

doi: 10.32620/oikit.2019.83.06

УДК 621.865.6

\* Г. И. Костюк, \*\* В. В. Попов

## Научные принципы конструирования режущего инструмента с нанопокрытиями и наноструктурами

\* *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»*, \*\* *ПАО «ФЭД»*

Рассмотрено действие ионов бора, азота, иттрия и гафния на модифицированный ВК10 (WC – 79.7 % Co – 9,5 % + CrN – 1,3 % + AlN – 6.5 % + TiN – 3 %), ВК20 (WC – 80.00 %) и ВК10 (WC – 90.00 %). Показана возможность получения наноструктур. Определено, что величина энергии ионов и зарядность иона существенно влияют на размер зерна. С ростом энергии и величины заряда размер зерна растет; рост процентного состава карбида вольфрама приводит к росту зерна, причем с увеличением массы иона – к уменьшению размера зерна более существенно, что может быть использовано для получения необходимого размера зерна. Проектирование химического состава материала режущего инструмента с учетом возможности образования наноструктур показывает, что далеко не всегда увеличение доли карбида вольфрама увеличивает работоспособность и эффективность инструмента, а часто размер зерна оказывает определяющее воздействие. Показана возможность конструирования химического состава основного материала режущего инструмента с учетом его упрочнения за счет образования наноструктур и нанопокрытия.

**Ключевые слова:** наноструктуры, проектирование химического состава режущего инструмента, объем зерна, твердый сплав.

### Введение

Ещё в Советском Союзе проектирование режущего инструмента проводилось с учётом обрабатываемого материала, что позволяло избавляться от таких эффектов, как повышенный износ режущего инструмента (РИ) по передней поверхности, так как в современных пластинах не учитывается характер взаимодействия стружки с передней поверхностью, что приводит к образованию одной или двух лунок на передней поверхности РИ, чего не было на пластинах, созданных в Советском Союзе. Технологические сложности получения пластин с необходимым профилем для перемещения стружки привели к тому, что в настоящее время обычно не учитывается характер движения стружки по передней поверхности, а обеспечивается максимальная изгибная прочность пластины в зоне резания. Всё это приводит к существенному износу по передней поверхности, а в дальнейшем к разрушению режущей кромки.

Нами были проделаны исследования влияния доли компонента различных сплавов на их возможности с учётом образования наноструктур и нанопокрытий. Так, в работе [1] показано влияние доли карбида титана в твёрдом сплаве на основе карбида титана и оксида алюминия (TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Оказалось, что при образовании наноструктур наиболее удачным будет их соотношение 50/50. Таких твёрдых сплавов не существует, это свидетельствует о том, что в каждом конкретном случае необходимо учитывать возможность получения наноструктур с минимальным размером зерна (но не меньше 10 нм), когда реализуется максимальная микротвёрдость поверхностного слоя. Это дает возможность прогнозировать высокую износостойкость такого режущего инструмента (рассматривались ионы азота, цирконий, гафний), которая позволяет обеспечить минимальное схватывание со многими обрабатываемыми материалами, в том числе и с титановыми

сплавами. Аналогичные исследования были проведены для однокарбидных твёрдых сплавов, где оценивалось влияние доли карбида вольфрама на объём зерна. Оказалось, что при использовании твёрдого сплава с 86 % карбида вольфрама будет реализован минимальный размер зерна. Всё это позволяет, используя те же ионы, что и в предыдущем случае, получать минимальный объём зерна, что будет обеспечивать максимально возможную микротвёрдость, а также соответственно максимальную износостойкость. В работах [3–5] экспериментально показано, что при соотношении 79,7 % карбида вольфрама WC, 9,5 % кобальта, 6,3 % нитрида алюминия, 1,2 % нитрида хрома, 3 % нитрида титана получаем минимальный размер зерна на поверхности при бомбардировке ионами азота, циркония и гафния. В этом случае также образуется минимальный размер зерна [5], тогда как при обработке пластин фирмы Сандвик Коромант реализуется размер зерна, несколько больший, чем в первом случае. При этом стойкость пластин, а следовательно, и снимаемый объём материала за период стойкости в первом случае будет в 1,3–1,5 раза больше, чем Сандвик Коромант. Это свидетельствует, что есть возможность, модифицируя твёрдый сплав BK10, обеспечить лучшую работоспособность и эффективность по сравнению с Сандвик Коромант (лидер производства режущего инструмента в мире) [6]. Следовательно, при конструировании режущего инструмента необходимо учитывать возможности его упрочнения путем создания наноструктур и нанопокровов. Это говорит о важности создания научных принципов конструирования РИ с наноструктурами и нанопокровов, которые позволят повысить работоспособность (стойкость РИ) и эффективность (снимаемый объём материала за период стойкости).

Работа выполнена 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» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

### **1. Состояние вопроса**

Результаты теоретических исследований, которые представлены в работах [8–14], показали, что можно получить наноструктуры при действии ионов разных сортов, зарядов и энергии. В то же время есть перспектива получения наноструктур при действии лазерного излучения, особенно при действии фемтосекундных лазеров, которые обеспечивают высокую производительность и малую мощность при обработке РИ [10]. Экспериментально было показано, что можно получить высокую микротвёрдость при малом размере зерна [9], а также повысить работоспособность – стойкость РИ и снимаемого объёма материала за период стойкости РИ [5, 6]. Аналогичные исследования были проведены при действии лазерного излучения, что показало возможность повышения работоспособности и эффективности РИ из быстрорежущих сталей, а также однокарбидных твёрдых сплавов [9].

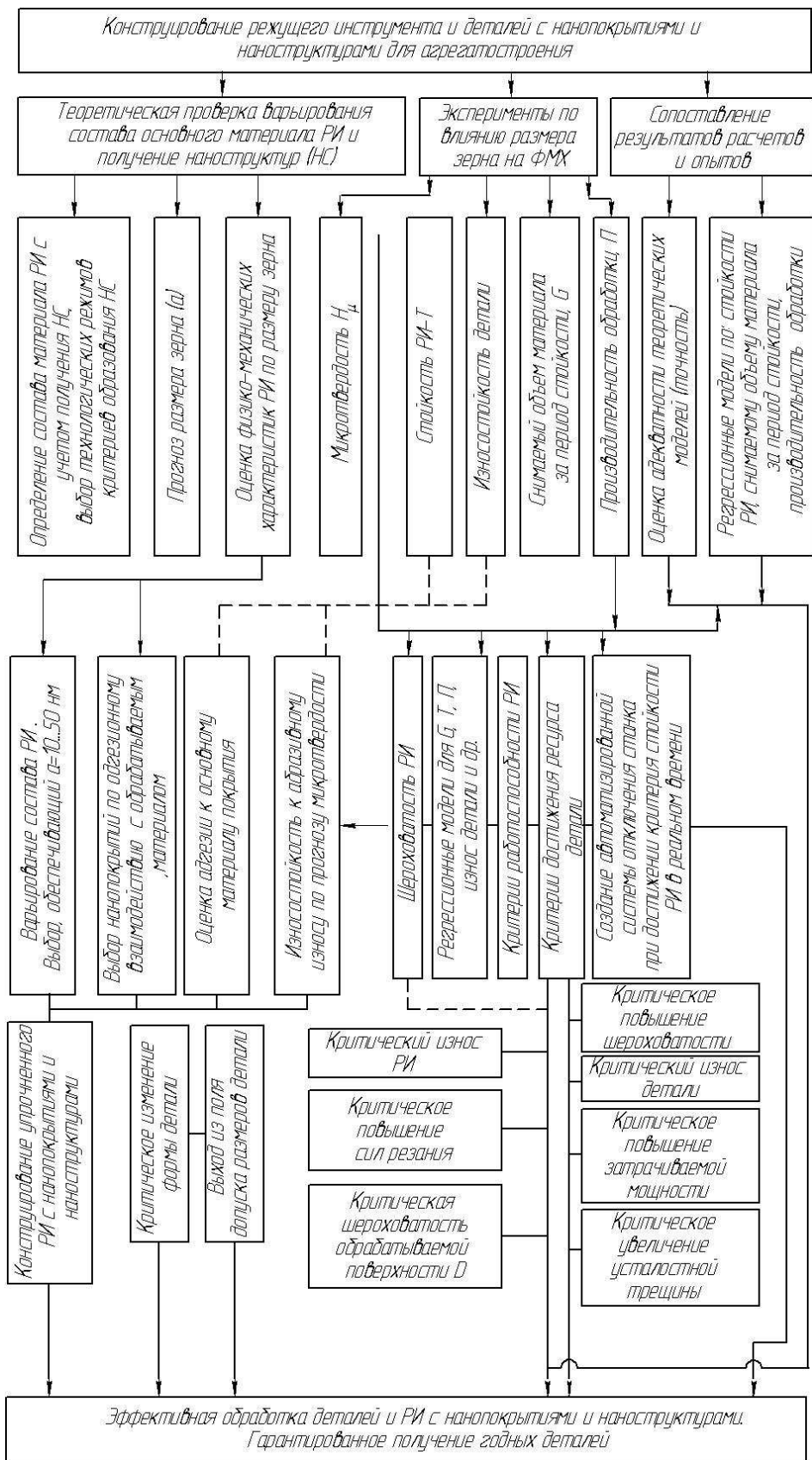


Рис. 1. Схема конструирования РИ и деталей с нанопокрывтиями и наноструктурами, обеспечивающими эффективную обработку деталей и высокий ресурс и надежность последних для агрегатостроения

Проанализируем процессы, реализующиеся при нанесении нанопокровтий и образовании наноструктур, и как их использовать при конструировании режущего инструмента и деталей для обеспечения эффективной обработки деталей, надежности и высокого ресурса деталей. Для этого рассмотрим схему, показанную на рис. 1.

