

Г. И. КОСТЮК, В. В. ПОПОВ, А. В. ЕВСЕЕНКОВА

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ВОЗМОЖНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР В ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ VK10, BK10 МОДИФИЦИРОВАННОГО И BK20

В статье рассмотрены величины температурных напряжений и скорости деформирования для твердых сплавов VK10, BK10 модифицированного и BK20 при действии на них ионов различных сортов (бора, азота, иттрия, гафния), показано, что наибольшие величины температурных напряжений реализуются для VK10, величины же температурных напряжений для модифицированного BK10 существенно меньше на 2–3 порядка, а для BK20 реализуются температурные напряжения незначительно – меньше, чем для VK10 модифицированного, причём в последних двух случаях их величины всегда будут меньше необходимых для образования наноструктур (при действии ионов бора). С ростом массы иона (азот, итрий, гафний) температурные напряжения растут, но не значительно. Показано, что реализуются условия, необходимые для образования наноструктур в основном при энергиях выше 800–1000 кеВ меньшие значения соответствуют большему зарядовому числу ($z = 3$). Скорость же деформирования изменяется от 10^{22} – 10^{25} Па/с, т. е. скорость деформирования практически во всех случаях превышает необходимую для образования наноструктур. Это значит, что при действии ионов определяющим является величина напряжений при образовании наноструктур.

Ключевые слова: температурные напряжения, скорость деформирования, наноструктуры, ионы, заряд, твердый сплав.

Г. І. КОСТЮК, В. В. ПОПОВ, А. В. ЄВСЄЄНКОВА

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНИХ НАПРУЖЕНЬ І ШВИДКОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ НА МОЖЛИВІСТЬ УТВОРЕННЯ НАНОСТРУКТУР В ТВЕРДИХ СПЛАВАХ VK10, BK10 МОДИФІКОВАНОГО І BK20

У статті розглянуто величини температурних напружень і швидкості деформування для твердих сплавів VK10, BK10 модифікованого і BK20 при дії на них іонів різних сортів (бору, азоту, ітрію, гафнію) показано, що найбільші величини температурних напружень реалізуються для VK10, величини ж температурних напружень для модифікованого BK10 істотно менше на 2–3 порядки, а для BK20 реалізуються температурні напруження незначно – менше ніж для VK10 модифікованого, причому в останніх двох випадках їх величини завжди будуть менше необхідних для утворення наноструктур (при дії іонів бору). З ростом маси іона (азот, ітрій, гафній) температурні напруження зростають, але незначно. Показано, що реалізуються умови, необхідні для утворення наноструктур в основному при енергіях вище 800–1000 кеВ менші значення відповідають більшим зарядовим числам ($z = 3$). Швидкість же деформування змінюється від 10^{22} – 10^{25} Па/с, тобто швидкість деформування в переважній більшості випадків перевищує необхідну для утворення наноструктур. Це означає, що при дії іонів визначальним є величина напружень при утворенні наноструктур.

Ключові слова: температурні напруження, швидкість деформування, наноструктури, іони, заряд, твердий сплав.

G. KOSTYUK, V. POPOV, A. YEVSEYENKOVA

THE EFFECT OF TEMPERATURE STRESS AND STRAIN RATE ON THE POSSIBILITY OF NANOSTRUCTURE FORMATION IN VK10, BK10 MODIFIED AND BK20 HARD ALLOYS

The article considers the values of thermal stresses and deformation rates for hard alloys VK10, VK10 modified and BK20 under the action of ions of various grades (boron, nitrogen, yttrium, hafnium) on them, which shows that the largest values of thermal stresses are realized for VK10, while the values of thermal stresses for modified BK10 is significantly less by 2–3 orders of magnitude; for BK20, thermal stresses are slightly lower than those for BK10 modified, and in the latter two cases their values will always be less necessary for the formation of nanostructures (under the action of boron ions). With an increase in the ion mass (nitrogen, yttrium, hafnium), temperature stresses increase, but not significantly. It is shown that the condition necessary for the formation of nanostructures is realized mainly at energies above 800–1000 keV. Smaller values correspond to large charge numbers ($z = 3$). The speed of deformation varies from 10^{22} – 10^{25} Pa / s, i.e. the deformation rate in almost all cases exceeds that necessary for the formation of nanostructures. This means that under the action of ions, the magnitude of the stresses during the formation of nanostructures is decisive.

Keywords: thermal stresses, strain rate, nanostructures, ions, charge, solid alloy.

Введение. Как известно [1–3], наноструктуры образуются при реализации двухосного деформированного состояния, когда напряжения в направлении обеих осей превышает 10^{10} Па. Как показано в монографиях [4–7] наличие температурных напряжений величиной 10^7 – 10^9 Па может ускорять образование наноструктур при реализации других критериев их образования: наличие температур 500–1500 К и превышение скорости нарастания температур 10^7 К/с, что говорит о важности определения величин температурных напряжений и скорости их роста. Такому исследованию посвящена настоящая статья, а значит, она является актуальной и своевременной.

