

## **Технологические параметры потоков ионов разных сортов, энергий, зарядов и плотностей токов для получения требуемых физико-механических характеристик деталей с наноструктурами**

*Нац. Аэрокосм. Ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»; 3-д им. Малышева;  
ХГП 3-д им. Малышева; АДИ ДонНГУ, г. Горловка*

На основе приведенных расчетов зависимостей размера зерна, объема нанокластера и глубин его залегания, числа частиц в нанокластере от энергии и заряда иона, а также обобщения зависимостей физико-механических характеристик наноструктур (НС) от размера зерна показана возможность выбора технологических и физических параметров потоков ионов для достижения требуемых физико-механических характеристик НС, толщины и размера зерна.

**Ключевые слова:** наноструктуры, размер зерна, ионы, толщина.

### **Введение**

При действии ионов на деталь часть ионов осаждается на подложку, образуя защитное покрытие, часть проникает внутрь кристаллической решетки, при этом образуются наноструктуры как на поверхности материала в виде покрытия нанометровой толщины, так и на глубине, равной расстояниям, на которые проникают ионы различных энергий, сортов и зарядов. Таким образом, на поверхности подложки формируется покрытие, которое имеет хорошую адгезию к подложке за счет того, что в нижних слоях имеются атомы, однородные по химическому составу и свойствам.

### **Анализ основных достижений и литературы**

При взаимодействии поверхностей с ионными пучками или плазменными потоками на поверхности твердого тела и в его поверхностном слое протекает ряд процессов, которые определяют качество получаемых покрытий, их состав, скорость их нанесения и определенное качество изделия. Процессы, проходящие вблизи поверхности, влияют в основном на скорость нанесения покрытия и состав пленки. Те процессы, которые протекают в приповерхностном слое, обуславливают образование формируемой структуры и качественных показателей покрытия [1–18].

Вероятность каждого из процессов сложным образом зависит от свойств самих ионов (масса, величина заряда), скорости его движения и угла столкновения с поверхностью, а также от состава, температуры, физико-энергетических свойств. Все это расширяет диапазон возможных плазменных технологий.

Поэтому так важно проанализировать обстановку при действии различных ионов на подложку и при конденсации на нее покрытия.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрирования технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники», «Концепция создания наноструктур, нано– и традиционных покрытий с ростом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

### **Постановка задачи и цели исследования**

Действие заряженных частиц на конструкционные материалы приводит к появлению на глубине довольно высоких температур. При действии индивидуальных ионов разных сортов и энергий, в зоне теплового воздействия есть вероятность появления температурных напряжений значительной величины, что подтверждает возможность зарождения локальных зон, где достигаются условия появления наноструктур [1].

Схема, изображенная на рис. 1, позволяет исходя из зависимостей физико-механических характеристики от размера зерна получить технологические параметры потоков ионов разных сортов, зарядов и энергий, а также соответствующих плотностей токов.

Все это говорит о реальной возможности уже сейчас получать с достаточной степенью достоверности наноструктуры с прогнозируемыми свойствами.

Рассмотрим подробнее реализацию этого алгоритма.

Благодаря разработанной методике на основе созданной модели действия ионов различных энергий, сортов, зарядов и плотностей токов получаем поле температур и температурных напряжений, в котором находим объем, в котором реализуются требуемые температуры, скорости их нарастания, и оцениваем ускорения процесса за счет действия температурных напряжений, которые еще недостаточны для образования наноструктур, но которые существенно способствуют их образованию за счет получаемых температур и скоростей их нарастания. Таким образом, получив зону образования нанокластера (максимальную и минимальную глубину залегания нанокластера НСК) и его объем, варьируя сортом, зарядом и энергией ионов, можно заполнить слой довольно большой толщины нанокластерами, причем для каждого слоя вычисляем плотность тока. Зная зависимости (рассчитанные нами) размера зерна от энергии, заряда и сорта частицы, а также по оценке ФМХ от размера зерна, можем определить размер зерна, а следовательно, и ФМХ слоев. В то же время по параметрам потоков ионов находим число частиц в нанокластере, по которому определяем, поверхностная ( $n < 4$ ) или объемная ( $n > 4$ ) НС.

