения лигатуры на основе компактов группы никель-магний с включением тугоплавких элементов молибдена и вольфрама методом ударно-волнового компактирования (рис. 3). Рентгенофазовый анализ образцов после компактирования и спекания не показал существенного изменения кристаллической решетки исходных

элементов. Установлено, что при спекании скомпактированных образцов магний вследствие своей химической активности обволакивается оксидной пленкой. Спекание компактов системы никель-магний приводит к окислению химически активного магния, поэтому необходимо получать достаточно плотный компакт в одну стадию без объемного температурного воздействия. Результаты исследований показали, что управление параметрами ударно-волнового нагружения дает возможность получения максимально плотных (выше 98% от плотности слитка) компактов без внесения в них нежелательных деформаций, разрушения, а также без структурных и химических превращений исходных компонентов.

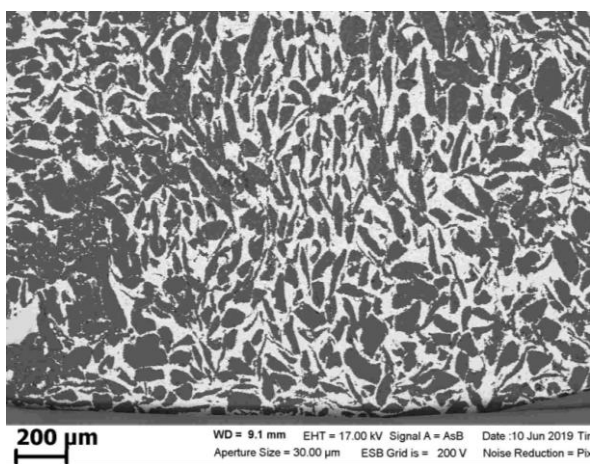


Рис. 3 Микроструктура лигатуры Ni-Mg после ударно-волнового компактирования

Импульсное нагружение образцов ограниченных размеров сопровождаются процессами взаимодействия волн (разгрузки или сжатия) между собой и с гранями образца, что с неизбежностью приводит к деформированию образца в форме стоячей волны. В узлах стоячих волн возникают и эволюционируют полосы локализованной деформации. Теоретическое рассмотрение процесса осцилляции показало, что колебания продолжаются без действия внешних сил. Время деформирования образца составляет порядка $80 \mu\text{s}$ ($T_0 \approx 2 \mu\text{s}$) для сталей, сплавов на основе алюминия и титана при длительности начального импульса сжатия - $0.75 \mu\text{s}$. Возникновение стоячей волны как причина локализации деформации, предсказана теоретически на основе законов сохранения.

Фотография продольного шлифа (рис.4) образца в виде толстостенного полого цилиндра, нагруженного пластиной, разогнанной накладным зарядом взрывчатого вещества, экспериментально подтверждает возникновение стоячих волн, характерной особенностью которой является возникновение новых собственных колебаний - обертонов. Каждая полоса локализации на рисунке является узлом своей стоячей волны со своей собственной частотой.