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», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса. В наших работах проводились исследования возможности образования наноструктур в значительном количестве различных твердых сплавов, но для ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20 такие исследования небыли проведены и что интересно – модифицирование твердого сплава ВК10 нитридами алюминия, титана и хрома может приводить к существенным изменениям физико-механических характеристик [1–7], а следовательно, и влиять на напряжённое состояние, исследование которого проводилось для всех трёх твердых сплавов. Исследования дадут ответ на возможность образования наноструктур непосредственно за счёт действия температурных напряжений и дадут возможность оценить достаточно ли скорость деформирования для образования наноструктур. В ряде наших работ рассмотрено образование наноструктур в этих сплавах за счёт достижения необходимых температур и скоростей их возрастания [8–14], т. е. наши исследования дадут развитие последним нашим работам и позволят оценить вероятность образования наноструктур за счёт действия температурных напряжений, а также возможность ускорения образования наноструктур за счёт рассмотренных в этих работах эффектов. Всё это говорит о важности проводимых исследований, а значит, и даёт новые представления о возможности образования наноструктур при действии ионов различных энергий и зарядов.

Постановка цели и задач 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. Такие расчёты были проведены для твердосплавных пластин. Все это позволяет выбирать вид обработки, который обеспечивает достаточные для производства работоспособность и эффективность РИ, а в конечном счёте позволяет создать принципы конструирования РИ с наноструктурами и нанопокрытиями.

Целью работы было выяснение возможности образования наноструктур за счёт действия температурных напряжений и возможности ускорения образования наноструктур в результате других реализаций других критериев образования НС.

Результаты и их обсуждение. Были рассчитаны температурные напряжения и скорости деформирования для случаев действия ионов бора, азота, иттрия и гафния на твердые сплавы ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20, построены зависимости температурных напряжений и скоростей деформирования от энергии ионов бора,

азота, иттрия и гафния с различными зарядами ($z=1$, $z=2$, $z=3$), которые представлены на рис. 1-4.

Видно, что для ионов бора (рис. 1) максимальные значения температурных напряжений реализуются для твёрдого сплава ВК10, где в диапазоне энергий от 150-200 КэВ до 20 КэВ есть реальная возможность образования наноструктур в результате действия температурных напряжений, тогда как при меньших энергиях ионов возможно лишь ускорение процесса образования НС за счёт других критериев.

Для случаев действия иона бора на ВК1 модифицированный и ВК20 реализация наноструктур не реальна, но возможно ускорение получения наноструктур за счёт других критериев.

Скорости деформирования высоки для ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20 и достаточны для получения НС, но так как величины температурных напряжений недостаточны, то НС не образуется (рис. 1).

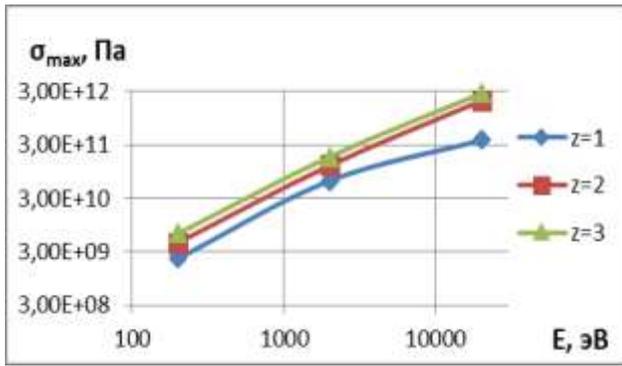
При действии ионов азота зависимость температурных напряжений и скоростей деформирования от энергии ионов азота представлены на Рис. 2 ($z = 1$, $z = 2$, $z = 3$). Видно, что зона образования НС переместилась в зону меньших энергий и НС образуются для ВК10, уже начиная с 300–350 эВ до 20 кэВ, т. е. образование НС затрудняется с ростом массы иона, а зона, где есть возможность ускорения образования не за счёт других критериев, сужается и начинается с 500–1200 эВ для ВК10 модифицированного, а для ВК20 – с 1100–1500 эВ, т. е. ускорение образования НС за счёт действия температурных напряжений маловероятно, скорости деформирования достаточно высоки (рис. 2).

Действие ионов иттрия на твердые сплавы ВК10, ВК10 модифицированный и ВК20 показывает, что энергия ионов для образования НС, хоть и незначительно, но увеличивается до 350–400 эВ, а зона энергий, когда вероятность ускорения образования НС за счёт других критериев смещается в зону больших энергий (1100–1300 эВ) для других твердых сплавов даже зона ускорения образования НС уменьшается и начинает реализовываться с 1200–1600 эВ. Скорость деформирования достаточно для образования НС для всех твёрдых сплавов (рис. 3).