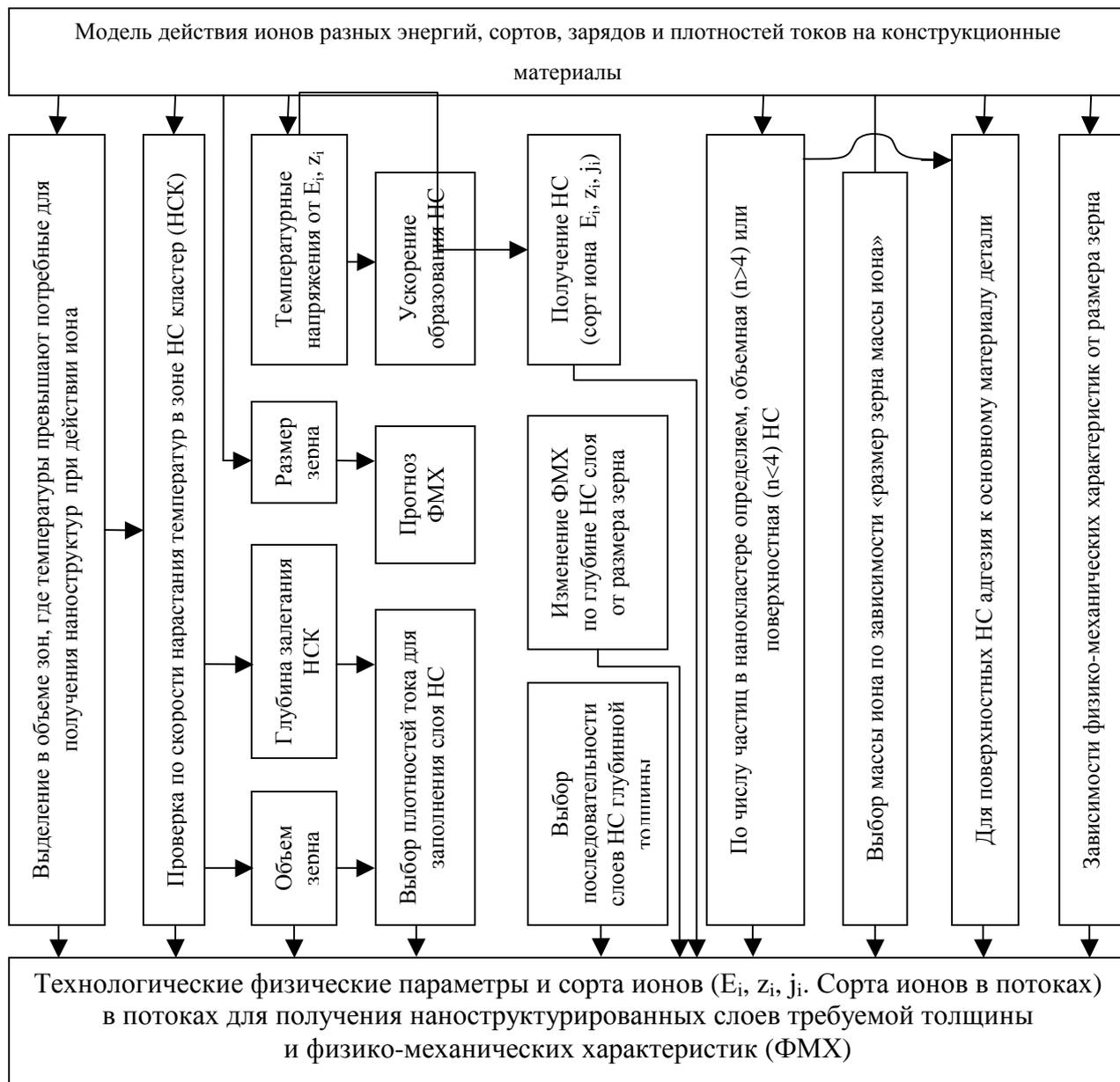


Рис. 1. Технологические физические параметры и сорта ионов ( $E_i, z_i, j_i$ . Сорта ионов в потоках) в потоках для получения наноструктурированных слоев требуемой толщины и физико-механических характеристик (ФМХ)

Для поверхностных НС осуществляется проверка на адгезию к основному материалу детали.

