

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ СФЕРИЧЕСКИХ БЕРИЛЛИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК, С ЗАДАНЫМ ПРОФИЛЕМ ЛЕГИРОВАНИЯ МЕДЬЮ

И. В. Тузов, И. А. Чугров, Н. Н. Мариничева, Н. Н. Краева, А. С. Вихорев, А. В. Илюшечкина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородская обл.

Введение

В рамках исследования ЛТС на установках с энергией мегаджоульного уровня применяются мишени, состоящие из сферической оболочки, наполненной дейтерий-тритиевой смесью. Одним из наиболее подходящих материалов для оболочки выступает бериллий, так как имеет ряд преимуществ перед другими материалами (стеклами и различными полимерами), связанными с механическими свойствами и некоторыми аспектами физики сжатия. На рис. 1 приведен спектр допустимых шероховатостей различных слоев криогенной мишени из пластика [1], который задавался в газодинамических расчетах оценки устойчивости сжатия мишени на установке NIF. Стоит отметить, что наиболее жесткие требования предъявляются к внутренней поверхности и близким к ней слоям.

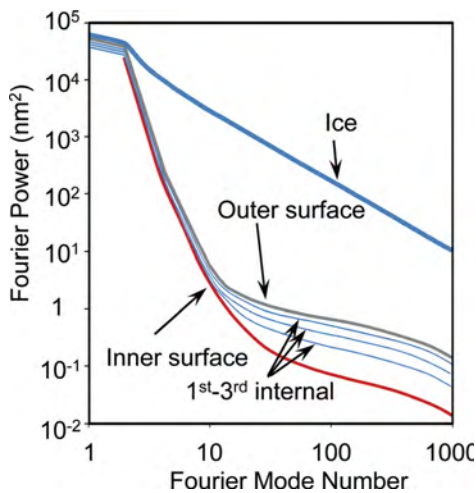


Рис. 1. Требования к спектру шероховатости различных поверхностей криогенной полимерной капсулы в зависимости от номера сферической гармоники [2]: Inner surface – внутренняя поверхность, Outer surface – внешняя поверхность, Ice – лед, 1st-3rd internal – 1-3 внутренние слоя, Fourier Power – амплитуда Фурье сигнала, Fourier Mode Number – номер Фурье-моды

Из рис. 1 видно, что если оболочка имеет отклонения от идеальной сферы типа «эллиптичность», т. е. мода № 2, то получаем амплитуду отклонения для внешней поверхности оболочки до ≈ 300 нм, а

для моды № 10 величина амплитуды отклонения будет, составляет ≈ 5 нм. Требования к допустимой амплитуде моды шероховатости внешней поверхности для более высоких значений мод еще более жесткие от $\approx 1,5$ нм в 12-ой и до $\approx 0,4$ нм в 1000-ой моде.

С учетом этого для мегаджоульной установки, где планируется применять подобные криогенные мишени, были сформулированы требования к параметрам мишени и боксу-конвертору. Для сферических бериллиевых оболочек требуемая шероховатость внешней поверхности составляет 30 нм, а внутренней 10 нм.

Изготовление бериллиевых оболочек, легированных медью

На данный момент существует два основных способа получения бериллиевых оболочек: изготовление полусфер будущей оболочки на ультрапрецизионных специализированных станках с последующим их склеиванием и получение бериллиевых оболочек методом вакуумного нанесения на полимерные оболочки-подложки. Рассматривая недостатки данных методов, стоит отметить, что первый вариант не позволяет получать оболочки с контролируемым профилем концентрации меди по объему сферы. Недостатком второго метода является увеличенное (достигает по расчетам около 5 месяцев) время процесса напыления слоев из-за малых скоростей распыления бериллия, однако особенностью вакуумного напыления является то, что в процессе распыления магнетронных мишеней мы можем варьировать концентрацию меди в слоях бериллия. Исходя из вышесказанного, единственным, реализуемым на сегодняшний день методом получения оболочек из бериллия с требуемой концентрацией меди, является вакуумное нанесение его на сферические полимерные оболочки-подложки с последующим термическим удалением последних [3].

В качестве оболочек использовались: полистирольные сферические оболочки диаметром 1,5–1,8 мм и толщиной стенки 10 мкм, полученные методом вспенивания исходных гранул полистирола в вертикальной печи падения и толстостенные (~ 30 мкм) полистирольные оболочки диаметром 2,3–2,4 мм, полученные методом микрокапсулирования. Для решения поставленной задачи была спроект-

тирована и изготовлена экспериментальная напылительная установка для напыления специальных материалов. Установка оснащена магнетронным кластером с тремя независимо работающими конфокальными магнетронами (см. рис. 2). При напылении бериллия, сферические оболочки-подложки помещаются в непрерывно вибрирующую чашку, на которую подаются колебания (вдоль оси Z) различной чистоты (от 0,01 до 10 Гц) и интенсивности. При этом оболочки поворачиваются к магнетронным мишеням различными сторонами, и происходит равномерное распределение бериллиевого слоя на поверхности оболочек-подложек.