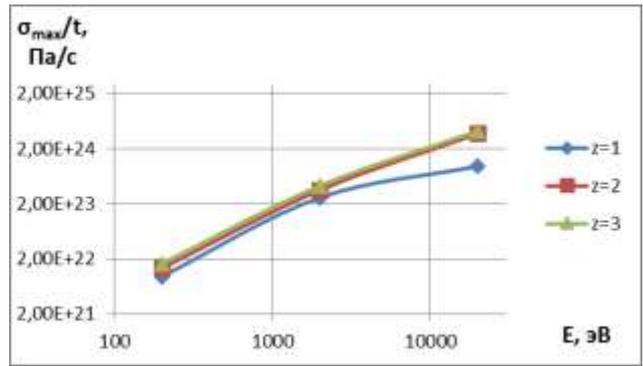
Переход к ионам гафния приводит к практическому сохранению результатов, которые очень близки, что позволяет для ионов с атомными массами более 90 единиц расчётов не проводить, так они имеют отличия в пределах погрешности расчётов (сравни рис. 4 и рис. 3).

Выводы.

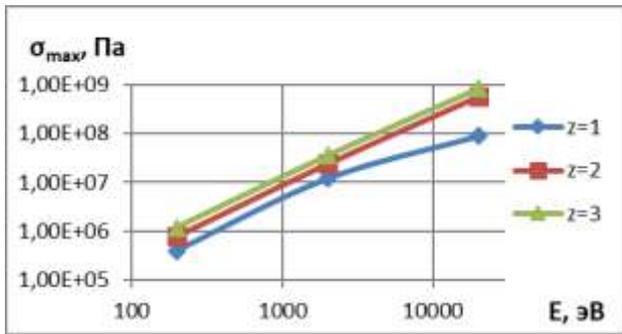
Показано, что для твёрдого сплава ВК10 есть реальная возможность получения наноструктур за счёт действия температурных напряжений и ускорения образования НС за счёт других критериев довольно таки реальна.