Видно, что конструирование РИ и деталей с наноструктурами и нанопокровтиями требует решения трех задач:

- первая – создание теоретических моделей, позволяющих оценить влияние состава основного материала РИ на получение наноструктур (важен размер зерна), а значит, найти состав основного материала РИ, при котором будет получено зерно в диапазоне 10...50 нм, определить технологические параметры обработки РИ. По размеру зерна оценить физико-механические характеристики поверхностного слоя;

- вторая – проведение экспериментов по выяснению влияния полученного (расчетного) размера зерна на ФМХ (микротвердость, шероховатость, стойкость РИ, снимаемый им объем материала за период стойкости, производительность обработки), выбор минимального адгезионного взаимодействия пары обрабатываемый материал – покрытие (основной материал РИ), а для деталей – их износостойкость, ФМХ материала, точность формы и размера детали, учет адгезионного взаимодействия контактирующих деталей;

- третья – оценивание адекватности модели по расчету размера зерна и регрессионных моделей для расчета стойкости РИ, снимаемого объема материала за период стойкости, производительности обработки и оценки ФМХ режущего инструмента и деталей (микротвердость, износостойкость, окисляемость и др.).

Для проведения исследований создана система измерения сил резания в реальном времени, оценку времени достижения предельной стойкости определяли по величине предельной силы резания, тарированной по критериям работоспособности РИ (критический износ, критическое изменение формы или шероховатости поверхности детали, выход размеров детали за пределы допусков и др.).

В конечном счете получаем режимы эффективности обработки (максимум, снимаемого объема материала за период стойкости), соответствие детали по точности размеров и формы, а также детали с высоким ресурсом и достаточной надежностью.

Все это показывает, что исследование возможности создания научных принципов конструирования РИ с наноструктурами и нанопокровтиями является актуальной и важной задачей для машиностроения и других отраслей народного хозяйства, использующих РИ.

## 2. Постановка задачи исследования

Исследование проводилось на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости в зоне действия потоков ионов (или лазерного излучения) на твердосплавный и быстрорежущий инструмент [9]. Причём широко варьировались энергии ионов и их сорта, рассматривались одно-, двух- и трехзарядные ионы. Для лазерного излучения для обычных лазеров проводились исследования в диапазоне действующих плотностей теплового потока от  $10^7$  до  $10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup> и времени действия от  $10^{-7}$  до  $10^{-4}$  с. Для фемто-секундных лазеров рассматривался диапазон действующих плотностей

теплового потока от  $10^{11}$  до  $10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>, а время их действия составило от  $10^{-15}$  до  $10^{-11}$  с. Такие расчёты были проведены как для твёрдосплавных пластин, так и быстрорежущих сталей. Все это позволяет выбирать вид обработки, который обеспечивает достаточные для производства работоспособность и эффективность РИ, а в конечном счёте дает возможность создать принципы конструирования РИ с наноструктурами и нанопокрытиями.

### 3. Результаты расчета и их обсуждение

Были проведены расчёты для вариантов РИ: 1) ВК10(90% WC и 10% Co); 2) модифицированный ВК10 (79,7% WC и 9,5% Co, 1,3% CrN; AlN 6,5%, TiN 3%) и ВК20 (80% WC и 20% Co).

Рассчитали объёмы наноструктур ( $V$ ), минимальный ( $h_{\min}$ ) и максимальный ( $h_{\max}$ ) глубины залегания, а также размеры зерна ( $a$ ). Критерием образования наноструктуры в объёме считали достижение требуемого диапазона температур (500...1500 К) реализации скорости нарастания температуры более чем  $10^7$  К/с. Были определены зависимости этих величин от энергии ионов (200, 2000, 20000 eV) при действии одно-, двух- и трехзарядных ионов. Эти величины были рассчитаны для случая действия ионов: бора, углерода, азота, алюминия, ванадия, хрома, кислорода, железа, никеля, кобальта, иттрия, циркония, молибдена, гафния, тантала, вольфрама и платины. Были проведены сравнения этих величин для рассмотренных трёх режущих инструментов.

Так, например, для случая действия ионов бора (рис. 2–5) для классического ВК10 (90 % WC и 10 % Co) имеем значения объёма  $8 \cdot 10^{-27}$  м<sup>3</sup>,  $h_{\min} = 1,06 \cdot 10^{-9}$  м,  $h_{\max} = 3,29 \cdot 10^{-9}$  м, а размер зерна  $a = 2,48 \cdot 10^{-9}$  м, тогда как при переходе к модифицированному ВК10 имеем объём  $4,36 \cdot 10^{-27}$  м<sup>3</sup>,  $h_{\min} = 0$ ,  $h_{\max} = 3,29 \cdot 10^{-9}$  м и размер зерна  $2,03 \cdot 10^{-9}$  м. Для ВК20 имеем значения объёма  $4,11 \cdot 10^{-27}$  ...  $2,77 \cdot 10^{-23}$  м<sup>3</sup>,  $h_{\min} = 0$ ,  $h_{\max} = 6,83 \cdot 10^{-8}$  м, а размер зерна  $a = 3,75 \cdot 10^{-8}$  м. Переход к большим энергиям 20 кэВ приводит к существенному росту объёма. Он составляет  $1,43 \cdot 10^{-23}$  м<sup>3</sup>,  $h_{\min} = 3,11 \cdot 10^{-8}$  м,  $h_{\max} = 4,08 \cdot 10^{-8}$  м, а размер зерна –  $3,01 \cdot 10^{-8}$  м. В этом случае переход к модифицированному ВК10 приводит к снижению объёма зерна до  $6,68 \cdot 10^{-24}$  м<sup>3</sup>, глубины  $h_{\min} = 3,11 \cdot 10^{-8}$  м,  $h_{\max} = 4,08 \cdot 10^{-8}$  м, а размер зерна возрастает до  $3,01 \cdot 10^{-8}$  м. Для ВК20 имеем величину объёма зерна от  $3,13 \cdot 10^{-24}$  м<sup>3</sup> до  $2,7 \cdot 10^{-23}$  м<sup>3</sup>, глубины  $h_{\min} = 0$ ,  $h_{\max} = 2,48 \cdot 10^{-8}$  м, а размер зерна возрастает до  $3,75 \cdot 10^{-8}$  м.

В случае действия ионов азота (200 eV) для ВК10 имеем объём  $5,8 \cdot 10^{-27}$  м<sup>3</sup>,  $h_{\min} = 7,97 \cdot 10^{-10}$  м,  $h_{\max} = 3,02 \cdot 10^{-9}$  м и размер зерна составляет  $2,23 \cdot 10^{-9}$  м. Для модифицированного ВК10 получаем объём  $2,91 \cdot 10^{-27}$  м<sup>3</sup>,  $h_{\min} = 0$ ,  $h_{\max} = 2,88 \cdot 10^{-9}$  м и размер зерна составляет  $1,77 \cdot 10^{-9}$  м. В случае действия ионов азота для ВК20 имеем объём  $7,42 \cdot 10^{-26}$  м<sup>3</sup>,  $h_{\min} = 0$ ,  $h_{\max} = 8,46 \cdot 10^{-9}$  м, а размер зерна составляет  $5,21 \cdot 10^{-9}$  м.

Увеличение энергии до 20 кэВ приводит к существенному росту объёма НС, и он составляет  $4,46 \cdot 10^{-24}$  м<sup>3</sup>, глубины также несколько увеличиваются  $h_{\min} = 2,33 \cdot 10^{-9}$  м,  $h_{\max} = 2,69 \cdot 10^{-8}$  м, а размер зерна составляет  $2,04 \cdot 10^{-8}$  м. Для ВК20 объём  $2,63 \cdot 10^{-23}$  м<sup>3</sup>,  $h_{\min} = 1,24 \cdot 10^{-8}$  м,  $h_{\max} = 5,73 \cdot 10^{-8}$  м, а размер зерна составляет  $3,69 \cdot 10^{-8}$  м.

Для случая действия ионов иттрия при энергии 200 eV имеем объём  $3,98 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>,  $h_{\min} = 5,18 \cdot 10^{-10}$  м,  $h_{\max} = 2,72 \cdot 10^{-9}$  м, размер зерна составляет  $1,97 \cdot 10^{-9}$  м. Для модифицированного ВК10 получаем объём  $4,06 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>,  $h_{\min} = 0$ ,  $h_{\max} = 1,49 \cdot 10^{-9}$  м, размер зерна составляет  $9,19 \cdot 10^{-10}$  м. Для ВК20 объём

$3,07 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3$ ,  $h_{\min} = 0$ ,  $h_{\max} = 4,32 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ , а размер зерна составляет  $2,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ .

Повышение энергии до 20 кВ приводит к росту размера зерна ВК10 до  $1,92 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ ,  $h_{\min} = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ,  $h_{\max} = 1,99 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ , а размер зерна составляет  $1,54 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ . Для ВК20 до  $6,8 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ ,  $h_{\min} = 1,54 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ,  $h_{\max} = 2,99 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ , а размер зерна составляет  $2,35 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ .

