

УДК 539.21:541.182

О.О. БРУЯКА

Автомобильно-дорожный институт государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка, Украина

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКОВ ИОНОВ РАЗНЫХ СОРТОВ, ЭНЕРГИЙ И ЗАРЯДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОЕВ НАНОСТРУКТУР, ТРЕБУЕМЫХ РАЗМЕРОВ ЗЕРНА, ТОЛЩИН И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Решалась совместная задача теплопроводности и термоупругости, в результате решения которой по предложенным критериям получения наноструктур (НС): по диапазону температур, скоростей их нарастания и величин температурных напряжений определялись зоны материала, где в объеме детали рассчитанные значения температур, скоростей их нарастания и температурных напряжений обеспечивают получение наноструктур. На основе приведенных результатов расчетов зависимостей размера зерна, объема нанокластера и глубин его залегания, числа частиц в нанокластере от энергии, сорта и заряда иона, а также обобщения зависимостей физико-механических характеристик наноструктур от размера зерна показана возможность выбора технологических и физических параметров потоков ионов для достижения требуемых физико-механических характеристик НС, толщины слоя и размера зерна.

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

При действии ионов на деталь, часть ионов осажается 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.

Наноструктурированные материалы обладают повышенными физико-механическими характеристиками и поэтому технология их получения важна для широкого использования наноструктур в авиационно-космической технике. Все это позволит также повысить ресурс и надежность пар трения за счет снижения коэффициента трения, а также элементов конструкций, работающих при динамических нагрузках.

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 нане-

сения 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 интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники», «Концепция создания наноструктур, нано и традиционных покрытий с учетом влияния адге-

зии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», хозяйственных 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].

Было рассмотрено действие широкого круга ионов: С, N, В, Al, V, Ti, Cr, Fe, Ni, Co, Y, Zr, Mo, Hf Ta, W, Pt. Энергии частиц $E=200, 2000, 20000$ эВ, 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 (см. рис. 1-4) или обобщенными зависимостями [1].

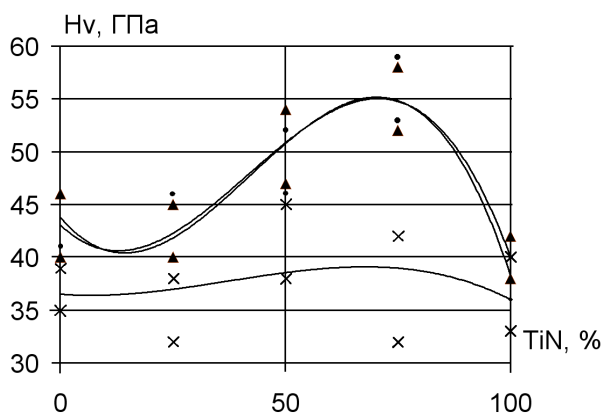


Рис. 1. Зависимость микротвердости от процентного состава TiN в покрытии TiB_2+TiN (размер кристаллов 3-10,2 нм) [15]: экспериментальные значения при $\blacktriangle - E_1=350$ эВ, $\bullet - E_1=500$ эВ, $\times - E_1=110$ эВ

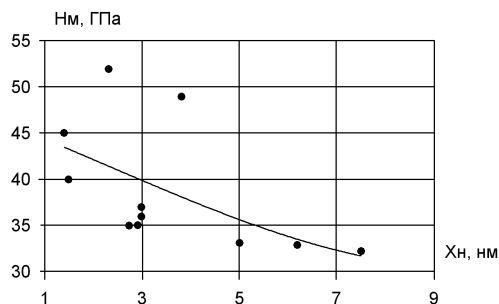


Рис. 2. Микротвердость покрытия в зависимости от размера кристалла [16]: экспериментальные значения при $\bullet - E_1=250$ эВ

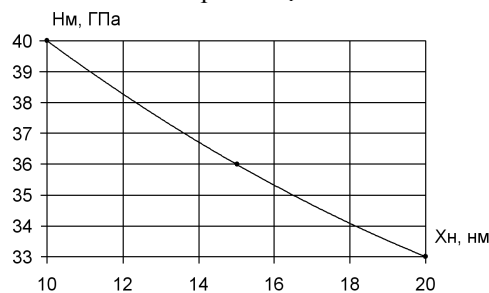


Рис. 3. Микротвердость покрытия от размера зерна по данным работы [17]