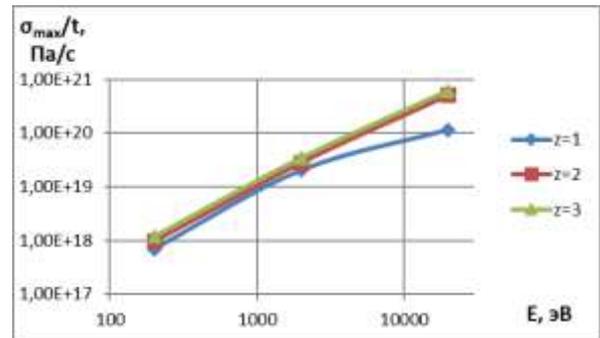
а



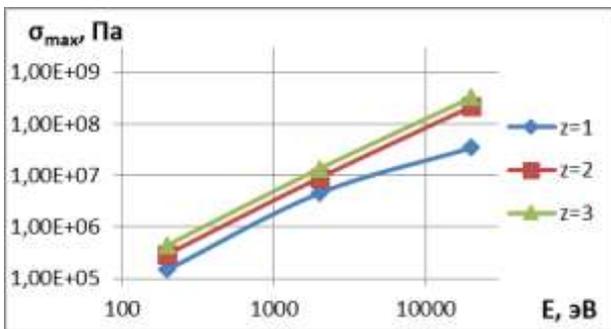
б



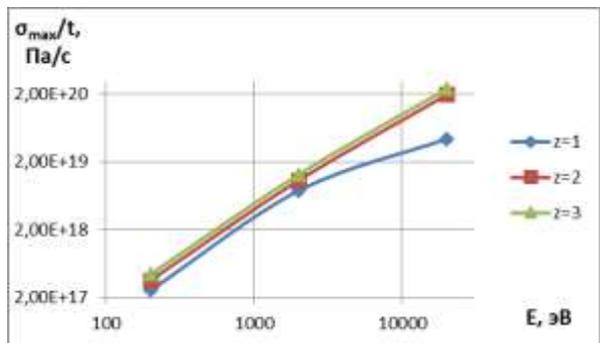
в



г

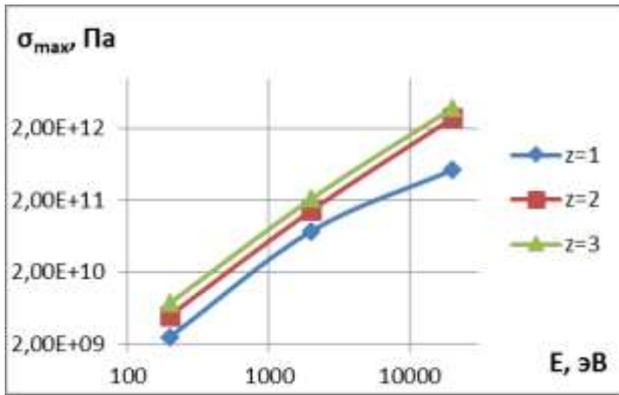


д

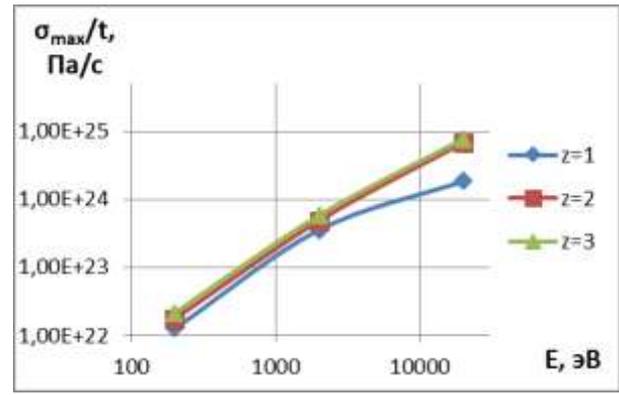


е

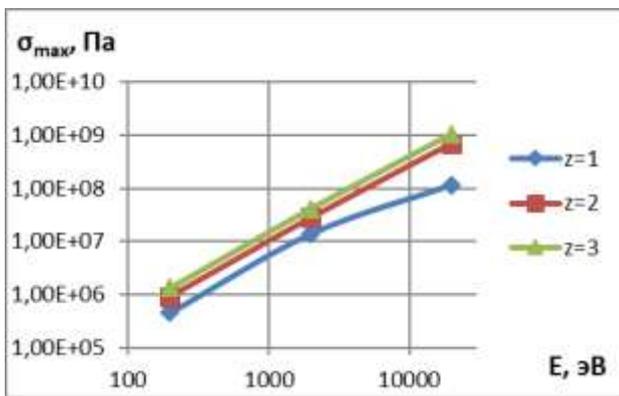
Рисунок 1 – Зависимости максимальных температурных напряжений (а, в, д) и скорости изменения температурных напряжений (б, г, е) при действии ионов бора (B^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20