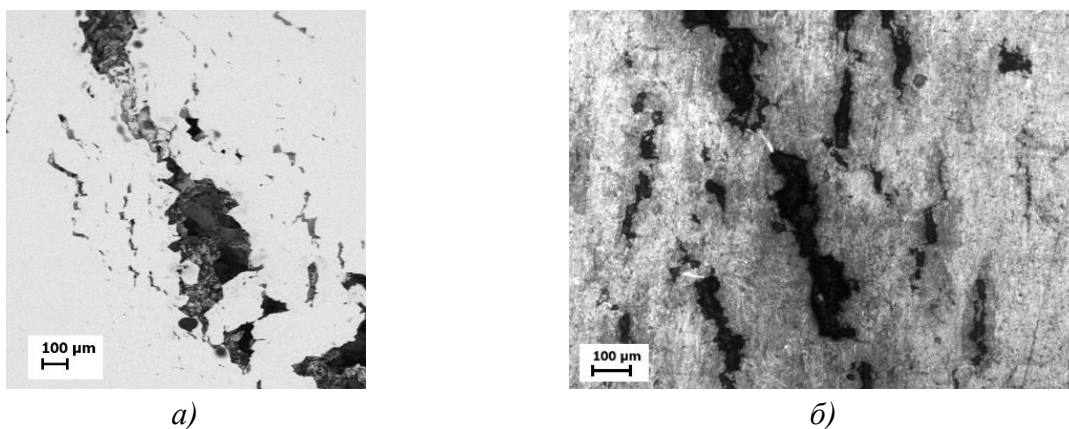


Рис. 4. Система обертонов вокруг откольной трещины: в дюралюминиевом образце (а); двухфазном титановом образце (б).

Разработана технология плакирования взрывом длиномерных (более 10 диаметров) стержней и труб из конструкционной углеродистой стали аустенитной коррозионно- и жаростойкой сталью. Металлографические исследования и механические испытания экспериментальных образцов показали, что разработанные режимы и схемы сварки взрывом, обеспечивают необходимый комплекс физико-механических свойств биметаллических заготовок для их дальнейшей горячей прокатки в готовую трубу или стержень (рис. 5). Исследования прокатанных образцов подтвердили вышеперечисленные выводы. В результате горячей прокатки были получены биметаллические трубы и стержни с прочным сцеплением слоёв, заданным уровнем деформаций и минимальным отклонением от исходной геометрии заготовок. Таким образом, двухстадийная технология может применяться для получения биметаллических труб самого широкого сортамента с различным сочетанием слоёв. Данная технология может считаться универсальной, т.к. с её помощью можно изготавливать трубы и стержни различной длины и диаметров (размер ограничен возможностями взрывного полигона и прокатного оборудования).

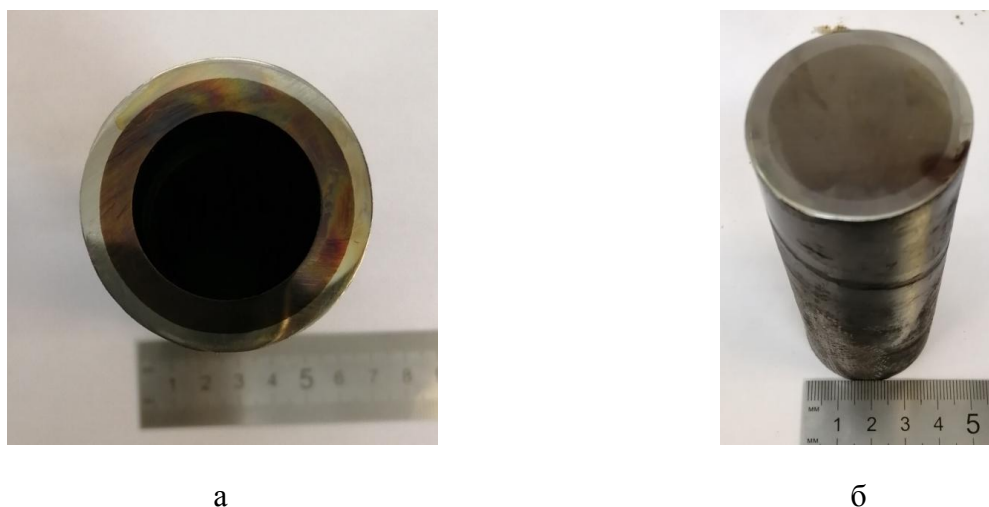


Рис. 5 Цилиндрические заготовки после сварки взрывом и прокатки (наружный слой сталь 08X18H10T, внутренний сталь 20): а – биметаллическая труба; б – биметаллический стержень.