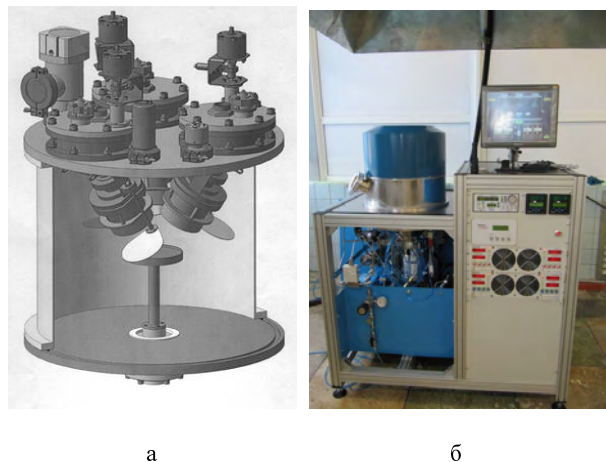


Рис. 2. Внешний вид: а – магнетронный кластер; б – вакуумно-напылительная установка

Учитывая, что к бериллиевой оболочке, как к мишени наполненной ДТ-смесью, предъявляются достаточно жесткие требования к качеству поверхности, толщине стенки и структуре, то нами использовались следующие методы исследования: оптическая интерферометрия; оптическая, атомно-силовая и рентгеновская микроскопия; определение толщины стенки бериллиевой оболочки гравиметрическим методом. Обработка изображения производилась с применением программы GWYDDION.

Для получения бериллиевых оболочек использовались плоские мишени из объемного материала бериллия, но в случае получения оболочек с неравномерно распределенной примесью меди и конструктивными особенностями напылительной установки, возможно, рассмотреть три различных варианта:

– первый, когда в магнетронный кластер устанавливаются две мишени из бериллия и одна мишень из меди, и, варьируя, условия нанесения (подаваемую мощность на магнетрон и др.) подбирается необходимый режим нанесения бериллия и меди. Но в силу того, что различие в коэффициентах распыления бериллия и меди существенно (0,7 против 2,3, при энергии ионов аргона 600 эВ), не удалось подобрать необходимый режим обеспечивающий концентрацию меди на уровне 2 ат.%, даже при минимальной мощности, подаваемой на магнетрон с медной

мишенью (минимальная концентрация меди составила 8,45 ат.%). Также уменьшая мощность мы, с одной стороны уменьшаем поток вещества осаждаемого на оболочку и, как следствие, получаем более гладкий слой с низкой шероховатостью, а с другой стороны значительно увеличиваем время (в 1,6 раза по сравнению с чисто бериллиевой оболочкой) получения готовой оболочки с заданной толщиной;

– второй, отличается от первого только тем, что на пути осаждаемого потока вещества устанавливается экран, который отсекает часть потока и дает возможность получить значение легирующей примеси на уровне менее 2 ат.%, но при этом еще больше увеличивается время получения готовой оболочки;

– третий, заключается в использовании магнетронной мишени, представляющей собой плоский диск из бериллиево-медного сплава с известной концентрацией меди на уровне 2 ат.%. В таком случае, варьируя, количество таких мишеней в магнетронном кластере и подаваемую на них мощность, был подобран режим, когда и концентрацию легирующей примеси можно контролировать с высокой точностью, и скорость получения готовой оболочки увеличить по сравнению с чисто бериллиевой оболочкой.

Таким образом, первый и третий вариант были экспериментально апробированы и получены данные о влиянии различных технологических параметров напылительной установки, на морфологию поверхности получаемых сферических бериллиевых оболочек, легированных медью. Приведены данные исследования морфологии поверхности и поперечного среза бериллиевых оболочек, легированных медью, а также представлены карта распределения элементов по поверхности поперечного среза и локальный элементный состав. Второй вариант не рассматривался в силу конструктивной невозможности установить экран перед одним из магнетронов, а также из-за слишком низкой скорости (опускается ниже 0,29 мкм/ч) нанесения бериллиево-медного слоя.

Результаты

Интерферограммы и АСМ-изображения внешней поверхности бериллиевых оболочек, легированных медью с разной концентрацией последней, приведены на рис. 3.

Для сравнения первой приведена бериллиевая оболочка не легированная медью. После легирования бериллиевых оболочек медью, наблюдается ухудшение интерференционной картины, выражающееся в размытии и нарушении интерференционных колец и, как следствие, увеличении параметров шероховатости. Данные интерферограмм подтверждаются АСМ-изображениями поверхности оболочек. Из литературы известно, что вводя в бериллий примесь меди на уровне единиц (ат.%) происходит замедление роста параметров шероховатости поверхности в сравнении с оболочками из чистого бериллия [4].