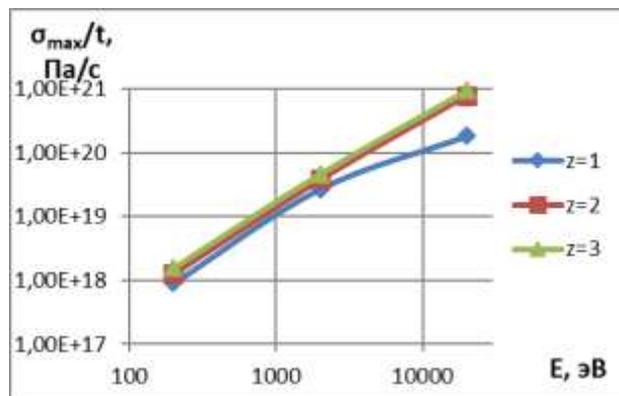
а



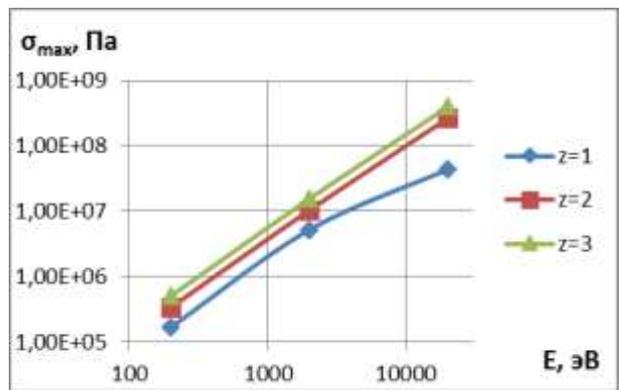
б



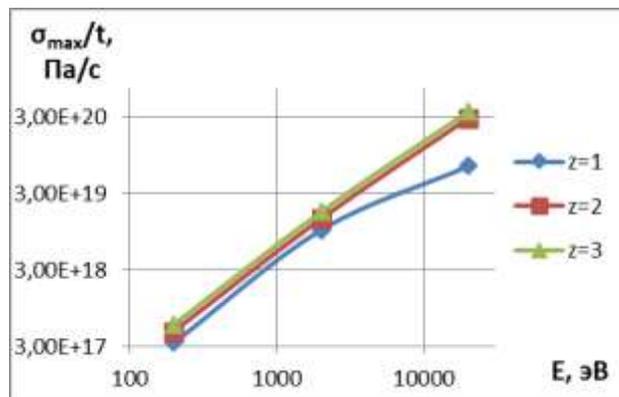
в



г

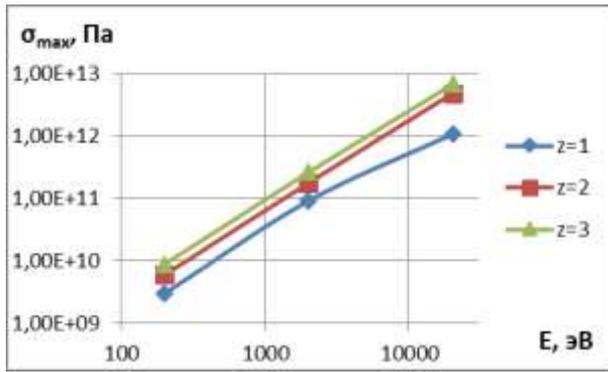


д

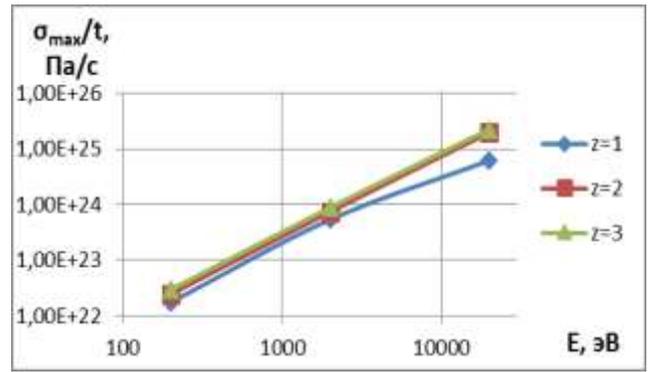


е

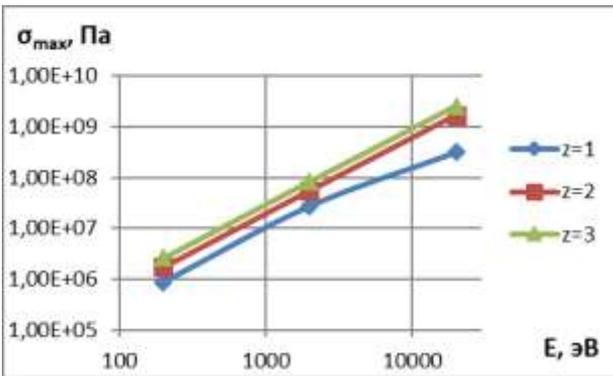
Рисунок 2 – Зависимости максимальных температурных напряжений (а, в, д) и скорости изменения температурных напряжений (б, г, е) при действии ионов азота (N^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20