В конечном счете предлагаемый алгоритм и методику выбора технологических и физических параметров потоков ионов разных сортов, энергий и зарядов можно использовать для получения наноструктур и нанопокровов требуемой толщины, размера зерна и необходимых физико-механических характеристик.

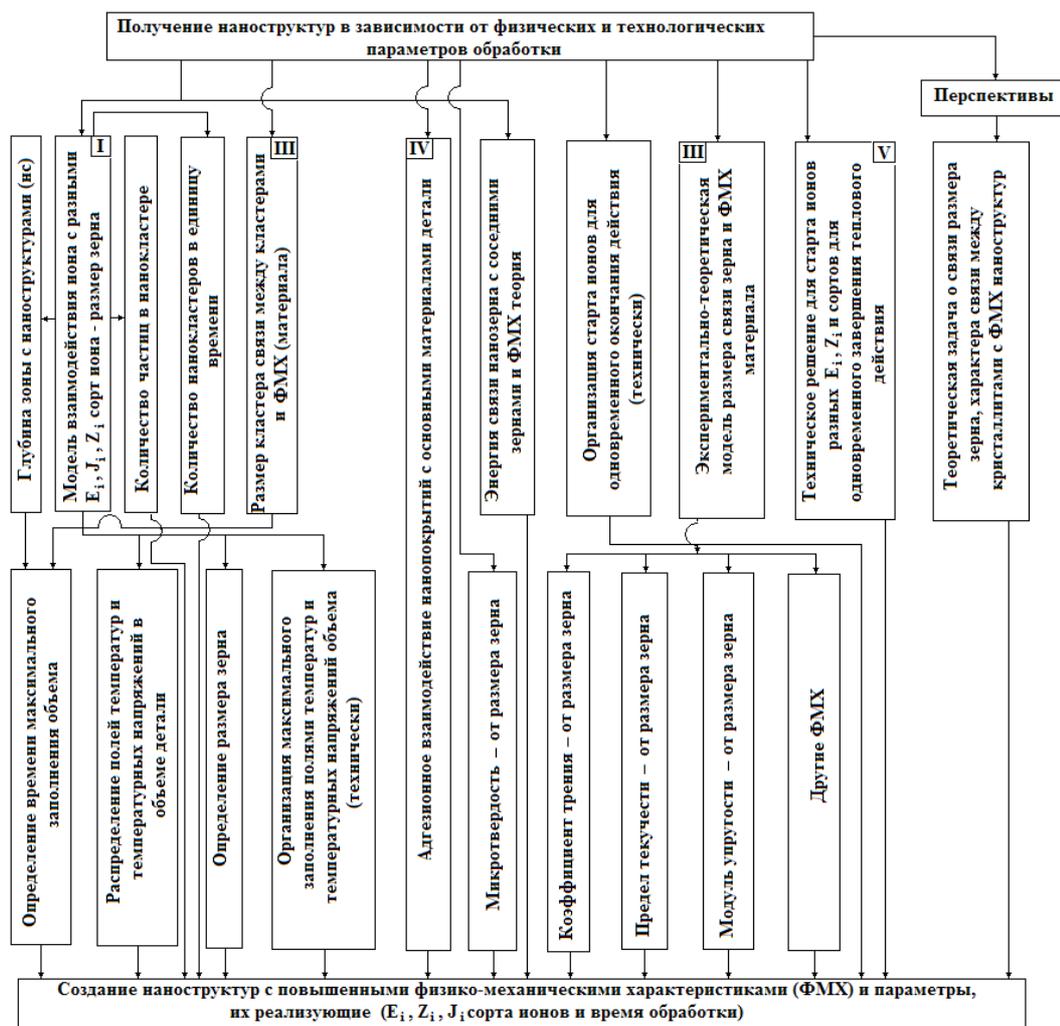


Рис. 2. Процессы, реализующиеся при образовании наноструктур с высокими физико-механическими характеристиками

Было рассмотрено действие широкого круга ионов: C, N, B, Al, V, Ti, Cr, Fe, Ni, Co, Y, Zr, Mo, Hf Ta, W, Pt. Энергии частиц  $E=200, 2000, 20000$ , зарядовое число ионов равно 1, 2, 3.