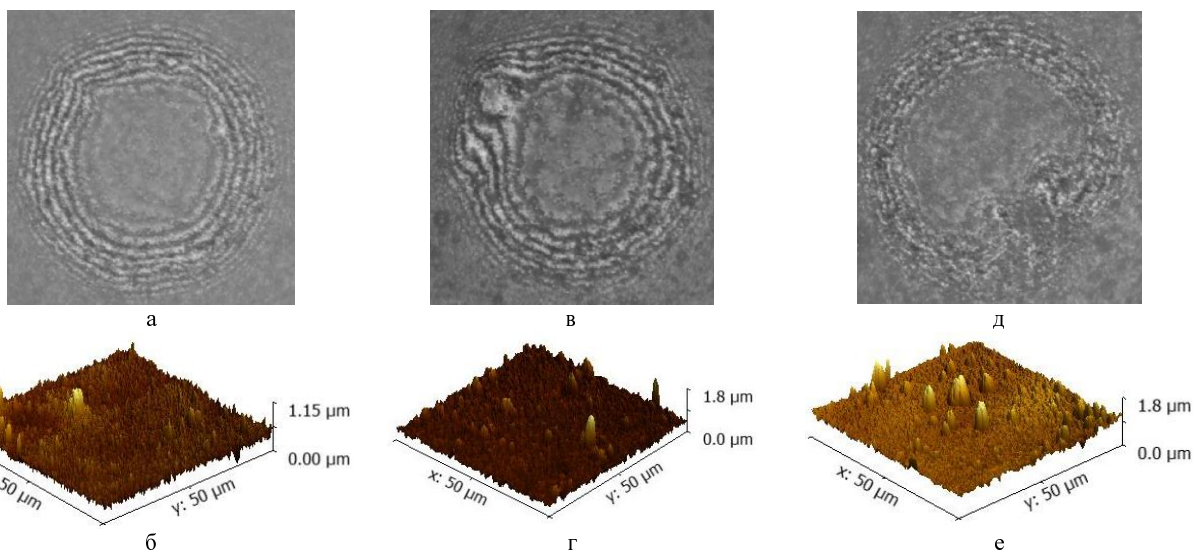


Рис. 3. Интерферограммы и АСМ-изображения внешней поверхности бериллиевых оболочек: а – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой не легированной оболочки. Параметры поверхности: $R_a=235$ нм, $rms=331$ нм (пл. анализа 235×176 мкм²); б – АСМ-изображение внешней поверхности бериллиевой не легированной оболочки. Параметры поверхности: $R_a = 63$ нм, $rms = 90$ нм (пл. анализа 50×50 мкм²); в – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки легированной медью (подаваемая мощность на магнетрон 1 Вт). Параметры поверхности: $R_a = 236$ нм, $rms = 334$ нм (пл. анализа 235×176 мкм²); г – АСМ-изображение внешней поверхности бериллиевой оболочки легированной медью (подаваемая мощность на магнетрон 1 Вт). Параметры поверхности: $R_a = 82$ нм, $rms = 118$ нм (пл. анализа 50×50 мкм²); д – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки легированной медью (подаваемая мощность на магнетрон 7 Вт). Параметры поверхности: $R_a = 333$ нм, $rms = 468$ нм (пл. анализа 235×176 мкм²); е – АСМ-изображение внешней поверхности бериллиевой оболочки легированной медью (подаваемая мощность на магнетрон 7 Вт). Параметры поверхности: $R_a = 95$ нм, $rms = 135$ нм (пл. анализа 50×50 мкм²)