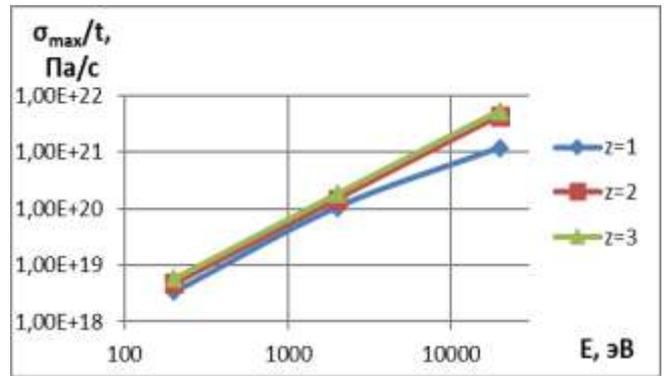
а



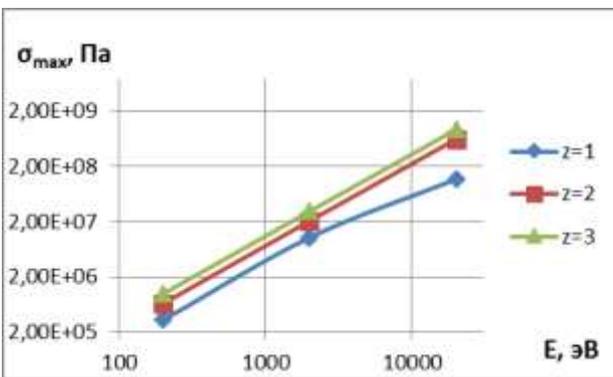
б



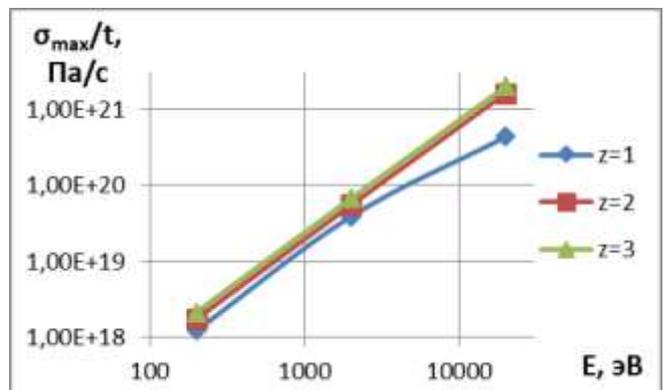
в



г

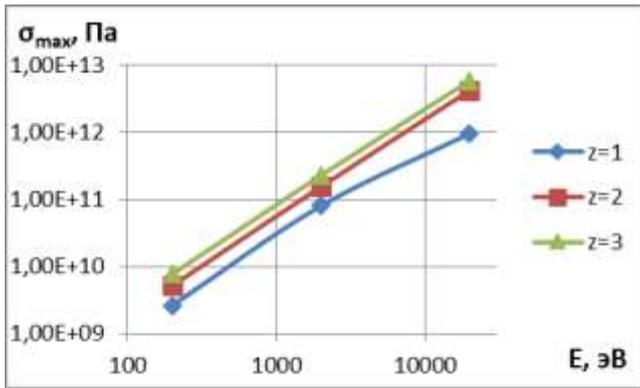


д

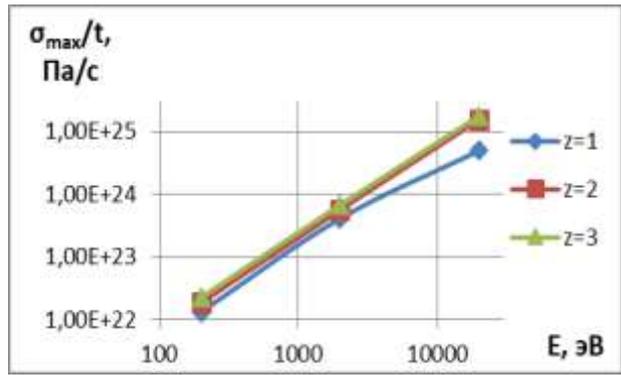


е

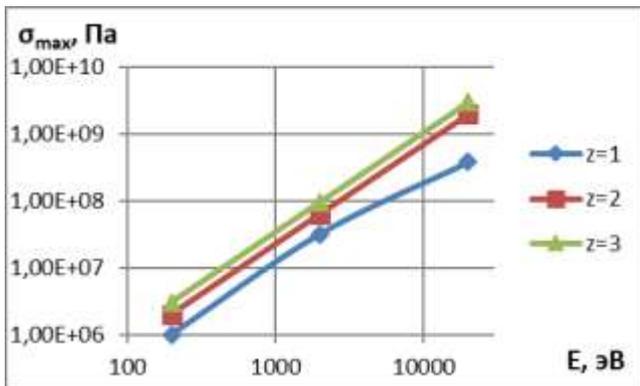
Рисунок 3 – Зависимости максимальных температурных напряжений (а, в, д) и скорости изменения температурных напряжений (б, г, е) при действии ионов иттрия (Y^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20



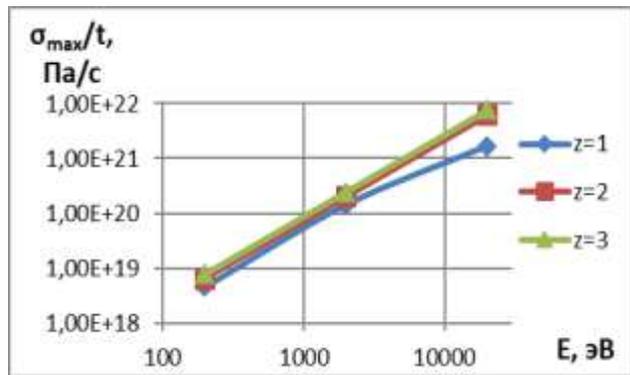
а



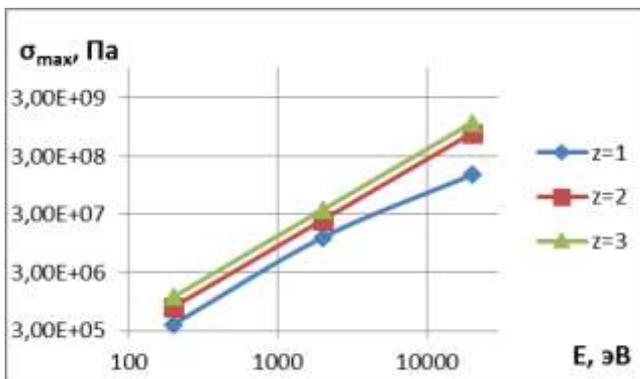
б



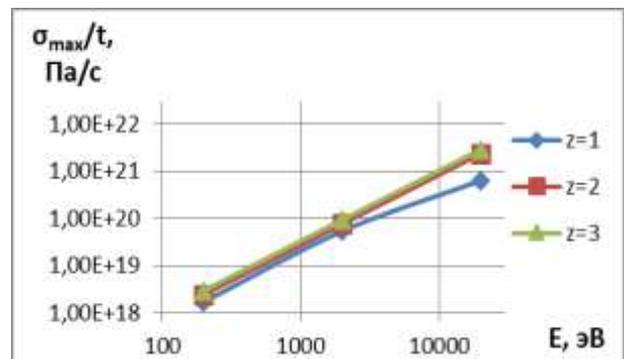
в



г



д



е

Рисунок 4 – Зависимости максимальных температурных напряжений (а, в, д) и скорости изменения температурных напряжений (б, г, е) при действии ионов гафния (Hf^{3+}) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20

Для твёрдых сплавов ВК10 модифицированного и ВК20 образование НС за счёт действия температурных напряжений нереально и даже ускорение процесса образования НС за счёт других критериев мало вероятно.