Целью исследования является создание методики выбора технологических и физических параметров потоков ионов для получения наноструктур требуемых размеров зерна, физико-механических характеристик и толщин.

### Результаты исследования

#### Определение требуемого размера зерна НС и физических параметров потока, обеспечивающих его получение

Для ряда упрочняемых материалов можно воспользоваться экспериментально полученными зависимостями физико-механических характеристик (ФМХ) от размера зерна (рис. 3–6) или обобщенными зависимостями [1].

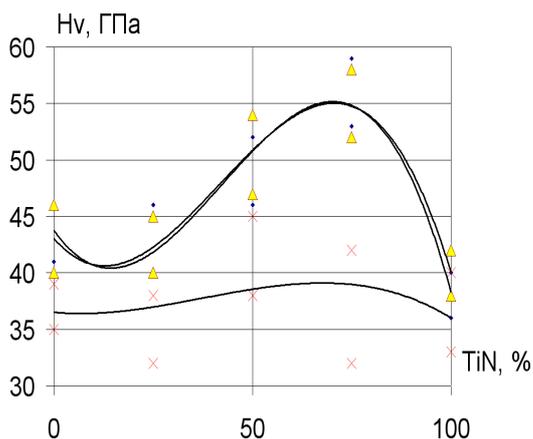


Рис. 3. Зависимость микротвердости от процентного состава TiN в покрытии TiB<sub>2</sub>+TiN (размер кристаллов 3-10,2нм)