Для случая действия ионов гафния на ВК10 (200 eV) имеем объем  $1,18 \cdot 10^{-25} \text{ м}^3$ ,  $h_{\min} = 3,94 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ ,  $h_{\max} = 7,76 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ , размер зерна составляет  $60,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ . Переход к большим энергиям приводит к росту объема до  $2,6 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ ,  $h_{\min} = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ,  $h_{\max} = 2,21 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ , размер зерна составляет  $1,71 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ . Для модифицированного ВК10 имеем объем  $2,54 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3$ ,  $h_{\min} = 0$ ,  $h_{\max} = 2,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ , размер зерна составляет  $7,86 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ . Для ВК20 объем зерна составляет до  $6,41 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3$ ,  $h_{\min} = 0$ ,  $h_{\max} = 3,74 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ , а размер зерна равен  $2,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ .

Переход к большим энергиям приводит к увеличению объема зерна до  $2,64 \cdot 10^{-25} \text{ м}^3$ ,  $h_{\min} = 0$ ,  $h_{\max} = 1,29 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ , а размер зерна составляет  $7,96 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ . Для ВК20 объем зерна растет до  $4,6 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ ,  $h_{\min} = 6,01 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ ,  $h_{\max} = 2,67 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ , а размер зерна составляет  $2,06 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ .

Исследование проводили для однозарядных ионов, рост зарядности приводит к увеличению всех величин особенно существенно при 20 кВe и  $z = 3$ .

Рассматривалось действие ионов бора ( $B^+$ ), азота ( $N^+$ ), иттрия ( $Y^+$ ) и гафния ( $Hf^+$ ) на модифицированный ВК10 (79,7 % Wc). ВК20 (80 % Wc) и ВК10 (90 % Wc), так как на рис. 2–5 показаны зависимости объема зерна (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НС и радиуса зерна от энергии ионов  $B^+$  (рис. 2), ионов  $N^+$  (рис. 3), ионов  $Y^+$  (рис. 4) и ионов  $Hf^+$  (рис. 5) для случая действия их на модифицированный ВК10.

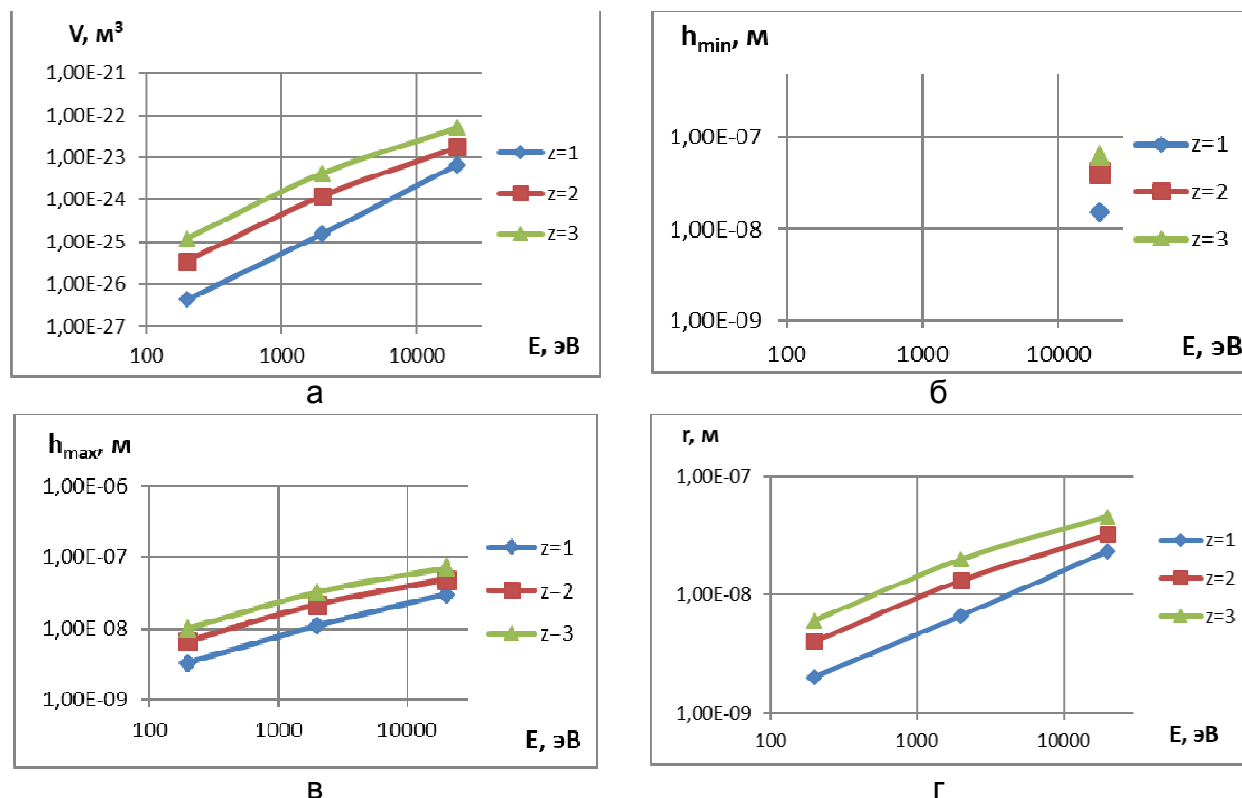


Рис. 2. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания и радиуса НК (г) от энергии ионов бора ( $B^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для ВК10 модифицированного

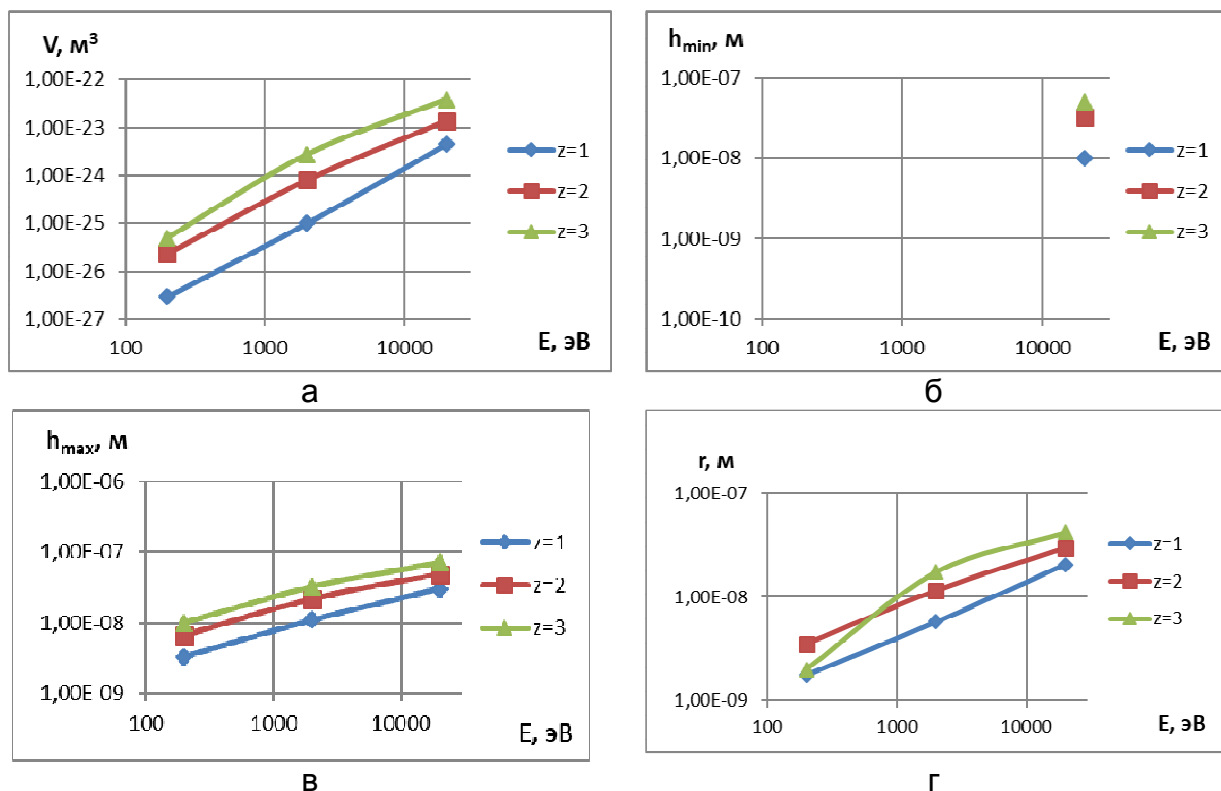


Рис. 3. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания и радиуса НК (г) от энергии ионов азота ( $\text{N}^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для ВК10 модифицированного