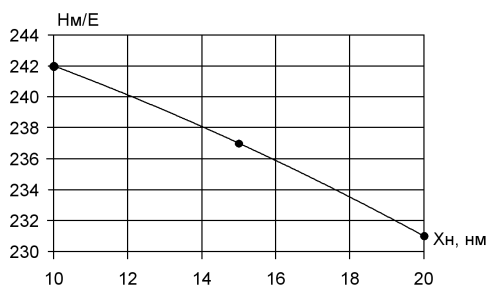


Рис. 4. Зависимость микротвердости от размера зерна по данным работы [18]

Например, для микротвердости (рис. 5) и предела текучести от (рис. 6) размера зерна можно выбрать диапазон размеров зерна [19], позволяющий получить требуемые ФМХ. По зависимостям размера зерна, от энергии и заряда определяется диапазон последних для получения необходимых ФМХ.

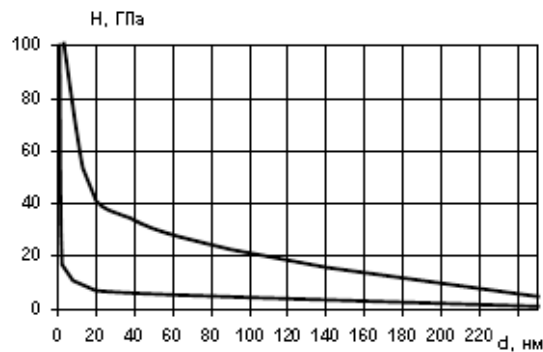


Рис. 5. Результаты обобщения зависимости микротвердости от размера зерна: 1 – максимальные значения; 2 – минимальные значения

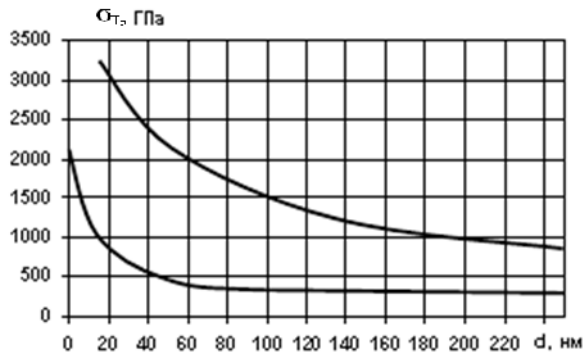


Рис. 6. Результаты обобщения зависимости предела текучести от размера зерна по работе [1]

Оценка возможной и требуемой толщины слоя НС

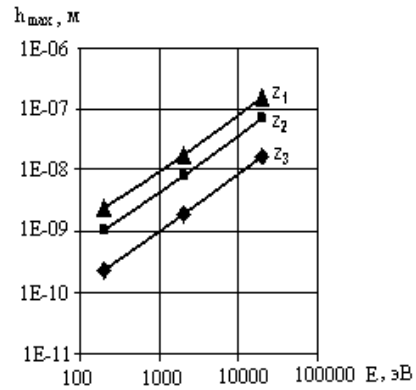
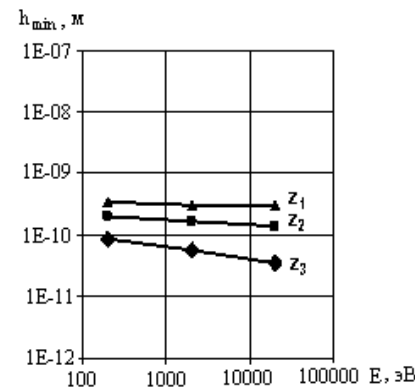
По рассчитанным [20] зависимостям максимальной и минимальной глубины залегания объема НС от энергии и заряда иона (рис. 7), выбираются физические параметры потоков, обеспечивающие заполнение слоев по глубине. Необходимо, чтобы объем каждого слоя был заполнен на 70-90%, что обеспечивается выбором соответствующей плотности тока, которая определяется объемом НС (зависимости которого от энергии и заряда ионов пред-