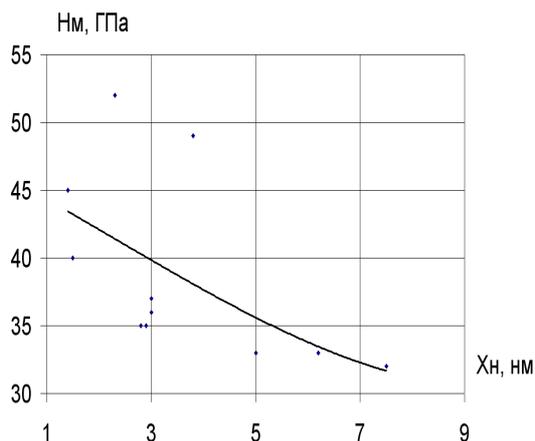


Рис. 4. Микротвердость покрытия в зависимости от размера кристалла

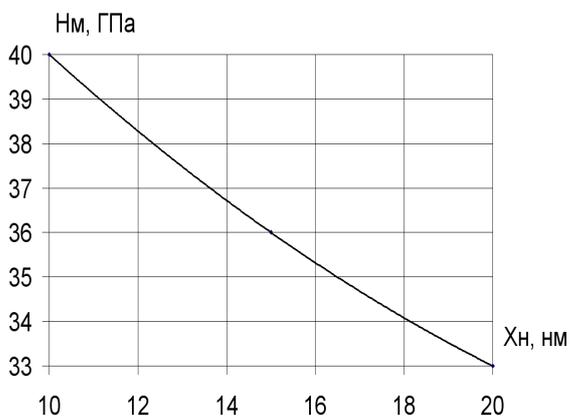


Рис. 5. Микротвердость покрытия от размера зерна по данным работы

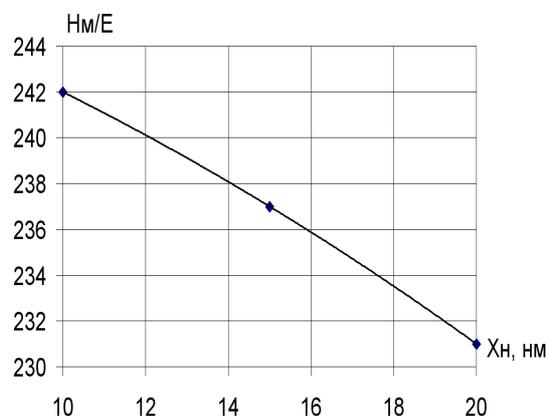


Рис. 6. Зависимость микротвердости от размера зерна по данным работы

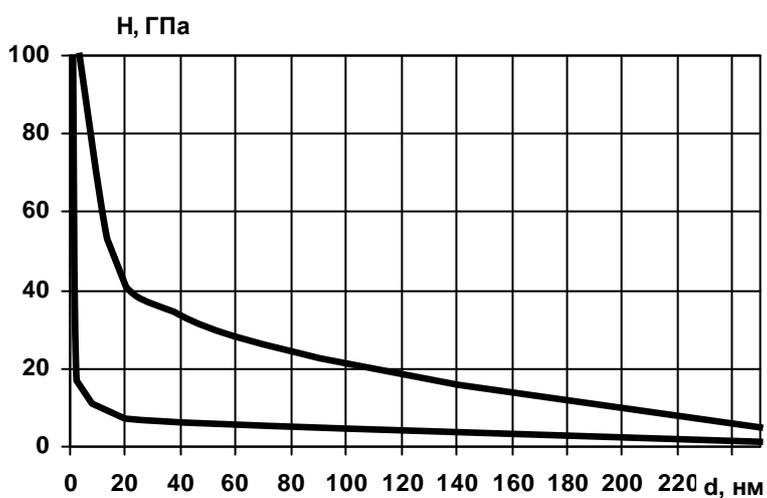


Рис. 7. Результаты обобщения зависимости микротвердости от размера зерна: 1 – максимальные значения; 2 – минимальные значения

Например, для микротвердости (рис. 7) и предела текучести от размера зерна (рис. 8) можно выбрать диапазон размеров зерна, позволяющий получить требуемые ФМХ. По зависимостям размера зерна, от энергии и заряда определяется диапазон последних.

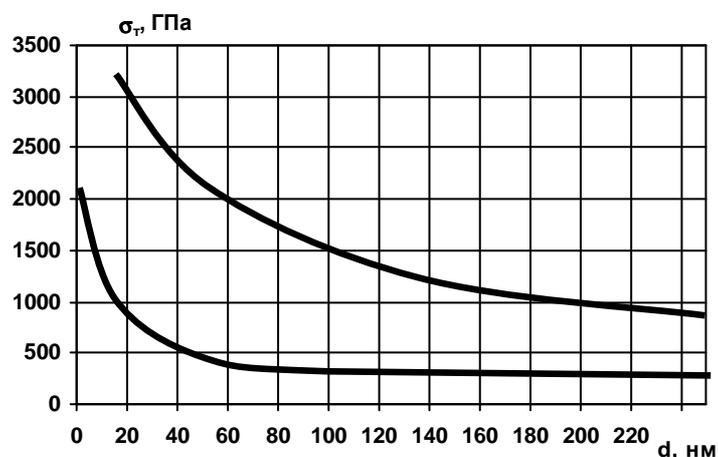


Рис. 8. Результаты обобщения зависимости предела текучести от размера зерна по работе

### Оценка возможной и требуемой толщины слоя НС

По рассчитанным [20] зависимостям максимальной и минимальной глубины залегания объема НС от энергии и заряда иона (рис. 9), выбираются физические параметры потоков, обеспечивающие заполнение слоев по глубине, необходимо, чтобы объем каждого слоя был достаточно заполнен на 70...90%, что обеспечивается выбором соответствующей плотности тока, которая определяется от объема НС (зависимости которого от энергии и заряда ионов показаны на рис. 10), максимальной и минимальной глубине залегания наноструктуры (рис. 11), по которой можно получить плотность тока в соответствующем потоке ионов для каждого слоя:

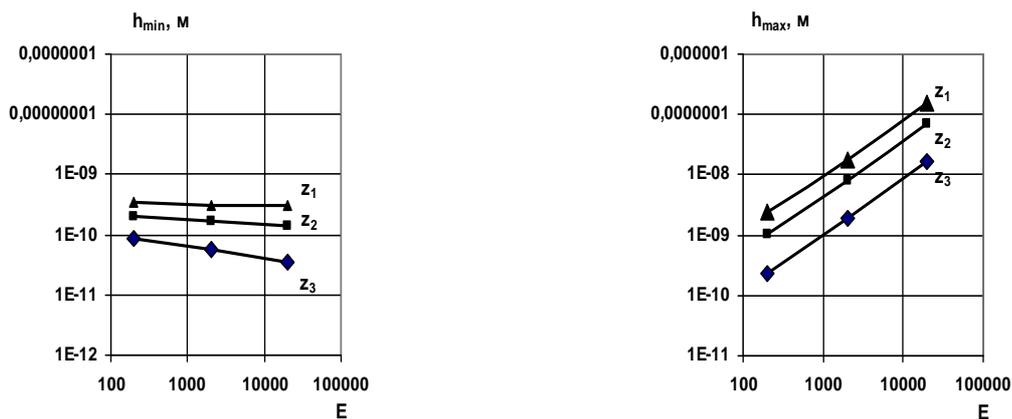
$$j_i = \frac{h_{max_i} - h_{min_i}}{V_i} eZ.$$

где  $h_{max_i}$  и  $h_{min_i}$  – максимальная и минимальная глубина залегания объема НС в слое;

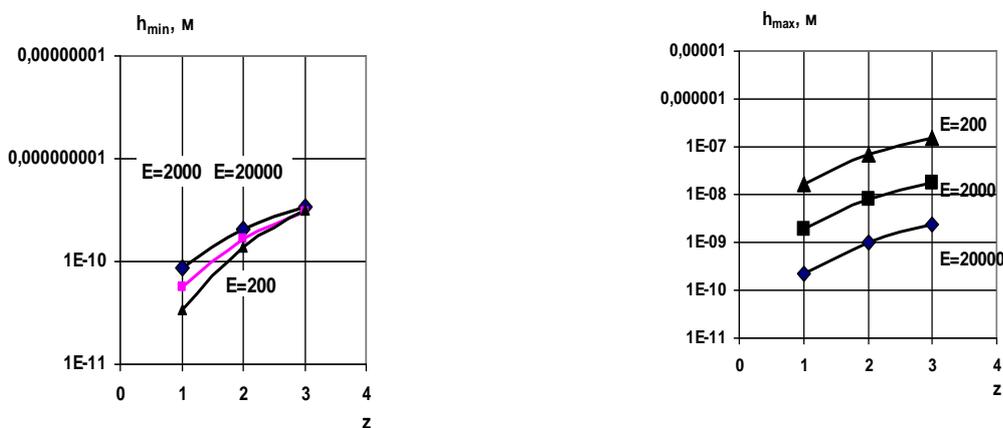
$V_i$  – объем НС в соответствующем слое;

$e$  – заряд электрона;

$Z$  – зарядовое число иона.



а



б

Рис. 9. Зависимости минимальной  $h_1$  и максимальной  $h_2$  глубины получения нанослоя от энергии (а) и заряда ионов (б) (ионы Y, Zr, Nb, Mo)