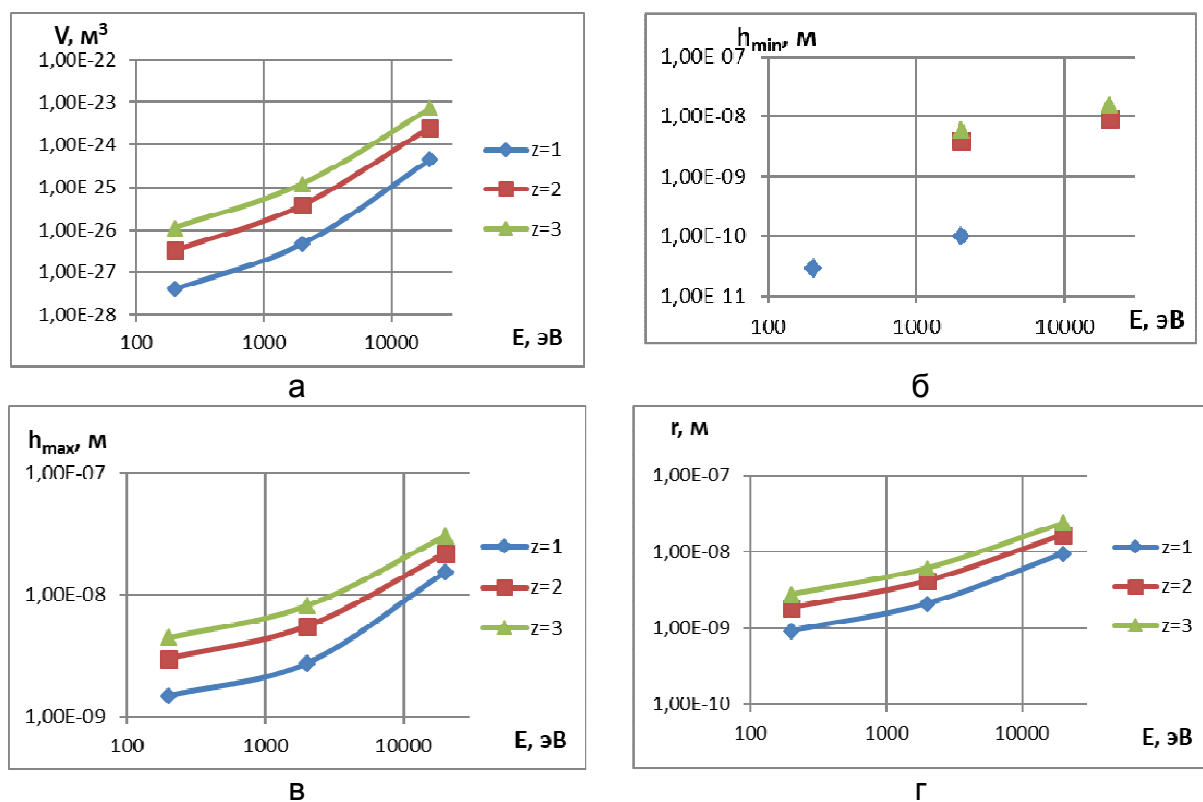


Рис. 4. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания и радиуса НК (г) от энергии ионов иттрия ( $\text{Y}^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для ВК10 модифицированного

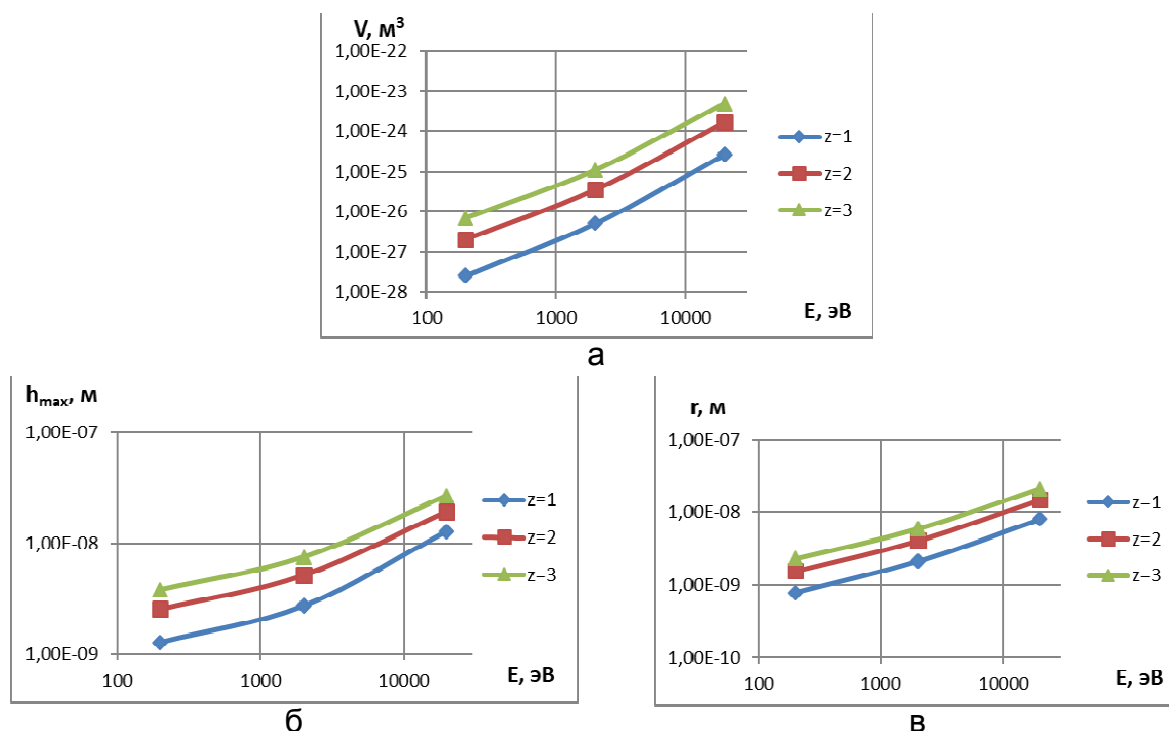


Рис. 5. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания и радиуса НК ( $r$ ) от энергии ионов гафния ( $\text{Hf}^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для ВК10 модифицированного

На рис. 6–9 даны зависимости объема зерна (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубин залегания НС и радиуса НС ( $r$ ) от энергии ионов бора  $\text{B}^+$  (рис. 6), азота  $\text{N}^+$  (рис. 7), иттрия (рис. 8) и гафния  $\text{Hf}^+$  (рис. 9)

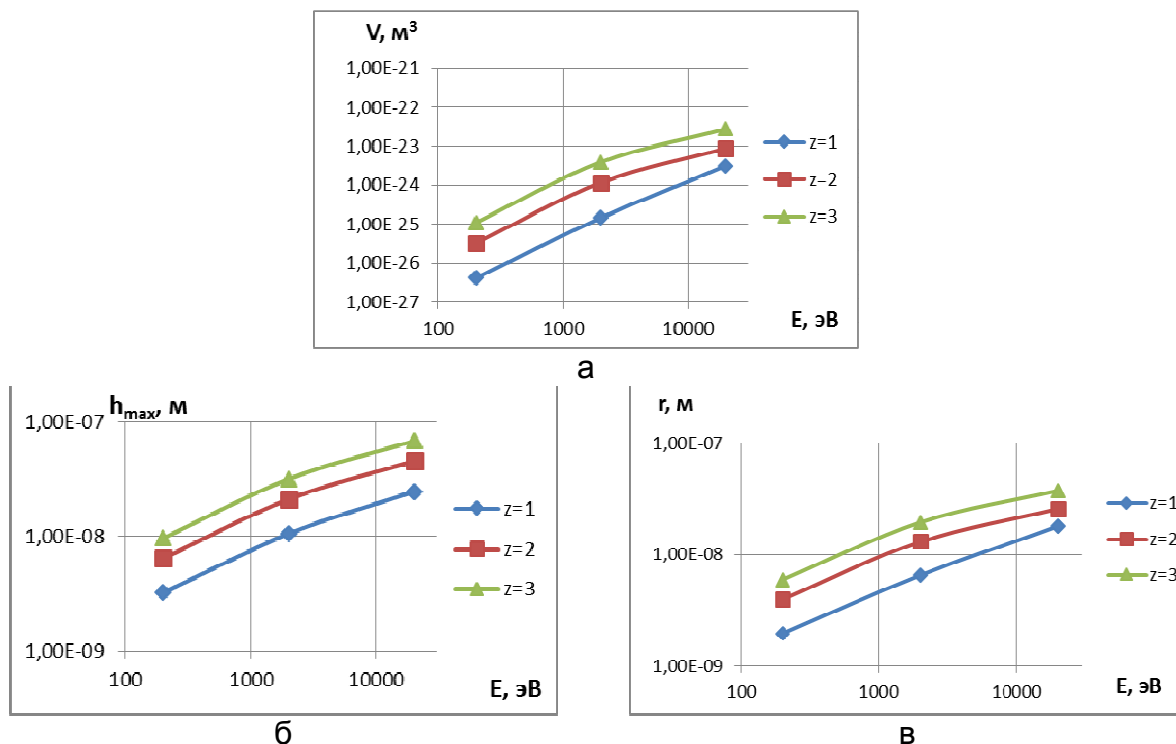


Рис. 6. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания и радиуса НК ( $r$ ) от энергии ионов бора ( $\text{B}^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для ВК20