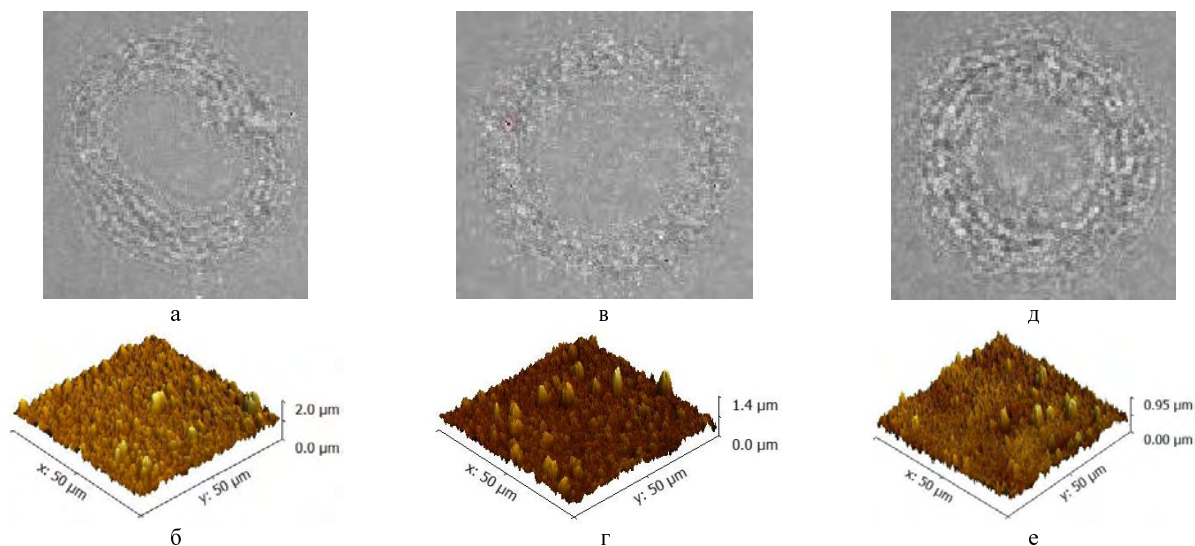


Рис. 4. Интерферограммы и АСМ-изображения внешней поверхности бериллиевых оболочек, легированных медью и полученных методом распыления мишени из бериллиево-медного сплава: а – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Ве/Сu, Ве/Сu, Ве/Сu (200 Вт)). Параметры поверхности: $R_a = 252$ нм, $rms = 341$ нм (пл. анализа 282×211 мкм²); б – АСМ-изображение внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Ве/Сu, Ве/Сu, Ве/Сu (200 Вт)). Параметры поверхности: $R_a = 119$ нм, $rms = 160$ нм (пл. анализа 50×50 мкм²); в – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Ве, Ве/Сu, Ве/Сu (200 Вт)). Параметры поверхности: $R_a = 219$ нм, $rms = 383$ нм (пл. анализа 282×211 мкм²); г – АСМ-изображение внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Ве, Ве/Сu, Ве/Сu (200 Вт)). Параметры поверхности: $R_a = 84$ нм, $rms = 119$ нм (пл. анализа 50×50 мкм²); д – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Ве, Ве, Ве/Сu (200 Вт)). Параметры поверхности: $R_a = 167$ нм, $rms = 240$ нм (пл. анализа 282×211 мкм²); е – АСМ-изображение внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Ве, Ве/Сu, Ве/Сu (200 Вт)). Параметры поверхности: $R_a = 73$ нм, $rms = 96$ нм (пл. анализа 50×50 мкм²)

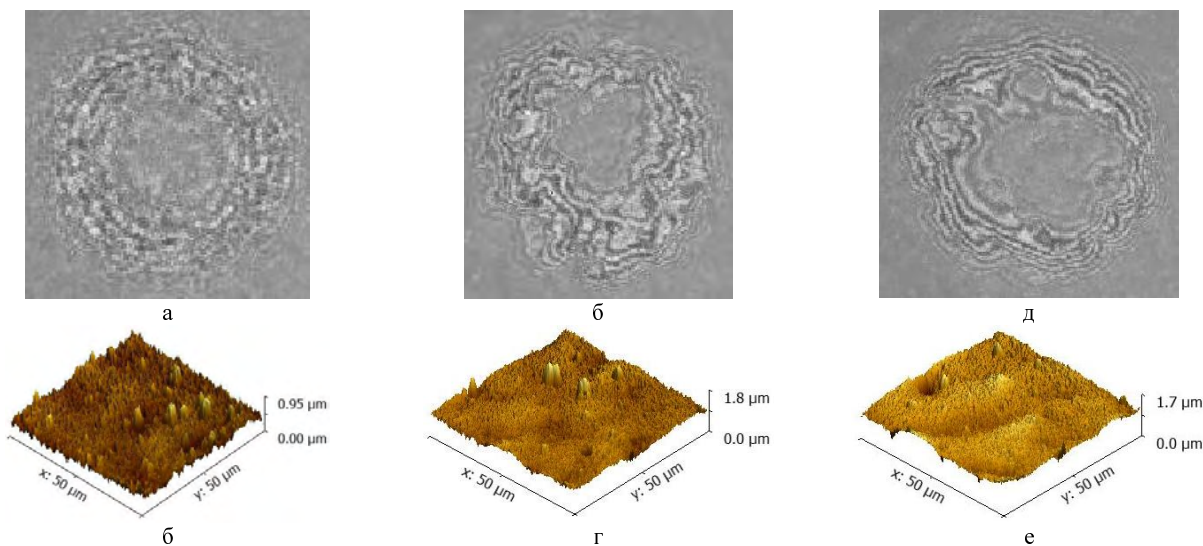


Рис. 5. Интерферограммы и АСМ-изображения внешней поверхности бериллиевых оболочек, легированных медью: а – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Ве, Ве, Ве/Cu (200 Вт)). Параметры поверхности: $R_a = 167$ нм, $rms = 240$ нм (пл. анализа 282×211 мкм²); б – АСМ-изображение внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Ве, Ве, Ве/Cu (200 Вт)). Параметры поверхности: $R_a = 73$ нм, $rms = 96$ нм (пл. анализа 50×50 мкм²); в – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Ве, Ве, Ве/Cu (150 Вт)). Параметры поверхности: $R_a = 292$ нм, $rms = 441$ нм (пл. анализа 282×211 мкм²); г – АСМ-изображение внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Ве, Ве, Ве/Cu (150 Вт)). Параметры поверхности: $R_a = 84$ нм, $rms = 115$ нм (пл. анализа 50×50 мкм²); д – интерферограмма внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Ве, Ве, Ве/Cu (100 Вт)). Параметры поверхности: $R_a = 272$ нм, $rms = 357$ нм (пл. анализа 282×211 мкм²); е – АСМ-изображение внешней поверхности бериллиевой оболочки, легированной медью (конфигурация кластера: Ве, Ве/Cu, Ве/Cu (100 Вт)). Параметры поверхности: $R_a = 88$ нм, $rms = 118$ нм (пл. анализа 50×50 мкм²)

На рис. 4 и 5 приведены интерферограммы и АСМ-изображения внешней поверхности полученных бериллиевых оболочек, легированных медью методом распыления мишени из бериллиево-медного сплава. В итоге, при легировании бериллиевых оболочек медью происходит увеличение параметров шероховатости поверхности по сравнению с не легированными оболочками. Эффект замедления роста параметров шероховатости при легировании медью обнаружить не удалось. Данный вопрос требует проведения отдельных дополнительных исследований. В ситуации с бериллиевыми оболочками, легированными медью методом распыления бериллиево-медной мишени, прослеживается похожая тенденция к увеличению параметров шероховатости поверхности с увеличением подаваемой мощности на магнетрон с мишенью из сплава и количеством этих мишеней в кластере.