Разработана технология получения сваркой взрывом слоистого композита на основе алюминиевого деформируемого сплава АМг6 для переходников, применяющихся в морском кораблестроении и производстве различных типов грузовых вагонов и контейнеров для перевозки сжиженного газа, кислот и т.п. Экспериментально были определены параметры сварки взрывом АМг6 с аустенитной коррозионностойкой сталью 08Х18Н10Т, углеродистой сталью 08 и титаном ВТ1-0, обеспечивающие сплошность соединения (рис.6) и среднюю прочность на отрыв плакирующего слоя на уровне 100 МПа. Было установлено, что в связи с возникновением значительных остаточных напряжений в слоях свариваемых материалов и их неравномерного распределения по площади листов, значения предела прочности на отрыв по длине слоистого материала имеют резкие перепады от 30 МПа до 190 МПа. Для выравнивания свойств применялась термическая обработка в виде неполного отжига 200 °С с выдержкой в печи в течение 1 часа. В результате термообработки произошло снятие наклёпа поверхностей, о чём свидетельствует снижение микротвёрдости слоёв и более равномерное распределение прочностных свойств. Таким образом, разработанную технологию перспективно применять для получения слоистых переходников АМг6+сталь.



Рис. 6. Граница соединения АМг6-08Х18Н10Т

На основании оценки параметров газа при сверхзвуковом обтекании металлических поверхностей предложено новое теоретическое представление о процессе очистки и активации свариваемых поверхностей при сварке взрывом крупногабаритных листов, заключающееся в воздействии на поверхностный слой металла впереди точки контакта потока неравновесной ударной плазмы, образующейся в процессе аэродинамического нагрева в пограничном слое между ударно-сжатым газом и свариваемыми поверхностями при их сверхзвуковом обтекании (рис.7). Взаимодействие ударной плазмы со свариваемыми поверхностями (рис.8) приводит к их термической активации, разрушению органических загрязнений и диссоциации окислов.

Разработка механизма очистки и активации при сварке взрывом крупногабаритных листов с учетом аэродинамики потока ударно-сжатого газа впереди точки контакта

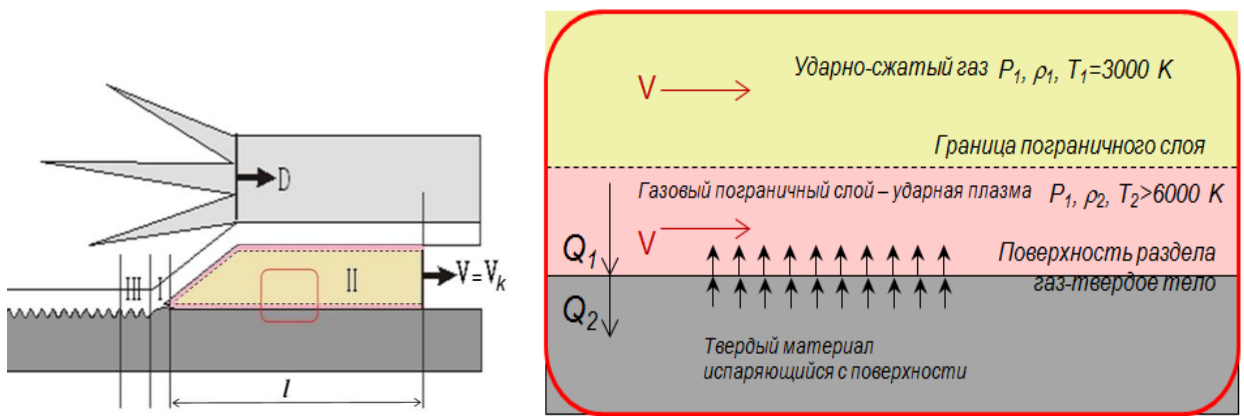


Рис. 7. Схема взаимодействия УСГ со свариваемыми поверхностями впереди точки контакта
 I- зона точки контакта, II- зона УСГ впереди точки контакта, III- зона формирования соединения, D – скорость детонации, V- скорость движения УСГ, Q_1 и Q_2 - теплопередача от газового пограничного слоя к испаряющейся поверхности