ставлены на рис. 8) и максимальной и минимальной глубиной залегания наноструктуры (рис. 7), по которой можно получить плотность тока в соответствующем потоке ионов для каждого слоя:

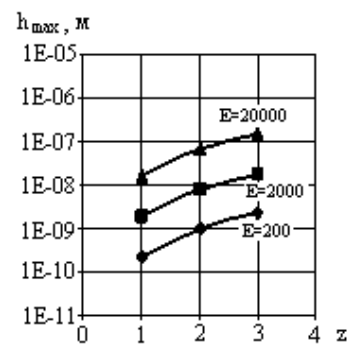
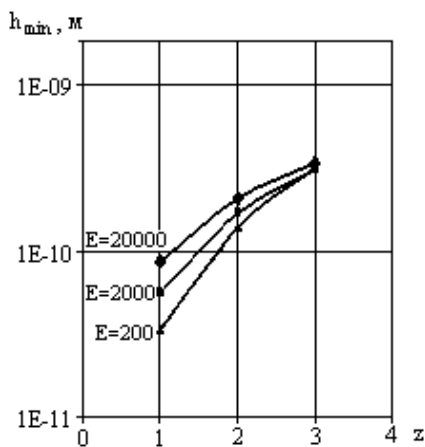
$$j_i = \frac{h_{\max_i} - h_{\min_i}}{V_i} eZ,$$

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.

Последовательность выбора потоков ионов осуществляется таким образом, чтобы поток ионов с максимально возможной глубиной (рис. 7) 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. 9).



а



б

Рис. 7. Зависимости минимальной h_1 и максимальной h_2 глубины получения нанослоя от энергии (а) и заряда ионов (б) (ионы Y, Zr, Nb, Mo)

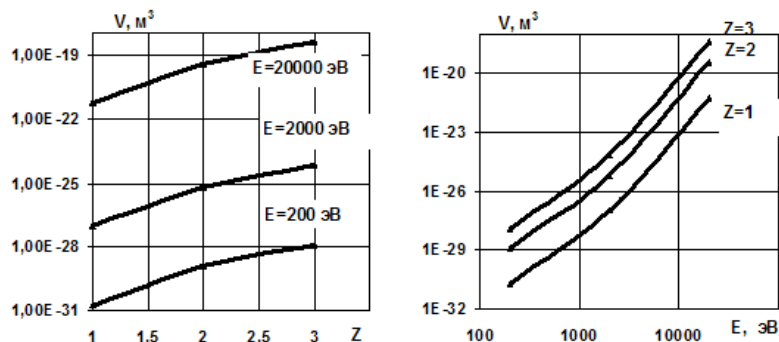


Рис. 8. Зависимость объема наноструктур от заряда и энергии ионов: Mo; Hf, Ta, W, Pt

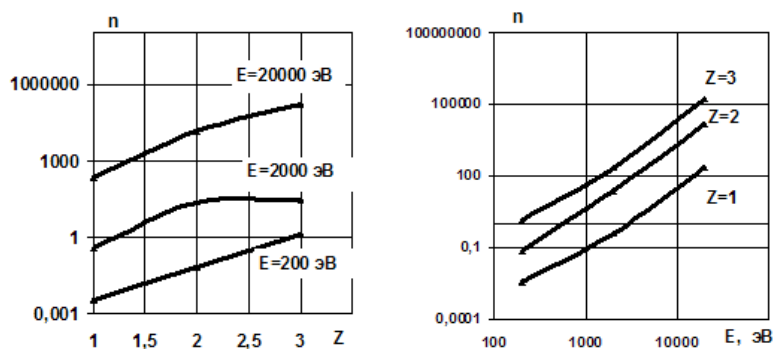


Рис. 9. Зависимость числа частиц в нанокластере от заряда и энергии ионов: Y, Zr, Mo

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 из графиков рис. 5 и 6, получим требуемый размер зерна, сорт, энергию E_i и заряд иона q_i , максимальную и минимальную глубины залегания объема наноструктуры h_1 и h_2 (рис. 7). Объем

наноструктуры – V_i (рис. 8), число частиц в нанокластере – n (рис. 9) и плотность ионного тока j_i , для всех рассмотренных слоев результаты представлены в табл. 1.