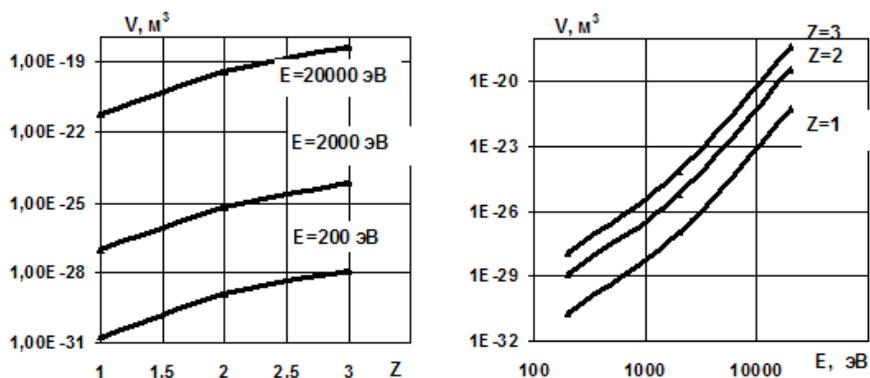


Рис. 10. Зависимость объема наноструктур от заряда и энергии ионов Mo; Hf, Ta, W, Pt

Последовательность выбора потоков ионов осуществляется таким образом, чтобы поток ионов с максимально возможной глубиной (см. рис. 8) проникновения обеспечивал требуемую глубину наноструктурированного слоя. Следующий поток ионов должен иметь максимальную глубину, близкую к минимальной предыдущего, и так до минимальной глубины, т.е. до поверхностной

наноструктуры, когда число частиц в нанокластере – менее четырех (см. зависимости числа частиц в нанокластере от энергии и заряда ионов, например, рис. 11).

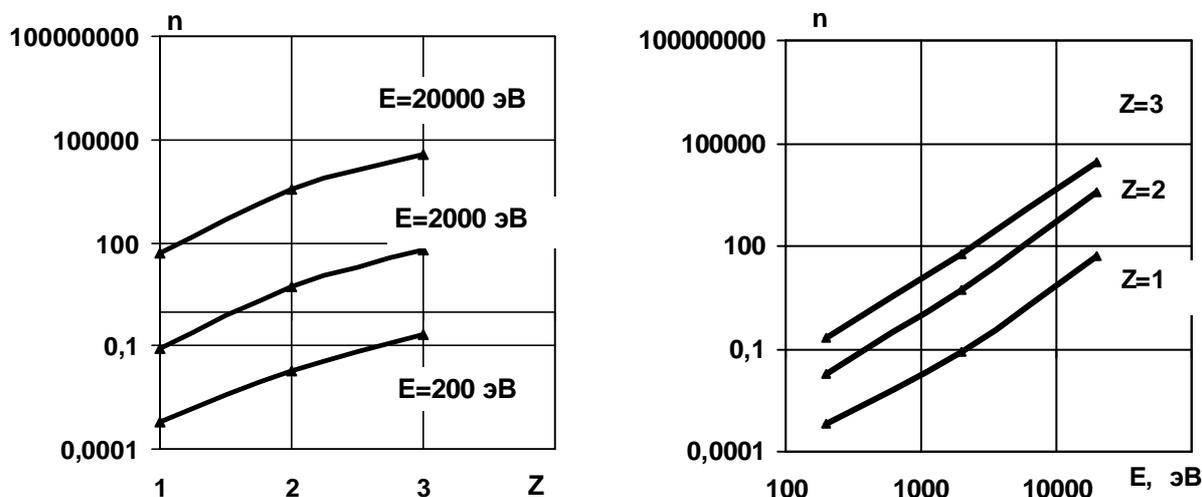


Рис. 11. Зависимость числа частиц в нанокластере от заряда и энергии ионов Y, Zr, Mo

**Пример выбора технологических и физических параметров потоков ионов разных энергий, сортов, заряда для получения наноструктур с требуемыми ФМХ, толщиной и размерами зерна**

Рассмотрим случай, когда требуется поверхностный слой наноструктуры микротвердости 40 ГПа, пределом текучести 2,5 ГПа и толщиной  $2 \cdot 10^{-6}$  м.