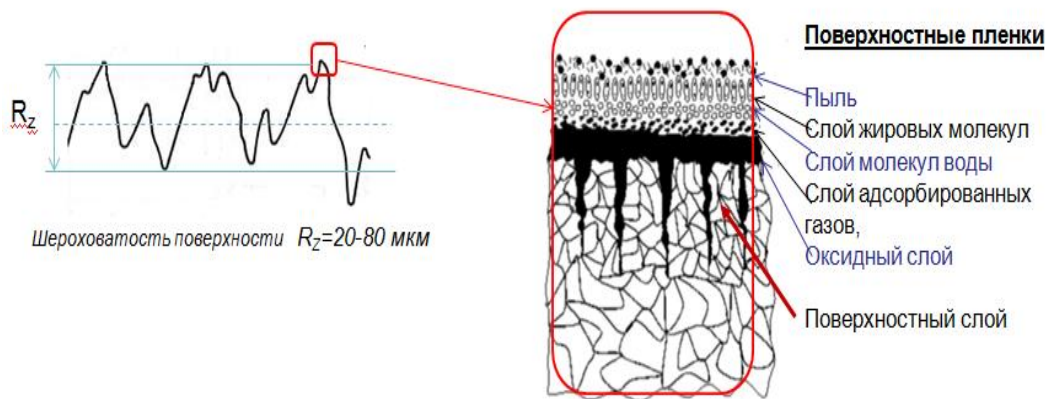


Рис. 8. Техническая (реальная) поверхность металлических тел

Разработаны принципиально новые подходы к созданию технологии плакирования взрывом крупногабаритных листов и плит из конструкционной стали коррозионностойкой сталью и титаном, обеспечивающие 100 % сплошность соединения. Разработаны и внедрены современные технологии круглогодичного промышленного производства сваркой взрывом крупногабаритного листового биметалла, что позволило обеспечить замещение импорта крупногабаритных листов и плит из конструкционной стали, плакированных коррозионностойкой сталью (рис. 9 а) и титаном (рис. 9 б), для ведущих отраслей машиностроения (нефтехимического, атомного и судостроительного) и, в результате, получить годовой экономический эффект более **163 млн. рублей**.



а

б

Рис.9. Применение крупногабаритного биметалла, произведенного по разработанным технологиям в изделии. а - процесс изготовления корпуса САОЗ из биметалла 22К+08Х18Н10Т, размером 60(55+5)х2500х9900 мм; б - трубная решётка конденсатора АЭС после сверления отверстий из биметалла сталь+титан (09Г2С+ВТ1-0), размером 30(25+5)х3200х3600.

Для выявления закономерностей ударно-волнового разрушения был разработан математический аппарат анализа волновой картины взаимодействия удлиненного ударника с преградой (Рис.10), который позволил установить ряд ранее неизвестных особенностей процесса, в частности объяснил природу образования откольных повреждений в форме «пробки». Установлено, что сближение волн разгрузки на контактной поверхности на начальном этапе приводит к установлению нулевого давления, в результате чего внедрение ударника в преграду останавливается, а ударные волны в преграде и ударнике отделяются друг от друга и продолжают движение самостоятельно, поскольку между ними образуется область разгруженного материала. Фокусировка волн разгрузки приводит к образованию иглоподобной откольной трещины. В течение всего процесса внедрения, скорость ударной волны на боковой грани постоянна и равна $\frac{1}{4}$ начальной величины. Набегающий поток, скорость которого равна скорости удара, тормозится на фронте затухающей ударной волны, это увеличивает давление на фронте до начальной величины, а импульсы сжатия, сопровождающие торможение восстанавливают прерванный процесс внедрения. Каждый приход импульсов сжатия на контактную поверхность приводит к возникновению кольцевых трещин. Всю длину ударника можно разделить на пространственные циклы, в которых волновая картина повторяется, при этом длина цикла остается постоянной. Рисунок 11 иллюстрирует иглоподобное откольное разрушение, возникшее при обжатии цилиндрического бронзового образца при давлении.