Рассмотрение структурно-морфологических свойств логичнее всего начать с анализа магнетронных мишеней, с которых проводилось нанесение бериллиевого и бериллиево-медного слоя. Бериллий плохо идентифицируется стандартными методиками ввиду малой плотности ($1,848$ г/см³) и низкого атомного номера. Но если в анализируемом образце мишени присутствуют примеси более тяжелых элемен-

тов, то возможно провести полуколичественный анализ и отследить их след в получаемых бериллиевых оболочках, при условии того, что материал мишени полностью переносится при распылении на подложку.

На рис. 6 представлены изображения спектров мишеней из бериллия, меди и бериллиево-медного сплава. Рассматривая результаты, можно отметить, что все спектральные линии соответствуют друг другу и значительного количества (не более 5 %) примеси, как в «чистых» образцах, так и в мишени из сплава не наблюдается.

На рис. 7 представлены изображения поверхности магнетронных мишеней из бериллия, меди и бериллиево-медного сплава снятые в атомном контрасте. Для мишени из бериллия видны локальные неоднородности, связанные с распределением примесей в матрице мишени в основном на границах раздела бериллиевых зерен. Латеральный размер зерен варьируется от 10 до 30 мкм, что характерно для металлического поликристаллического бериллия [5], полученного вакуумным горячим прессованием. Для мишени из меди при исследовании поверхности, включений и выделений в структуре материала мишени не обнаружено.

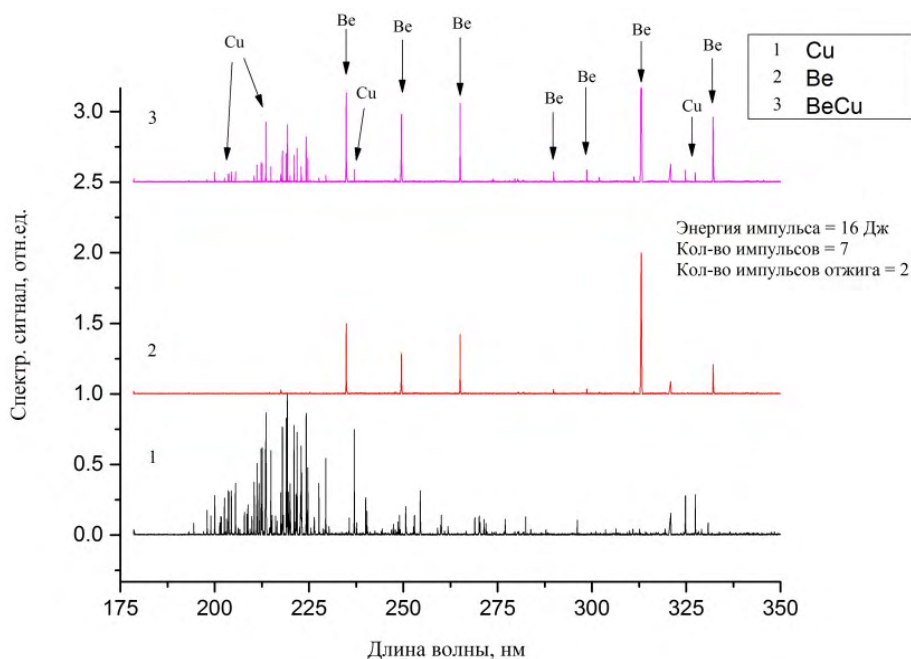


Рис. 6. Спектры мишеней из бериллия, меди и бериллиево-медного сплава

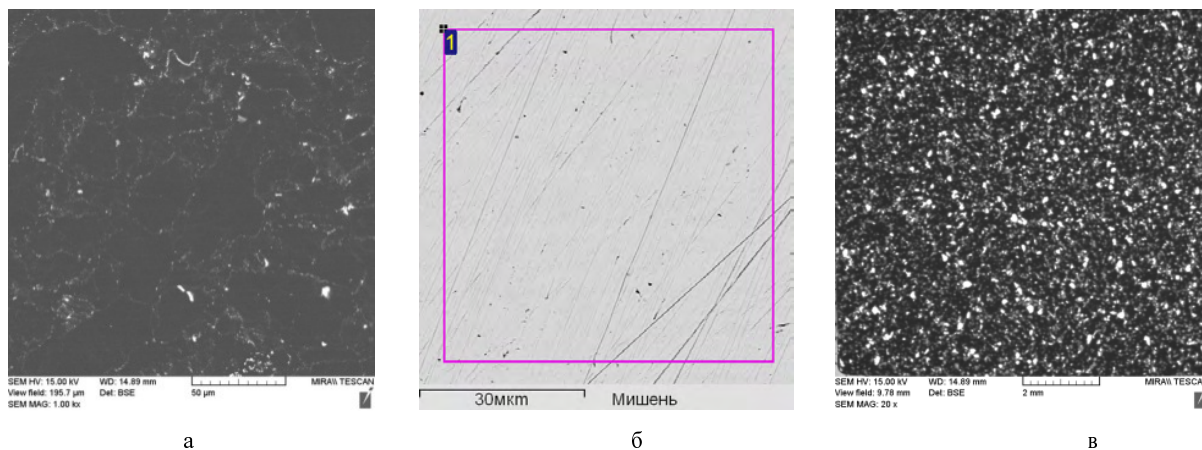


Рис. 7. Микроструктура поверхности магнетронных мишеней в атомном контрасте: а – бериллий, б – медь, в – бериллиево-медный сплав