Проведя в предложенной последовательности расчеты по графикам рис. 5 и 6, получим требуемый размер зерна, сорт, энергию  $E_i$  и заряд иона  $q_i$ , максимальную и минимальную глубину залегания объема наноструктуры  $h_1$  и  $h_2$ . Объем наноструктуры  $V_i$ , число частиц в нанокластере  $n$  и плотность ионного тока  $j_i$  для всех рассмотренных слоев результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физические параметры потоков ионов соответствующего сорта, энергии  $E_i$ , зарядного числа  $Z$ , плотности тока ионов  $j_i$  при получении НС на максимальной и минимальной глубинах  $h_1$  и  $h_2$ , объема  $V_i$ , при числе частиц в нанокластерах  $n$

Номер слоя	Сорт иона	$E_i$ , эВ	$Z$	$\alpha$ , нм	$h_1$ , нм	$h_2$ , нм	$V_i$ , мм <sup>3</sup>	$j_i$ , А/м <sup>2</sup>	$n$
1	W	200	1	4	$9 \cdot 10^{-11}$	$1,7 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-30}$	$1,3 \cdot 10^6$	$10^{-1}$
2	Nf	1000	1	5	$10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-28}$	1,6	5
3	Zr	1000	3	7	$8 \cdot 10^{-9}$	$10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-25}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	17
4	Hf	$2 \cdot 10^4$	3	27	$2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-18}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^3$

По известной физической характеристике – плотности ионного тока – можно получить технологические параметры – напряжение  $U$ , ток дуги  $I_D$ , потенциал подложки  $U_n$ , для чего воспользуемся результатами [2].

Все это показывает, что есть реальная возможность получения наноструктур по выбранным физическим и технологическим параметрам потоков ионов.

### Вывод

Предложена методика выбора технологических и физических параметров потоков ионов разных энергий, зарядов и сортов для получения наноструктур с заданными толщиной, физико-механическими характеристиками, размером зерна.

### Список литературы

1. Костюк, Г.И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр./ Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
2. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с.
3. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с.
4. Костюк, Г.И. Наноструктуры и нанопокрyтия: перспективы и реальность [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. Костюк, Г.И. Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
6. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
7. Костюк, Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г.И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с.
8. Костюк, Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства [Текст]: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с.
9. Гречихин, Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л.И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
10. Аксенов И.И. Вакуумная дуга. Источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное моделирование [Текст] / И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.А. Белоус и др. – К.: Наук. думка, 2012. – 727 с.
11. Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] /

И.И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.

12. Хаякава, С. Ядерно-физический аспект [Текст]: в 2 кн. / С. Хаякава. – М.: Мир, 1973. – Кн. 2. – 701 с.

13. Готт, Ю.В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях [Текст] / Ю.В. Готт. – М.: Атомиздат, 1978. – 271 с.

14. Гусев, А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А.И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.

15. Гусев, А.И. Наноматериалы наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.

16. Решетняк, Е.Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А.И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники.- 2008. – № 2. – С. 119 – 130.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 07.06.2013

## **Технологічні параметри потоків іонів різних сортів, енергій, зарядів і густин струмів для отримання необхідних фізико-механічних характеристик деталей з наноструктурами**

На основі проведених розрахунків залежностей розміра зерна, об'єму нанокластера, глибини його залягання, числа часток у нанокластері від енергії та заряду іона, а також узагальнення залежностей фізико-механічних характеристик наноструктур від розміру зерна доведено можливість вибору технологічних і фізичних параметрів потоків іонів для досягнення потрібних фізико-механічних характеристик НС, товщини та розміру зерна.

**Ключеві слова:** наноструктури, розмір зерна, іони, товщина.

## **Tehnologicheskіe parameters of the flows of ions of different varieties, energy, charge and current densities to achieve the desired physical and mechanical characteristics of parts with nanostructures**

On the basis of the calculation of the dependence of the grain size, the amount of the nanocluster and its depth, the number of particles in the nanoclusters on the energy and ion charge, as well as generalized dependence of physical and mechanical properties of nanostructures on the grain size shows the choice of technology and the physical parameters of ion beams to achieve the required physical and mechanical characteristics of the nanostructures, the layer thickness and grain size.

**Keywords:** nanostructures, grain size, ions and the layer thickness.