Скорости деформирования в результате действия температурных напряжений высоки, но без реализации достаточных величин напряжений не смогут обеспечить получения НС.

Список литературы

1. Костюк Г. И., Бруйка О. О., Евсеенкова А. В. *О влиянии доли карбида титана на образование наноструктур в твердых сплавах (Al_2O_3 , TiC) при разном их соотношении* / Proceedings of XIII international conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. С. 60–63.
2. Костюк Г. И., Семенов О. Д., Широкий Ю. В., Воляк Е. А. *Эффективность образования наноструктур на поверхности твердого сплава V3 и способ задания теплофизических и термомеханических характеристик* / Proceedings of XIII international conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. С. 63–67.
3. Костюк Г. И., Тимофеев А. Г. *Эффективность и работоспособность режущего инструмента из твердого сплава Сандвик Коромант с покрытием 0,18HfN+0,82ZrN при фрезеровании титанового сплава VT22* / Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. С.52–55.
4. Костюк Г. И. *Влияние доли карбида вольфрама в твердых сплавах на объем зерна и возможность образования наноструктур* / Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. С. 57–60.
5. Костюк Г. И., Романов М. С., Торосян Г. Д., Попов В. В. *Эффективность и работоспособность режущего инструмента из модифицированного твердого сплава BK10 с покрытием 0,18HfN+0,82ZrN при фрезеровании титанового сплава VT22* / Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. С. 55–57.
6. Костюк Г. И., Ляшенко А. М. *Эффективность применения фрез из модифицированного BK10 и Сандвик Коромант с покрытием 0,2HfN+0,8ZrN при обработке титанового сплава VT22* / Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. С. 67–69.
7. Костюк Г. И., Евсеенкова А. В. *Эффективное фрезерование титанового сплава VT22 режущим инструментом из модифицированного твердого сплава BK10 с покрытием 0,18HfN+0,82ZrN* / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – 2018. – №34 (1310) 2018. С. 57–61.
8. Костюк Г. И. *Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы*: моногр. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. 648 с.
9. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с нанопокрывтиями и наноструктурными модифицированными слоями*: Монография-справочник: в 2 кн. Харьков: «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. – Киев: 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*. – Киев: 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 нанопокрывтия: перспективы и реальность*. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. 406 с.
13. Костюк Г. И. *Научные основы создания современных технологий*. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Кн.1 2008. – 552 с. 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. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. 633 с.
15. Гречихин Л. И., *Физика наночастиц и нанотехнологий*. – Москва: УП «Технопринт», 2004. 397 с.
16. Гусев А. И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. – Москва: Физматлит, 2005. 416 с.
17. Андриевский Р. А., Рагуля А. В. *Наноструктурные материалы*. – Москва: Издательский центр «Академия», 2005. 117 с.

References (transliterated)