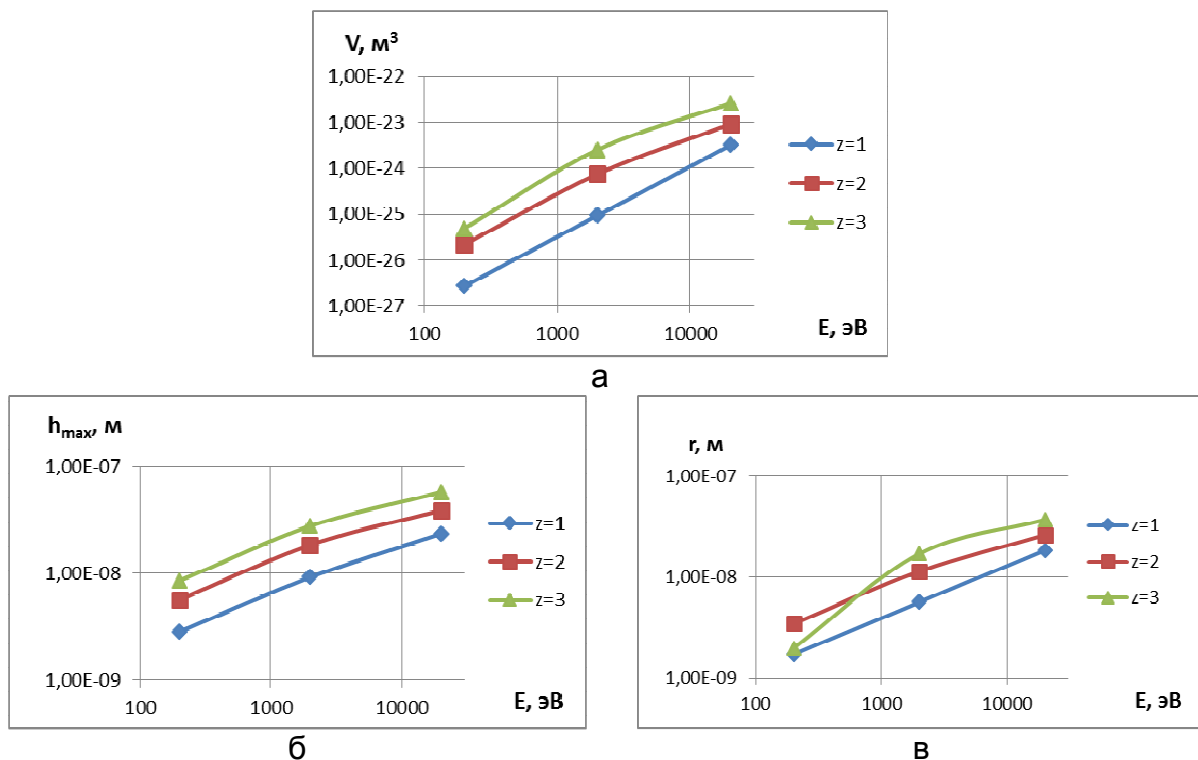


Рис. 7. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания и радиуса НК (r) при действии ионов азота ( $N^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для ВК20

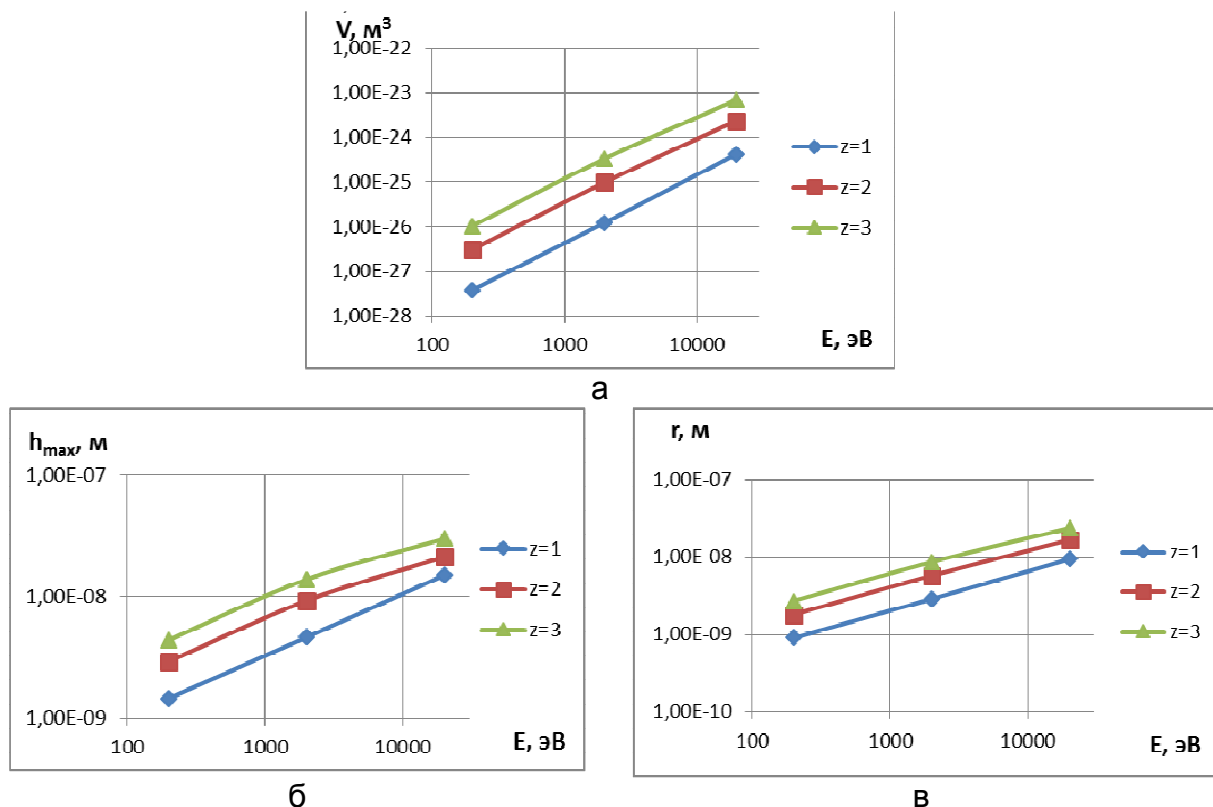


Рис. 8. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания и радиуса НК (r) при действии ионов иттрия ( $Y^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для ВК20

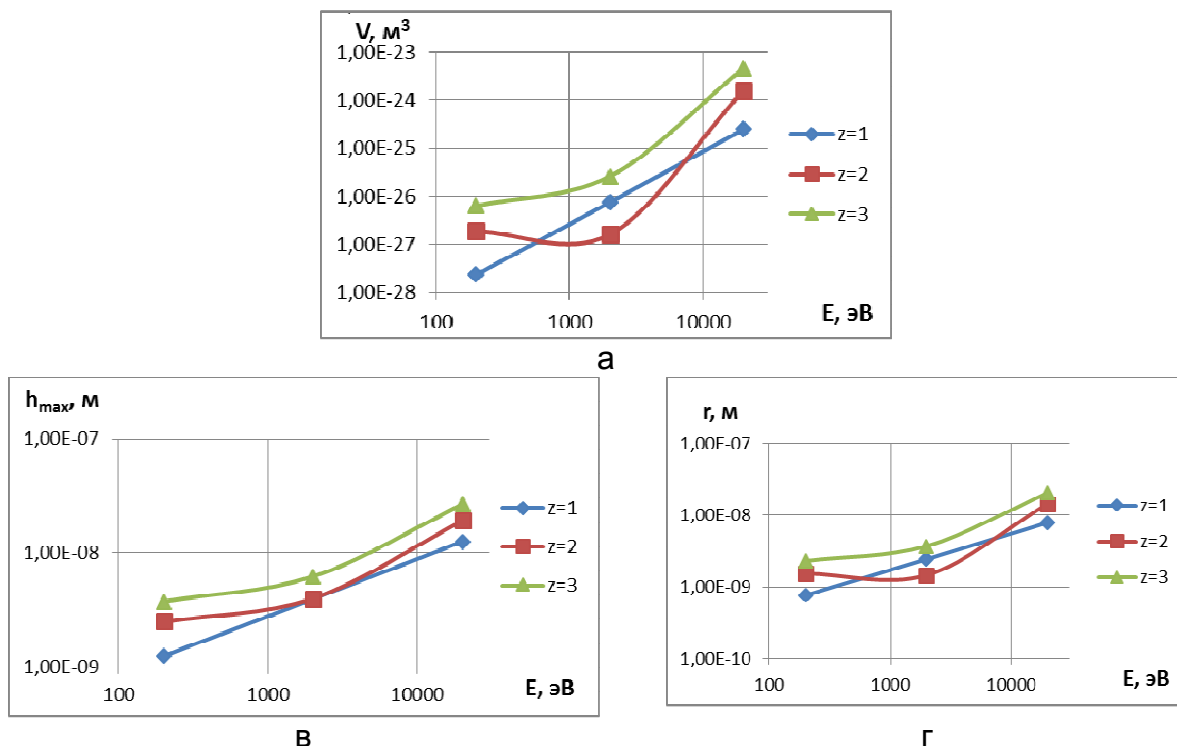


Рис. 9. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания и радиуса НК (г) от энергии ионов гафния ( $Hf^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для BK20

Аналогичные зависимости для случая действия тех же ионов на твердый сплав BK10 показаны на рис. 10.