Мишень из бериллиево-медного сплава характеризуется значительной структурной неоднородностью из-за неравномерного распределения меди в объеме материала мишени. Плотность материала сплава составила $2,068 \text{ г/см}^3$, что соответствует содержанию меди на уровне 12,5 масс.%. Определение среднего элементного состава мишеней проводили в нескольких локальных участках размерами от $180 \times 180 \text{ мкм}^2$ до $1100 \times 1100 \text{ мкм}^2$.

Аналогичным образом проводился анализ карт распределения элементов, как со всей площади поперечного среза оболочки, так и с областей меньшего размера (области с различного рода артефактами и отдельные слои). В табл. 1 представлены данные

элементного состава бериллиево-медного слоя. Под конфигурацией «обр. 20 Вт на магнетрон» подразумевается, что в магнетронном кластере находилось две мишени Be с подаваемой на них мощностью 200 Вт и одна мишень из Cu с подаваемой на нее мощностью 20 Вт. В случае конфигурации «Конф. Be. Be. Be/Cu (150 Вт)» подразумевается, что в магнетронном кластере находилась две мишени из Be и одна мишень из сплава Be/Cu, подаваемая мощность на все мишени составляла 150 Вт (по умолчанию мощность составляла 200 Вт, например «Конф. Be. Be/Cu. Be/Cu»).

Элементный состав примесей в бериллиево-медном слое всех образцов

Обозначение	Массовое содержание, %								
	Be	Cu	O	Ar	Al*	Si*	Cr	Fe	W
Мишень Be	основа		0,5	-	-	-	>0,1	0,14	>0,1
Мишень Cu	-	основа	-	-	-	-	-	-	-
Мишень из сплава Be/Cu	основа	12,2	1,2	-	-	-	-	0,1	-
Обр. 20 Вт на магнетрон	основа	58,0	1,4	>0,1	0,7	>0,1	-	-	-
Обр. 10 Вт на магнетрон	основа	50,0	2,5	-	2,5	-	-	-	-
Обр. 7 Вт на магнетрон	основа	49,1	2,5	-	0,7	-	-	-	-
Обр. 3 Вт на магнетрон	основа	43,4	2,8	-	1,8	-	-	-	-
Обр. 1 Вт на магнетрон	основа	39,4	3,7	-	2,2	-	-	-	-
Конф. Be/Cu. Be/Cu. Be/Cu	основа	11,8	3,3	-	-	-	-	-	-
Конф. Be. Be/Cu. Be/Cu	основа	9,8	2,2	-	-	-	-	-	-
Конф. Be. Be. Be/Cu (200 Вт)	основа	7,1	2,4	-	-	-	-	-	-
Конф. Be. Be. Be/Cu (150 Вт)	основа	5,2	2,1	-	-	-	-	-	-
Конф. Be. Be. Be/Cu (100 Вт)	основа	4,7	2,6	-	-	-	-	0,2	-

Таблица 2

Данные измерений толщины бериллиево-медного слоя и расчет средней скорости напыления слоя

Обозначение	Концентрация меди в слое, масс.% (ат.%)	Толщина бериллиево-медного слоя, мкм.	Средняя скорость напыления слоя, мкм/ч.
Обр. 20 Вт на магнетрон	58,0 (16,38)	2,22 ± 0,15	0,44
Обр. 10 Вт на магнетрон	50,0 (12,43)	1,89 ± 0,15	0,38
Обр. 7 Вт на магнетрон	49,1 (12,04)	1,85 ± 0,15	0,37
Обр. 3 Вт на магнетрон	43,4 (9,81)	1,56 ± 0,15	0,31
Обр. 1 Вт на магнетрон	39,4 (8,45)	1,43 ± 0,15	0,29
Конф. Be/Cu. Be/Cu. Be/Cu	11,8 (1,86)	3,81 ± 0,15	0,76
Конф. Be. Be/Cu. Be/Cu	9,8 (1,52)	3,56 ± 0,15	0,71
Конф. Be. Be. Be/Cu (200 Вт)	7,1 (1,07)	3,47 ± 0,15	0,69
Конф. Be. Be. Be/Cu (150 Вт)	5,2 (0,77)	2,91 ± 0,15	0,58
Конф. Be. Be. Be/Cu (100 Вт)	4,7 (0,65)	2,16 ± 0,15	0,43

Исходя из данных, приведенных в табл. 1, можно сделать выводы, что в мишенях кроме основных элементов бериллия (Be) и меди (Cu), присутствует определенный набор примесей, который почти полностью повторяется во всех образцах на неизменном уровне, за исключением кислорода, содержание которого достигает значений в 3,3 %.