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.

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 глубине h_1 и h_2 , объема V_i , при числе частиц в нанокластерах n

№ слоя	Сорт иона	E_i , эВ	Z	α , нм	h_1 , нм	h_2 , нм	V_i , мм ³	j_i , А/м ²	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	Nb	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	$2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-18}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^3$

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.

Литература

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 нанопокрывания: 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. – 397с.
10. Вакуумная дуга. Источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование [Текст] / И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.А. Белоус, В.Е. Стрельницкий, В.М. Хороших. – Киев, Наукова 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. Физика космических лучей. 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 отделение, 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.
17. Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р.А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50–56.
18. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А.А Гончаров, П.И. Игнатенко, В.В. Петухов и др. // Журнал техн. физики. – 2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 68–95.
19. Костюк, Г.И. Модель определения размера зерна наноструктуры в детали при действии ионов различных сортов, зарядов и энергий и физико-механические характеристики детали [Текст] / Г.И. Костюк, А.Н. Костюк, О.О. Бруяка // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 55. – Х., 2012. – С. 85–97.
20. Костюк, Г.И. Исследование влияния энергии ионов, их сорта и заряда на величину объема наноструктуры и эффективной плотности тока для получения наноструктур [Текст] / Г.И. Костюк, Е.Г. Костюк, Л.В. Лобанова // Вісник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 53 (959). – С. 165–174.
21. Костюк, Г.И. Влияние сорта, заряда и энергии иона на число частиц в нанокластере [Текст] / Г.И. Костюк, А.Н. Костюк, Е.В. Воляк // Вісник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 53(959). – С. 145–149.

Поступила в редакцию 22.03.2013, рассмотрена на редколлегии 10.04.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Технологии производства авиационных двигателей» А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

ВИБІР ТЕХНОЛОГІЧНИХ І ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКІВ ІОНІВ РІЗНИХ СОРТІВ, ЕНЕРГІЙ І ЗАРЯДІВ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ШАРІВ НАНОСТРУКТУР, НЕОБХІДНИХ РОЗМІРІВ ЗЕРНА, ТОВЩИНИ І ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

О.О. Бруйка

Вирішувалась сумісна задача теплопровідності та термопружності, у результаті вирішення якої по наведеним критеріям одержання наноструктур (НС): по діапазону температур, швидкостей їх зростання та величин температурних напружень знаходились зони матеріалу, де в об'ємі деталі розраховані значення температур, швидкостей їх зростання та температурних напружень забезпечують отримання наноструктур. На основі приведених 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 шару та розміру зерна.

Ключові слова: наноструктури, розмір зерна, іони, товщина шару.

SELECTION OF TECHNOLOGICAL AND PHYSICAL PARAMETERS OF THE FLOW OF IONS OF DIFFERENT VARIETIES, ENERGY AND CHARGE FOR LAYERS NANOSTRUCTURES REQUIRED GRAIN SIZE, THICKNESS AND PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS

О.О. Бруйка

Heat conduction problem is solved together and thermoelasticity, resulting in solutions which on the proposed criteria for fabricating nanostructures (NS): over a range of temperatures, and the growth rates of their values to determine where the thermal stress of the material, where the amount of detail the calculated values of the temperature, velocity of rise and thermal stresses ensure chiva-obtaining nanostructures. On the basis of the calculation results of the grain size dependence, the volume of the nanocluster and its depth, the number of particles in a nanocluster of energy, quality and ionic charge, as well as summarize the dependence of physical and mechanical properties of nanostructures on the grain size shows the choice of technology and the physical parameters of the flow ions to achieve friction buoy physical and mechanical properties of nanostructures, layer thickness and grain size.

Key words: nanostructures, grain size, ions and the layer thickness.

Бруйка Ольга Олеговна – канд. техн. наук, доцент кафедри фізики, Автомобильно-дорожный институт государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка, Украина.