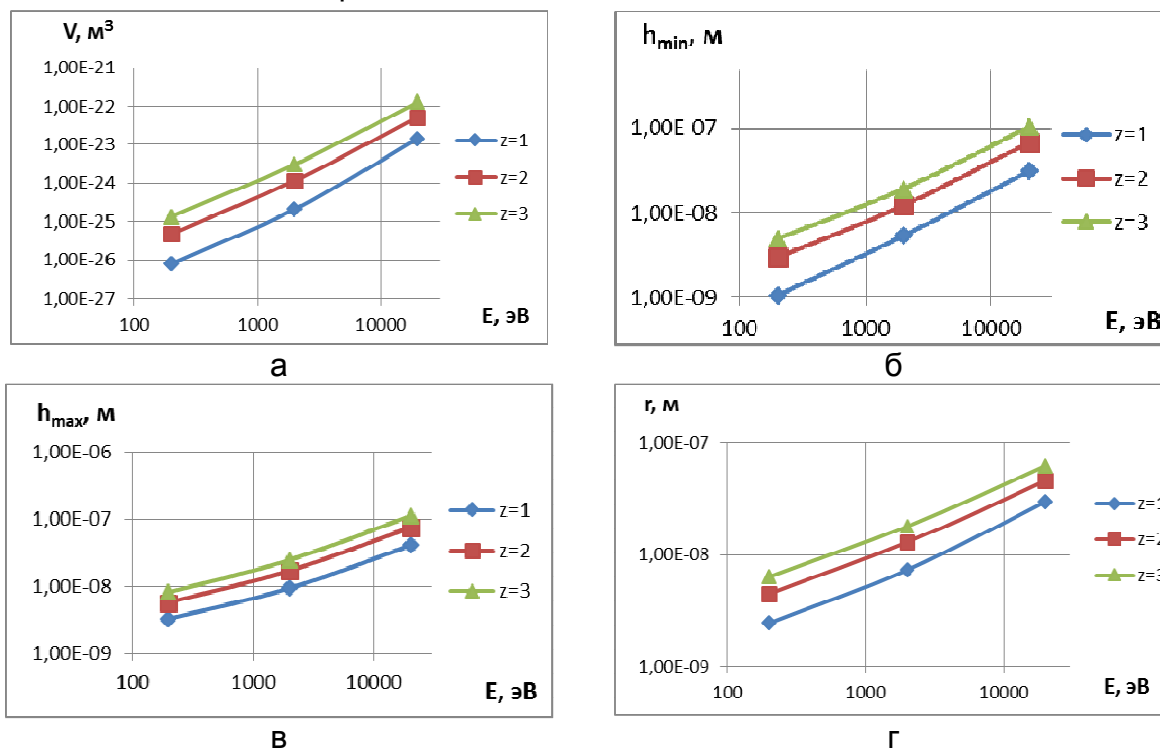


Рис. 10. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной глубины залегания (в) и радиуса НК (г) от энергии ионов бора ( $B^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для BK10

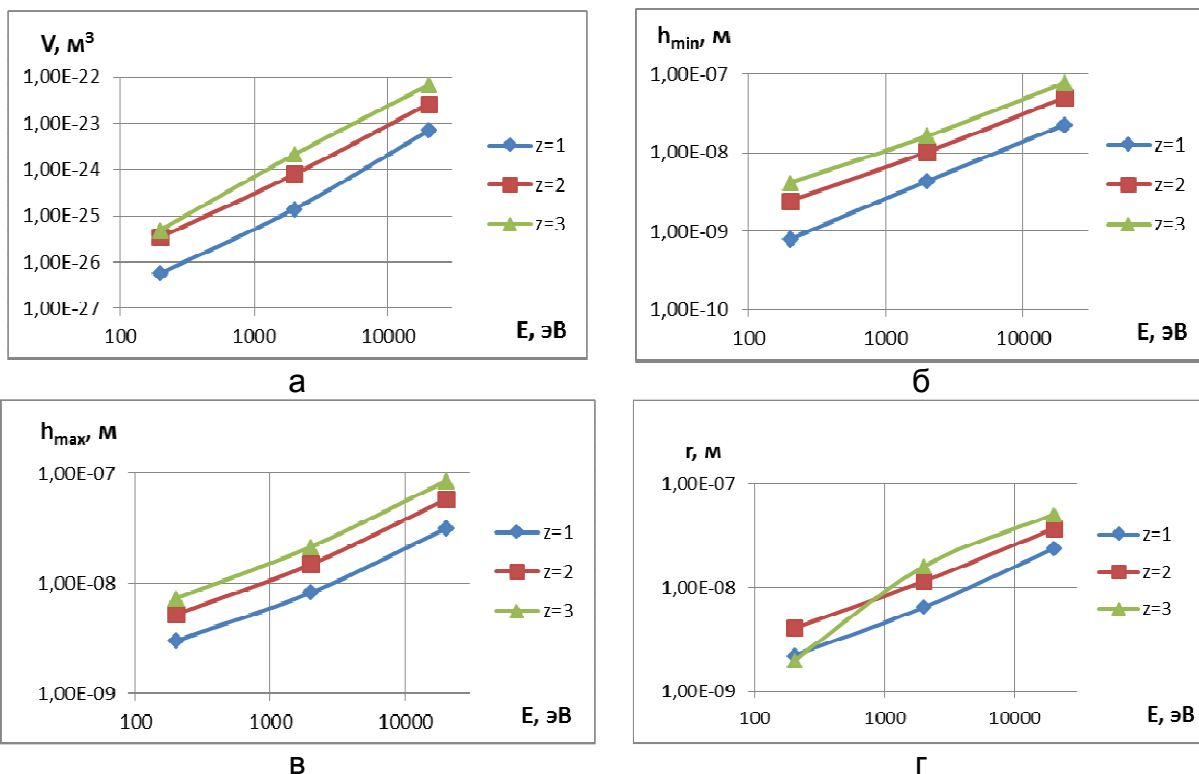


Рис. 11. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной глубины залегания (в) и радиуса НК (г) от энергии ионов азота ( $\text{N}^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для ВК10

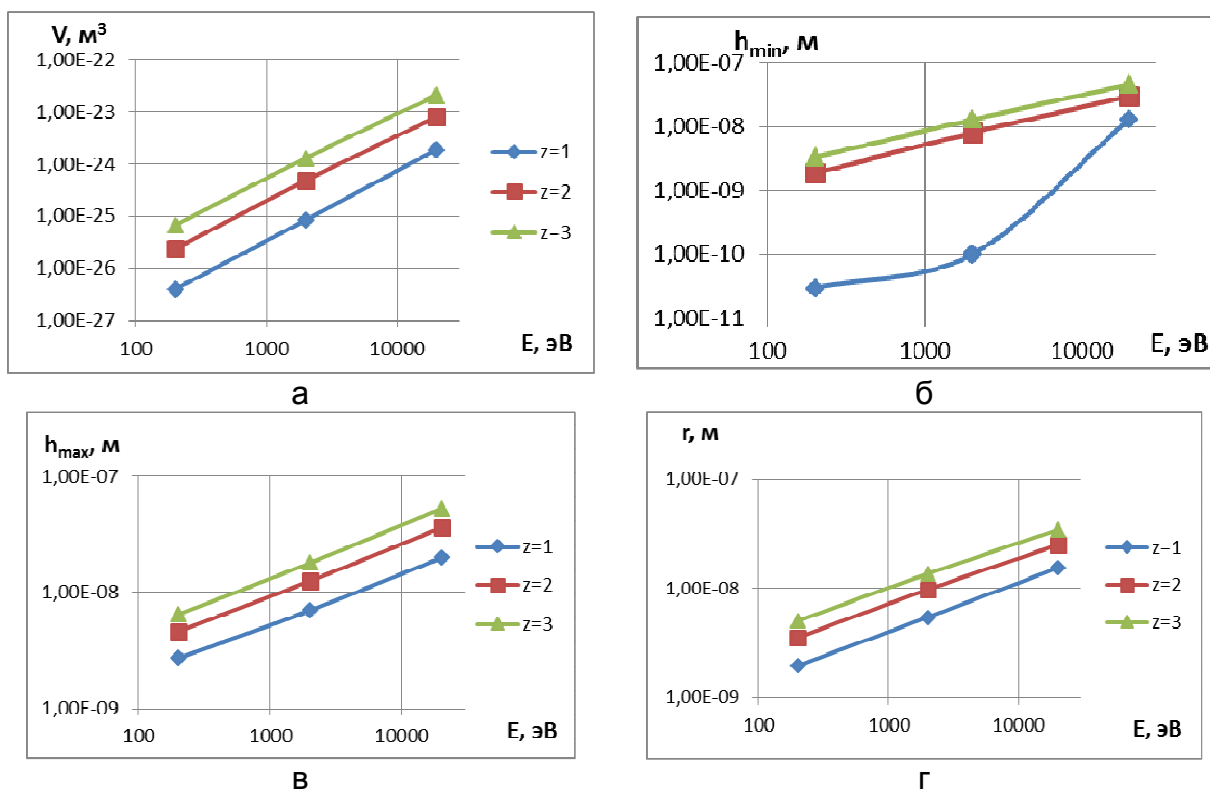


Рис. 12. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной глубины залегания (в) и радиуса НК (г) от энергии ионов иттрия ( $\text{Y}^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для ВК10