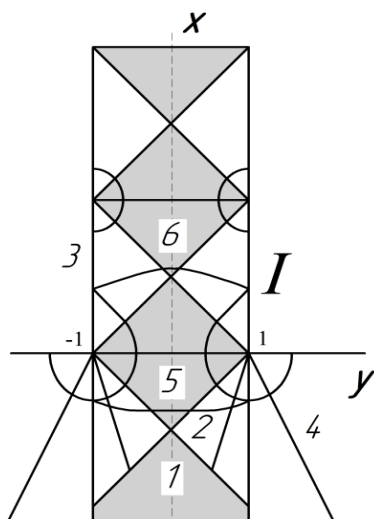


Рис. 10

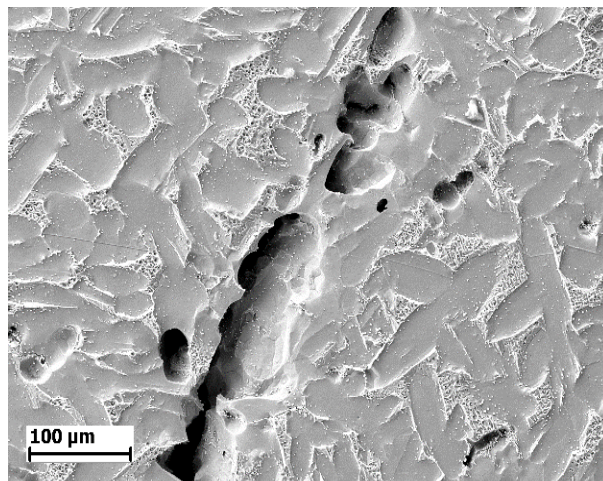


Рис. 11

Рис. 10. Схема волновой картины импульсного взаимодействия твердых тел:

1 – траектория точки пересечения головной характеристики центрированной волны разгрузки (траектория - s_0) с фронтом ударной волны; 2 – промежуточная траектория - s ; 3 – траектория точки пересечения фронта ударной волны с характеристикой, направленной вдоль боковой грани ударника; 4 – траектория точки пересечения фронта ударной волны с характеристикой - s_H , где H – динамический предел текучести Гюгонио; 5 – участок невозмущенного фронта ударной волны в преграде; 6 – участок фронта ударной волны, в зоне торможения; W – скорость набегающего на фронт ударной волны потока, равная скорости удара; I – первый пространственный цикл; II – второй пространственный цикл (серым цветом обозначена область, где амплитуда ударной волны сохраняет первоначальное значение)

Рис. 11. Микрофотография травленной поверхности шлифа из бронзы после обжатия цилиндрического образца детонационной волной.

Разработан новый метод получения композиционного металло-интерметаллидного материала с помощью комплексной технологии, включающей ударно-волновое сжатие, СВС и экструзию - ударно-волновая экструзия (УВЭ). Под воздействием давления продуктов детонации взрывчатого вещества происходит сжатие трубы с таблеткой Ni-Al и её продавливание через формующее отверстие в капсуле (рис.12). В экспериментальном исследовании были использованы два режима УВЭ, которые отличались скоростью детонации (1170 м/с и 1290 м/с) и давлением за фронтом ударной волны. Было установлено, что высокая скорость схлопывания и давление в 3,5 ГПа не позволяют обеспечить выход продукта из трубы в капсулу выше 47% по массе, в отличие от случая с использованием меньшей скорости схлопывания и давления в 1,9 ГПа, при которых выход продукта составил 56% по массе. На рисунке 2 показан продольный шлиф образца синтезированного на глубину 5...7 мм. Переходная область между синтезированной и компактированной частью образца имеет форму конуса с углом при вершине 104° (рис. 13). Результаты металлографических исследований указывают на то, что в процессе высокоскоростного обжатия стальной трубы в ампуле создаются условия для образования кумулятивной струи, которая непосредственно влияет на фазообразование в порошковой смеси (рис. 14). Метод позволяет за одну технологическую операцию, без использования предварительной механической активации порошковой смеси, получать композиционный материал с наружным металлическим слоем (сталь, титан, алюминий и т.д.) и внутренним

слоем из материала, обладающего высокой твердостью и жаропрочностью (керметы, интерметаллические соединения). Интенсивная многоуровневая деформация порошкового образца позволяет модифицировать структуру внутреннего слоя.