1. Kostyuk G. I., Bruyaka O. O., Yevseyenkova A. V. *O vliyani doli karbida titana na obrazovaniye nanostruktur v tverdykh splavakh (Al_2O_3 , TiC) pri raznom ikh sootnoshenii* [On the effect of titanium carbide fraction on the formation of nanostructures in hard alloys (Al_2O_3 , TiC) with their different ratios] / Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. pp. 60–63.
2. Kostyuk G. I., Semenenko O. D., Shirokiy Yu. V., Volyak Ye. A. *Effektivnost' obrazovaniya nanostruktur na poverkhnosti tverdogo splava V3 i sposob zadaniya teplofizicheskikh i termomekhanicheskikh kharakteristik* [The efficiency of formation of nanostructures on the surface of a hard alloy V3 and the method of specifying thermal and thermomechanical characteristics] / Proceedings of XIII international conference on science and education, January 4–13. Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. pp. 63–67.
3. Kostyuk G. I., Timofeyev A. G. *Effektivnost' i rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta iz tvordogo splava Sandvik koromant s pokrytiyem 0,18HfN+0,82ZrN pri frezerovanii titanovogo splava VT22* [Efficiency and performance of cutting tools made of sandvik corvant tangent alloy with a coating of 0,18HfN+0,82ZrN when milling titanium alloy VT22] / Proceedings of XIII international conference on science and education, January 4–13. Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. pp.52–55.
4. Kostyuk G. I. *Vliyaniye doli karbida vol'frama v tverdykh splavakh na ob'yem zerna i vozmozhnost' obrazovaniya nanostruktur* [Influence of the share of tungsten carbide in hard alloys on the volume of grain and the possibility of the formation of nanostructures] Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. pp. 57–60.
5. Kostyuk G. I., Romanov M. S., Torosyan G. D., Popov V. V. *Effektivnost' i rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta iz modifitsirovannogo tvordogo splava VK10 s pokrytiyem 0,18HfN+0,82ZrN pri frezerovanii titanovogo splava VT22* [Efficiency and operation of the cutting tool from the modified creative alloy VK10 with a coating of 0,18HfN + 0,82ZrN when milling titanium alloy VT22] / Proceedings of XIII international conference on science and education, January 4–13. Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. pp. 55–57.
6. Kostyuk G. I., Lyashenko A. M. *Effektivnost' primeneniya frez iz modifitsirovannogo VK10 i Sandvik Koromant s pokrytiyem 0,2HfN+0,8ZrN pri obrabotke titanovogo splava VT22* [The effectiveness of the use of modified VK10 and Sandvik Koromant mills with a coating of 0,2NfN + 0,8ZrN in the processing of titanium alloy VT22] / Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. pp. 67–69.
7. Kostyuk G. I., Yevseyenkova A. V. *Effektivnoye frezerovaniye titanovogo splava VT22 rezhushchim instrumentom iz modifitsirovannogo tvordogo splava VK10 s pokrytiyem 0,18HfN+0,82ZrN* [Effective milling of titanium alloy VT22 with a cutting tool made of modified creative alloy BK10 with a coating of 0,18HfN+0,82ZrN] / Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KHPi». Seriya: Tekhnologii v mashinobuduvanni [Technology in Machines]. 2018. No34 (1310) 2018. pp. 57–61.
8. Kostyuk G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy* [Nanotechnologies: theory, experiment, technology, prospects]: monogr. Kiyev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy [Ed. center of Intern. Academy of Sciences and innov. technology], 2012. 648 p.
9. Kostyuk G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s nanopokrytiyami i nanoskurnymi modifitsirovannymi sloyami* [Efficient cutting tool with nanocoatings and nanoscale modified layers]: Monografiya-spravochnik: v 2 kn. Khar'kov: «Planeta-Print», 2016. – Kn.1. *Plazmenno-ionnyye i ionno-luchevyye tekhnologii* [Plasma-ion and

- ion-beam technologies]. 735 p., Kn. 2. Lazernyye tekhnologii [Laser technology]. 507 p.
10. Kostyuk G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur* [Nanotechnology: the choice of technological parameters and installations, processing performance, physical and mechanical characteristics of nanostructures]: monogr. Kiyev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy [Ed. center of Intern. Academy of Sciences and innov. technology], 2014. 472 p.
 11. Kostyuk G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy nanoseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical and technical principles of coating, ion implantation and ion doping, laser processing and hardening, combined technologies]. Kiyev: Izd-vo AINU, 2002. Kn.1: *Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and combined technologies]. – 596 p. Kn. 2: *Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya* [Handbook for calculating the main physical and technological parameters, assessing the possibilities, choosing the type of technologies and equipment]. 482 p.
 12. Kostyuk G. I. *Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost'* [Nanostructures and nanocoatings: perspectives and reality]. Khar'kov: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2009. 406 p.
 13. Kostyuk G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy* [Scientific basis for the creation of modern technology]. Khar'kov: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», Kn.1 2008. – 552 s. I Kn.2 *Plazmenno-ionnyye, ionno-luchevyye i lazernyye tekhnologii* [Plasma-ion, ion-beam and laser technologies]. 2018. 383 p.
 14. Kostyuk G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem* [Efficient cutting tool with coated and hardened layer]: monogr.-sprav. Khar'kov: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. 633 p.
 15. Grechikhin L. I., *Fizika nanochastits i nanotekhnologiy* [Nanoparticle Physics and Nanotechnology]. Moskva: UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
 16. Gusev A. I. *Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moskva: Fizmatlit, 2005. 416 p.
 17. Andriyevskiy R. A., Ragulya A. V. *Nanostrukturnyye materialy* [Nanostructured Materials]. Moskva: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005. 117 p.

Надійшла (received) 22.02.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович (Костюк Геннадий Игоревич, Gennadiy Kostyuk) – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7584-2240>; e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com

Попов Віктор Васильович (Попов Виктор Васильевич, Viktor Popov) – кандидат технічних наук, ПАО «ФЭД»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9189-6882>; e-mail: vvpopov123@gmail.com

Євсєнкова Анна Володимирівна (Евсєнкова Анна Владимировна, Anna Yevseyenkova) – Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9094-3974>; e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com