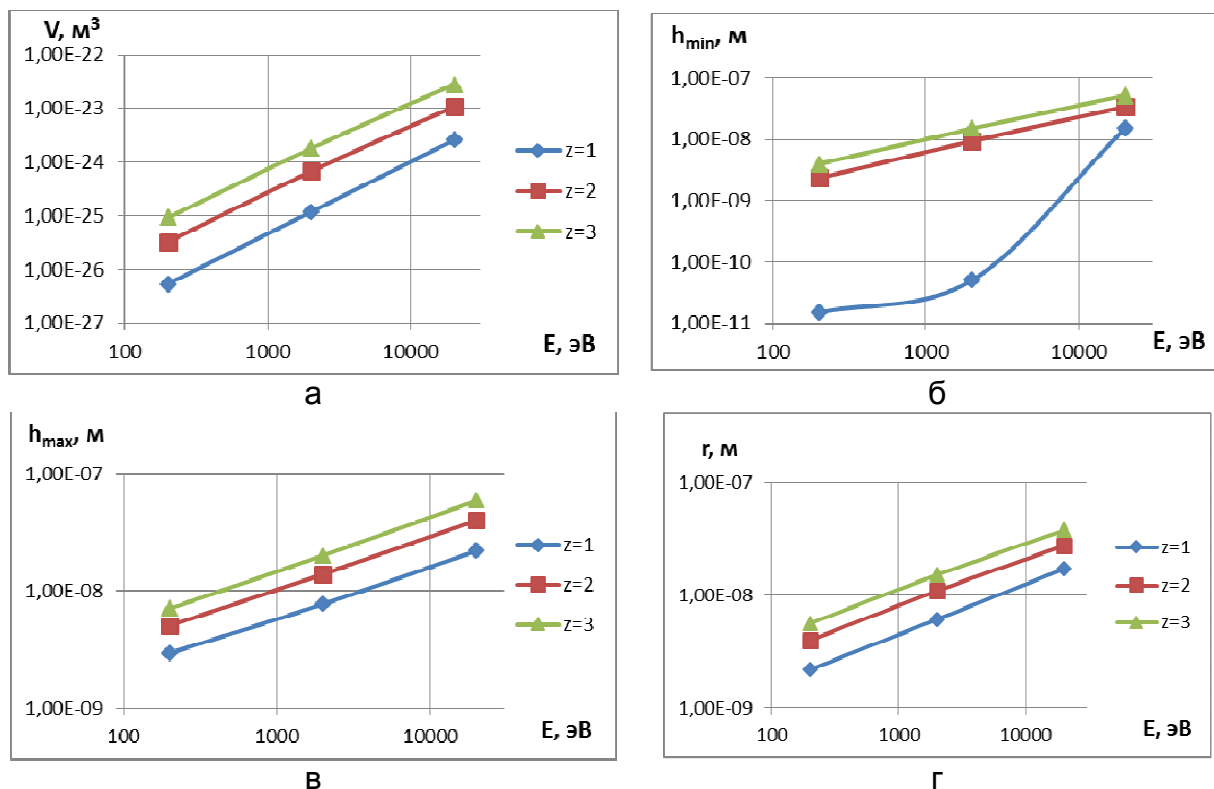


Рис. 13. Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной глубины залегания (в) и радиуса НК (г) от энергии ионов гафния ( $\text{Hf}^+$ ) с различным зарядом ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) для ВК10

Для оценки степени влияния состава твердого сплава (процент WC в материале) на эффективность получения наноструктур этими ионами были построены зависимости объема зерна от доли карбида вольфрама в материале РИ для случая действия ионов бора ( $\text{B}^+$ ), азота ( $\text{N}^+$ ), иттрия ( $\text{Y}^+$ ) и гафния ( $\text{Hf}^+$ ) (рис. 14–15). Анализ результатов показывает, что для ионов малых масс бора и азота процентный состав карбида вольфрама влияет незначительно (рис. 14), тогда как с ростом массы иона это отличие становится существенным (особенно для ионов гафния оно меняется более чем на порядок). Все это свидетельствует о том, что масса иона влияет значительно на объем, а значит и на размер зерна.

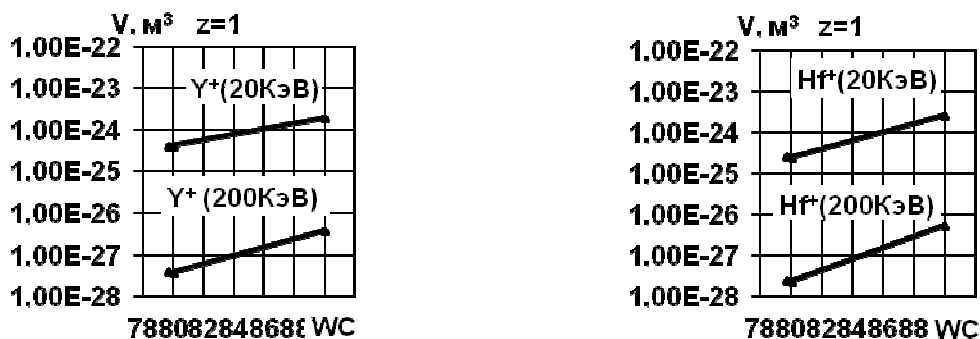


Рис. 14. Зависимости объема НК от процентного состава карбида вольфрама для ВК10 модифицированного (WC – 79.7 %), ВК20 (WC – 80.00 %) и ВК10 (WC – 90.00 %)

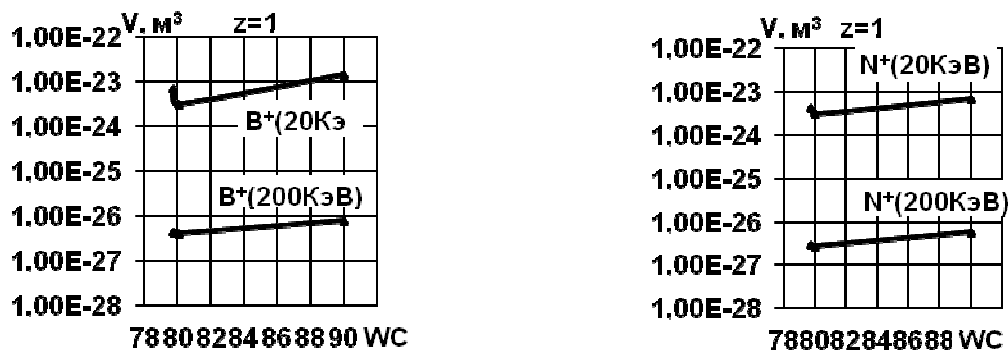


Рис. 15. Зависимости объема НС от процентного состава карбида вольфрама для ВК10 модифицированного (WC – 79.7 %), ВК20 (WC – 80.00 %) и ВК10 (WC – 90.00 %) при действии ионов иттрия (а) и гафния (б)

Видно, что для всех ионов минимальное значение размера зерна реализовано для ВК20 несколько больших размеров для модифицированного ВК10 и существенно выше для ВК10 (классического). Полученные результаты говорят о возможности использовать модифицированный ВК10, который имеет более высокие физико-механические характеристики, чем ВК20 и ВК10, хотя размер зерна у него практически такой же, как и у ВК20.

### Выводы

Рассмотрение действия ионов бора, азота, иттрия и гафния на модифицированный ВК10 (WC – 79.7 %), ВК20 (WC – 80.00 %) и ВК10 (WC – 90.00 %) показало:

- величина энергии ионов и зарядности иона существенно влияет на размер зерна (с ростом энергии и величины заряда размер зерна растет);
- рост процентного состава карбида вольфрама приводит к росту зерна, причем с увеличением массы иона уменьшение размера зерна более существенно, что может быть использовано для получения требуемого размера зерна;
- проектирование материала режущего инструмента с учетом возможности образования наноструктур показывает, что далеко не всегда увеличение доли карбида вольфрама увеличивает работоспособность и эффективность инструмента, а часто размер зерна оказывает определяющее влияние.

### Список литературы

1. Костюк, Г. И. О влиянии доли карбида титана на образование наноструктур в твердых сплавах ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , TiC) при разном их соотношении / Г. И. Костюк, О. О. Бруяка, А. В. Евсеенкова // Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4 – 13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. – P. 60 – 63.
2. Костюк, Г. И. Эффективность образования наноструктур на поверхности твердого сплава ВЗ и способ задания теплофизических и термомеханических характеристик / Г. И. Костюк, О. Д. Семененко, Ю. В. Широкий, Е. А. Воляк // Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4 – 13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. – P. 63 – 67.

3. Костюк, Г. И. Эффективность и работоспособность режущего инструмента из твёрдого сплава Сандвик Коромант с покрытием  $0,18\text{HfN}+0,82\text{ZrN}$  при фрезеровании титанового сплава BT22 / Г. И. Костюк, А. Г. Тимофеев. // Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4 – 13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. – P. 52 – 55.

4. Костюк, Г. И. Влияние доли карбида вольфрама в твердых сплавах на объем зерна и возможность образования наноструктур / Г. И. Костюк // Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4 – 13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. – P. 57 – 60.

5. Костюк, Г. И. Эффективность и работоспособность режущего инструмента из модифицированного твёрдого сплава BK10 с покрытием  $0,18\text{HfN}+0,82\text{ZrN}$  при фрезеровании титанового сплава BT22 / Г. И. Костюк, М. С. Романов, Г. Д. Торосян, В. В. Попов // Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4 – 13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. – P. 55 – 57.

6. Костюк, Г. И. Эффективность применения фрез из модифицированного BK10 и Сандвик Коромант с покрытием  $0,2\text{HfN}+0,8\text{ZrN}$  при обработке титанового сплава BT22 / Г. И. Костюк, А. М. Ляшенко // Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4 – 13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. – P. 67 – 69.