Такое повышенное содержание кислорода в оболочках можно объяснить незначительным окислением бериллия после окончания процесса напыления, что выражается в локализации кислорода преимущественно в межслойных границах. Однако, влияние частичного окисления поверхности бериллиевого слоя требует отдельных дополнительных исследований. Методом со-распыления бериллиевой и медной мишени (в соотношении 2/1) в зависимости от подаваемой мощности на медную мишень удалось получить бериллиево-медный слой с концентрацией меди от 8,45 до 16,38 ат.%. Подаваемая мощность на медную мишень варьировалась от 1 до 20 Вт, на две бериллиевые мишени была постоянной и составляла 200 Вт. Кроме основного набора примесей характер-

ных для мишени у оболочек регистрируются незначительное содержание алюминия (Al) и кремния (Si), данные примеси, скорее всего, тоже связаны с мишенью.

Также для каждого образца, по изображениям поперечного среза, были посчитаны общая толщина оболочки, толщина бериллиево-медного слоя и проведен расчет скорости напыления бериллиево-медного слоя. Для каждого образца была проведена оценка не только средней скорости напыления бериллиево-медного слоя, но и анализ зависимости скорости напыления от подаваемой мощности и конфигурации магнетронного кластера. В табл. 2 приведены данные измерений толщины бериллиево-медного слоя и скорости напыления слоя для всех исследованных образцов.

Из данных представленных в табл. 2 следует, что:

– для получения бериллиево-медного слоя методом со-распыления бериллиевой и медной мишени, зависимость характеризуется закономерным [6] увеличением скорости напыления, при повышении

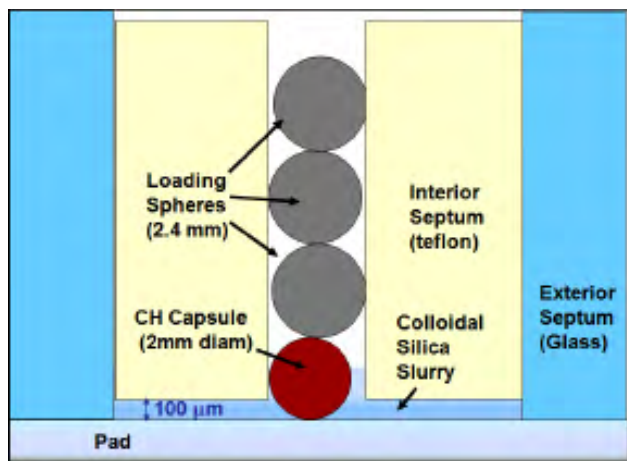
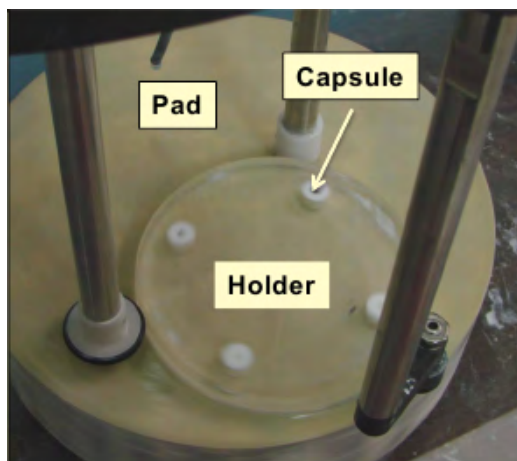


Рис. 8. Внешний вид установки для полировки полимерных оболочек [7]: Capsule – оболочка, Holder – держатель, Pad – диск

Рис. 9. Схематичный вид поперечного среза одной из гильз для загрузки оболочки [7]: Loading Spheres – шарики нагрузки, CH Capsule – полимерная оболочка, Interior Septum – внутренний тefлоновый держатель, Exterior Septum – внешний стеклянный держатель, Pad – диск с абразивной поверхностью, Colloidal Silica Slurry – коллоидальная кварцевая суспензия

Таблица 3

Значения средних параметров шероховатости внешней поверхности бериллиевых оболочек до и после полировки

Обозначение		Номер операции		
		до полир.	2-цикл полир. «м. шарик»	3-цикл полир. «м. шарик»
Оболочка № 1	Ra, нм	782	-	-
	rms, нм	1039	-	-
Оболочка № 2	Ra, нм	842	194	197
	rms, нм	1189	308	427
Оболочка № 3	Ra, нм	880	147	-
	rms, нм	1222	225	-

мощности и принимает значения 0,29, 0,31, 0,37, 0,38 и 0,44 мкм/ч при подаваемой мощности на медный магнетрон 1, 3, 7, 10 и 20 Вт;

– для получения бериллиево-медного слоя методом распыления мишени из бериллиево-медного сплава с известной концентрацией меди, зависимость также характеризуется закономерным увеличением скорости напыления, как при повышении мощности, так и при увеличении количества установленных в магнетронный кластер мишеней из сплава. Использование мишени из сплава позволило получить бериллиевые оболочки, легированные медью с концентрацией до 2 ат.% и увеличить среднюю скорость напыления до 0,76 мкм/ч, что в 1,7 раза выше, чем в случае с чисто бериллиевой оболочкой.