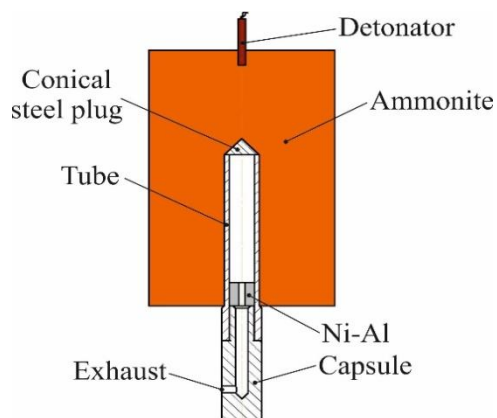


Рис.12. Схема ударно-волновой экструзии таблетки Ni-Al

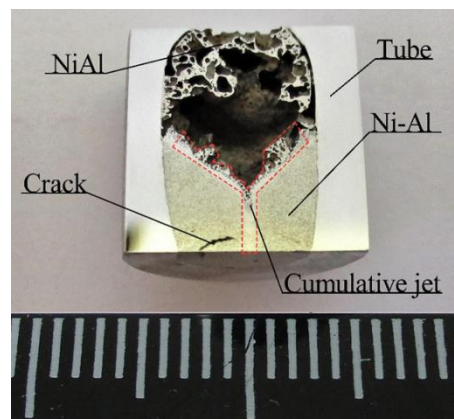
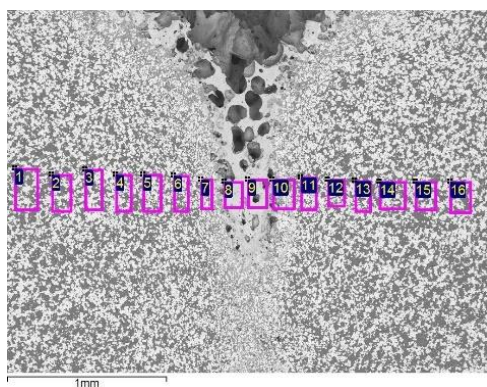
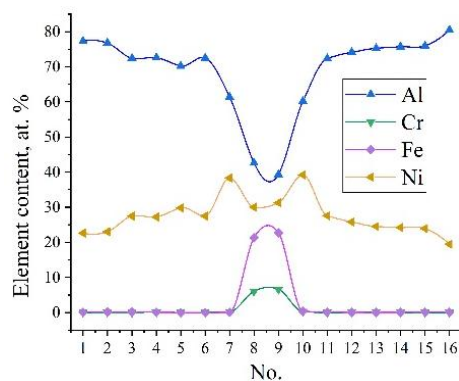


Рис.13. Фотография продольного шлифа из секции II ампулы 1



a



b

Рисунок 3. Микроструктура внутреннего слоя образца (a) и ЭДС анализ (b).

К настоящему времени методом СВС-гидрирования и термическим дегидрированием налажено производство порошков гидроксида титана и чистого титана в лабораторно-опытном масштабе. Объемы производства составляют: 4 кг в сутки гидроксида титана и 1 кг в сутки чистого порошка титана. Гидрид титана соответствует ТУ 14-1-2159-77. Титановые порошки соответствуют стандарту ТУ 14-22-57-92. Технология позволяет варьировать фракционный состав от 40 мкм до 2000 мкм (размер титановой губки). Применение метода СВС-гидрирования значительно сокращает время гидрирования титана, содержание вредных примесей и расходы энергии.