7. Костюк, Г. И. Эффективное фрезерование титанового сплава BT22 режущим инструментом из модифицированного твёрдого сплава BK10 с покрытием  $0,18\text{HfN}+0,82\text{ZrN}$  / Г. И. Костюк, А. В. Евсеенкова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. 2018. – № 34 (1310). – С. 57 – 61.

8. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.

9. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наносруктурными модифицированными слоями: монография-справочник: в 2 кн. / Г. И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с., Кн.2. Лазерные технологии. – 507 с.

10. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.

11. Костюк Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002.– Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с. Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с.

12. Костюк, Г. И. Наноструктуры и нанопокрытия: перспективы и реальность: учеб.пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.

13. Костюк, Г. И. Научные основы создания современных технологий: учеб.пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Кн.1

2008. – 552 с. й Кн.2. Плазменно-ионные, ионно-лучевые и лазерные технологии-2018.–383 с.

14. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.

15. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.

16. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.

17. Андриевский, Р.А. Наноструктурные материалы: учеб.пособие / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 117 с.

## References

1. Kostyuk, G. I. *V zavisimosti ot doli karbida titana v obrazovanii (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiC) pri raznom ikh nalichii* / G. I. Kostyuk, O. O. Bruyaka, A. V. Yevseyenkova // *Materialy XIÍI Mezhdunarodnoy konferentsii po nauke i obrazovaniyu*, 4 – 13 January. – Khaydusoboslo (Vengriya), 2019. – P. 60 – 63.

2. Kostyuk, G. I. *Effektivnost' obrazovaniya nanostruktur na poverkhnosti tverdykh poverkhnostey.* / G. I. Kostyuk, O. D. Semenenko, YU. V. Shirokiy, Ye. A. Volyak // *Materialy XIÍI Mezhdunarodnoy konferentsii po nauke i obrazovaniyu*, 4 – 13 January. – Khaydusoboslo (Vengriya), 2019. – P. 63 – 67.

3. Kostyuk, G. I. *Sandvik Koromant s pokrytiyem 0,18HfN + 0,82ZrN pri frezerovanii titanovogo shtamma VT22* / G. I. Kostyuk, A. G. Timofeyev // *Materialy XIÍI Mezhdunarodnoy konferentsii po nauke i obrazovaniyu*, 4 – 13 January. – Khaydusoboslo (Vengriya), 2019. – R. 52 – 55.

4. Kostyuk, G. I. *Nanostruktur* / G. I. Kostyuk // *Materialy XIÍI Mezhdunarodnoy konferentsii po nauke i obrazovaniyu*, 4 – 13 January. – Khaydusoboslo (Vengriya), 2019. – R. 57 – 60.

5. Kostyuk, G. I. *Effektivnost' i rabotosposobnost' rezhushchego instrumentariya iz modifitsirovannogo tvordogo plasta VK10 s pokrytiyem 0,18HfN + 0,82ZrN pri frezerovanii titanovogo sloya VT22* // G. I. Kostyuk, M. S. Romanov, G. D. Torosyan, V. V. Popov // *Materialy XIÍI Mezhdunarodnoy konferentsii po nauke i obrazovaniyu*, 4 – 13 January. – Khaydusoboslo (Vengriya), 2019. – P. 55 – 57.

6. Kostyuk, G. I. *Effektivnost' primeneniya frez iz modifitsirovannogo VK10 i Sandvik Koromant s pokrytiyem 0,2HfN + 0,8ZrN pri obrabotke titanovogo produkta VT22* / G. I. Kostyuk, A. M. Lyashenko // *Materialy XIÍI Mezhdunarodnoy konferentsii po nauke i obrazovaniyu*, 4 – 13 January. – Khaydusoboslo (Vengriya), 2019. – P. 67 – 69.

7. Kostyuk, G. I. *Effektivnoye frezerovaniye titanovogo pokrytiya VT22 reekspressiya iz modifitsirovannogo tvordogo plasta VK10 s pokrytiyem 0,18HFNT0,82ZRN* / G. I. Kostyuk, A. V. Yevseyenkova // *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo uníversitetu «KHPÍ»*. Seriya: Tekhnologii v mashinobuduvanní. 2018. – № 34 (1310). – 2018. – P. 57 – 61.

8. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy*: monogr. / G. I. Kostyuk. – K. : Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. – 648 p.

9. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s nanopokrytiyami i nanositurnymi modifitsirovannymi sloyami*: monografiya-spravochnik: v 2 kn. / G. I. Kostyuk – KH.: «Planeta-Print», 2016. – Kn.1. Plazmenno-ionnyye i ionno-luchevyye tekhnologii. – 735 p., Kn.2. Lazernyye tekhnologii. – 507 p.

10. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur*: monogr. / G. I. Kostyuk. – K.: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. – 472 p.

11. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* / G.I. Kostyuk. – K.: Izd-vo AINU, 2002.– Kn.1: Fiziko-cheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennyykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy. – 596 s. Kn. 2: Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya. – 482 p.

12. Kostyuk, G. I. *Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i re-al'nost': ucheb.posobiye* / G. I. Kostyuk. – KH.: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2009. – 406 з.

13. Kostyuk, G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy: ucheb.posobiye* / G. I. Kostyuk. – KH.: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », kn.1 2008. – 552 s. I Kn.2. Plazmenno-ionnyye, ionno-luchevyye i lazernyye tekhnologii-2018. – 383 p.

14. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnym sloyem: monogr.-sprav.* / G. I. Kostyuk. – KH.: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. – 633 p.

15. Grechikhin, L. I. *Fizika nanochastits i nanotekhnologiy* / L. I. Grechikhin. – M.: UP «Tekhnoprint», 2004. – 397 p.

16. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* / A. I. Gusev. – M.: Fizmatlit, 2005. – 416 p.

17. Andriyevskiy, R.A. *Nanostrukturnyye materialy: ucheb.posobiye* / R.A. Andriyevskiy, A. V. Ragulya. – M.: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005. – 117 p.

Поступила в редакцию 05.03.2019, рассмотрена на редколлегии 07.03.2019.

## Наукові принципи конструювання різального інструменту з нанопокриттями та наноструктурами

Розглянуто дію іонів бору, азоту, ітрію і гафнію на модифікований BK10 (WC - 79.7% Co - 9,5% + CrN - 1,3% + AlN - 6.5% + TiN - 3%), BK20 (WC - 80.00%) і BK10 (WC - 90.00%). Показано можливість отримання наноструктур. Визначено, що величина енергії іонів і зарядність іона істотно впливають на розмір зерна. Із ростом енергії і величини заряду розмір зерна зростає; зростання процентного складу карбиду вольфраму призводить до зростання зерна, причому зі збільшенням маси іона до зменшення розміру зерна більш істотно, що може бути використано для отримання необхідного розміру зерна. Проектування хімічного складу матеріалу різального інструменту з урахуванням можливості утворення наноструктур показує, що далеко не завжди збільшення частки карбиду вольфраму збільшує працездатність і ефективність інструменту, а часто розмір зерна здійснює визначальний вплив. Показана можливість конструювання хімічного складу основного матеріалу ріжучого інструменту з урахуванням його зміцнення за рахунок утворення наноструктур та нанопокриття.

**Ключові слова:** наноструктури, проектування хімічного складу різального інструменту, обсяг зерна, твердий сплав.



## Scientific principles of designing information of a cutting tool with nano coatings and nanostructures

The article describes the effect of boron, nitrogen, yttrium and hafnium ions on the modified BK10 (WC - 79.7% Co - 9.5% + CrN - 1.3% + AlN - 6.5% + TiN - 3%), BK20 (WC - 80.00%) and VK10 (WC - 90.00%) where the possibility of obtaining nanostructures is shown. It has been determined that: the value of the ion energy and the ion charge significantly affect the grain size with increasing energy and charge size; the grain size increases; an increase in the percentage composition of tungsten carbide leads to grain growth, and with an increase in the mass of the ion to an decrease in the grain size more significantly, which can be used to obtain the required grain size. The design of the chemical composition of the cutting tool material, taking into account the possibility of nanostructure formation, shows that not always an increase in the share of tungsten carbide increases the efficiency and efficiency of the tool, and often the grain size has a decisive influence. The possibility of constructing the chemical composition of the basic material of the cutting tool with regard to its hardening due to the formation of nanostructures and nanocoating is shown

**Key words:** nanostructures, design of chemical composition of the cutting tool, grain volume, hard alloy.

### Сведения об авторах:

**Костюк Геннадий Игоревич** – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмических университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0002-7584-2240; e-mail: [gennadiykostyuk206@gmail.com](mailto:gennadiykostyuk206@gmail.com)

**Попов Виктор Васильевич** – кандидат технических наук, ПАО «ФЭД», г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0001-9189-6882; e-mail: [vvpopov123@gmail.com](mailto:vvpopov123@gmail.com)

### About the authors:

**Kostyuk Gennadiy Igorevych** – doctor of technical sciences, professor, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7584-2240; e-mail: [gennadiykostyuk206@gmail.com](mailto:gennadiykostyuk206@gmail.com).

**Popov Viktor Vasilyevich** – candidate of technical sciences, PAO «FED», Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9189-6882; e-mail: [vvpopov123@gmail.com](mailto:vvpopov123@gmail.com)