Как было показано ранее, с увеличением толщины стенки бериллиевой оболочки параметры шероховатости поверхности возрастают и достигают значений порядка единиц микрон для готовой оболочки, тогда как условия применимости оболочки в качестве мишени соответствует значению средней

шероховатости внешней поверхности менее 30 нм. В силу малых размеров (до 2,5 мм) и хрупкости оболочек, как полимерных, так и бериллиевых в качестве основного метода полировки было выбрано плоское полирование на кругах с различным абразивом рис. 9.

Данный метод плоского полирования применим, как к полимерным оболочкам, так и к оболочкам из металла (Ti, Be) [7] и высокоплотного углерода [8]. На рис. 8 представлен внешний вид установки для полировки полимерных оболочек. Установка представляет собой опорную плиту с гладкой поверхностью, на которой располагается вращающаяся с переменной скоростью стеклянная подложка. В подложке имеются отверстия с фторопластовыми проставками для загрузки оболочек. Процесс полировки заключается в следующем: в отверстие загружается оболочка и сверху нагружаются сферическими шариками. Далее в область контакта оболочки и опорной плиты непрерывно подается суспензия абразива на основе мелких частиц оксида кремния и запускается

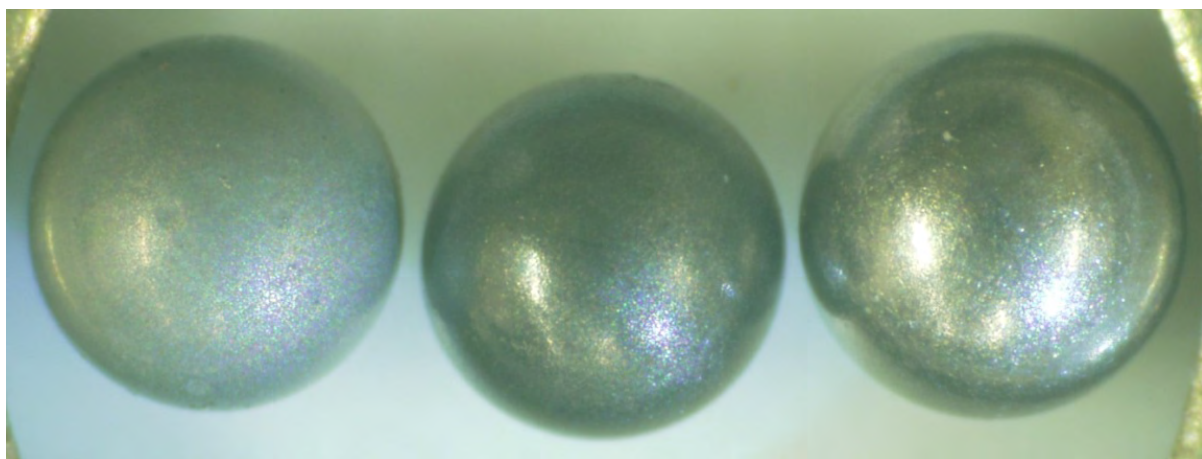


Рис. 10. Фотография бериллиевых оболочек: а – не обработанная, б, в – после полировки

вращение стеклянной подложки. За счет нагружения шариками происходит взаимодействие абразива с поверхностью оболочки и снятием материала, а вращательные движения подложки постоянно поворачивают оболочку для равномерной обработки. Результаты полировки образцов представлены в табл. 3.

Для сравнения на рис.10 представлена фотография трех бериллиевых оболочек. Если смотреть слева-направо, то сначала идет не подвергнутая обработке оболочка, потом 2-ая и 3-ья бериллиевые оболочки.

Таким образом, можно заключить, что разработанная нами схема полировки бериллиевых оболочек правильная и в дальнейшем будет совершенствоваться и использоваться для получения оболочек, не только бериллиевых, с требуемым качеством поверхности.

Литература

1. Clark D. S., Haan S. W., Cook A. W. et al., *Physics of Plasmas* 18, 082701 (2011).

2. Haan S. W., Lindl J. D., Callahan D. A. et al. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility // *Phys. Plasmas*. -2011. -Vol. 18. -P.051001 1-47.

3. Hammel B. A. et al. *High Energy Density Physics* 6. 2010.P 171-178.

4. Zhou Min-jie, Luo Bing-chi, LI Kai, et al. / *Microstructure evolution of copper doped beryllium thin films* // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22(2012) 1151–1155.

5. Берман С. И. Меднобериллиевые сплавы, их свойства применение и обработка. -М: Металлургия, 1966.

6. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: Физическое распыление одноэлементных твердых тел. Пер. с англ. / Под ред. Р. Бериша. – М.: Мир, 1985. – 336 с

7. Surawata T. I., Steele W. A., Feit M. D. et.al. Tumble finishing of CH capsules. - 20th Target fabrication meeting. Santa Fe, May 24, 2012.

8. Requieron, Huang H., Hoover D. E. et. al. - Characterization of high density carbon capsules. - 21th Target fabrication meeting. Las Vegas, Nevada, June 21-25, 2015.