

УДК 621.9.044

*Г. И. КОСТЮК, Ю. В. ЕКАСЁВА***О ВЛИЯНИИ ДОЛИ НИТРИДА ТАНТАЛА В ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ T12A И T23A НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР ПРИ ДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА**

На основе теоретического исследования влияния технологических параметров фемтосекундного лазера (плотность теплового потока, время облучения, радиус пятна контакта) на полученный объем нанокластера (НК) для твердых сплавов T12A и T23A сделаны следующие выводы: 1) с ростом плотности теплового потока, снижением времени его действия и размера радиуса пятна, объем НК, а следовательно и его размеры снижаются; 2) следует ожидать повышение физико-механических характеристик РИ.

Размер зерна в сплаве T23A несколько выше, что говорит о большой перспективе применения T12A с наноструктурами, что подтверждается большей его твердостью чем у T23A, т.е. увеличение доли нитрида тантала снижает твердость наноструктуры.

**Ключевые слова** нитрид тантала, твердый сплав, наноструктуры, фемтосекундный лазер.

*Г. І. КОСТЮК, Ю. В. ЕКАСЬОВА***ПРО ВПЛИВ ЧАСТКИ НІТРИДУ ТАНТАЛУ В ТВЕРДИХ СПЛАВАХ T12A І T23A НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОТРИМАННЯ НАНОСТРУКТУР ПРИ ДІЇ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА**

На основі теоретичного дослідження впливу технологічних параметрів фемтосекундного лазера (щільність теплового потоку, час опромінення, радіус плями контакту) на отриманий обсяг нанокластера (НК) для твердих сплавів T12A і T23A зроблені наступні висновки: 1) з ростом щільності теплового потоку, зниженням часу його дії і розміру радіуса плями, обсяг НК, а отже і його розміри знижуються; 2) слід очікувати підвищення фізико-механічних характеристик РІ.

Розмір зерна в сплаві T23A трохи вище, що говорить про велику перспективу застосування T12A з наноструктурами, що підтверджується більшою його твердістю ніж у T23A, тобто збільшення частки нітриду танталу знижує твердість наноструктур

**Ключові слова:** нітрид танталу, твердий сплав, наноструктури, фемтосекундний лазер.

*G. KOSTYUK, Yu. YEKASYEV***ON THE INFLUENCE OF THE FRACTION OF TANTALUM NITRIDE IN HARD ALLOYS T12A AND T23A ON THE EFFICIENCY OF OBTAINING NANOSTRUCTURES UNDER THE ACTION OF A FEMTOSECOND LASER**

Based on the theoretical study of the influence of the technological parameters of a femtosecond laser (heat flux density, irradiation time, contact spot radius) on the obtained volume of a nanoclusters (NC) for hard alloys T12A and T23A, the following conclusions are drawn: 1) with an increase in the density of heat flow, a decrease in the time of its action and the size of the spot radius, the volume of the ND, and consequently its dimensions, decrease; 2) we should expect an increase in physico-mechanical characteristics of the RI.

The grain size in the T23A alloy is somewhat higher, which indicates the long-term use of T12A with nanostructures, which is confirmed by its greater hardness than in T23A, i.e. an increase in the proportion of tantalum nitride reduces the hardness of the nanostructure

**Keywords:** tantalum nitride, hard alloy, nanostructures, femtosecond laser.

**Введение.** В настоящее время проектирование материала твёрдого сплава проводится без учёта возможности повышения его свойств за счёт образования наноструктур. Свойства упрочнённых различными методами, включая и образования наноструктур твёрдых сплавов, будут отличаться от твёрдых сплавов в основном состоянии и, очевидно, необходимо при проектировании состава твёрдого сплава учитывать конечный результат – возможности режущего инструмента с упрочнённым слоем, тогда эффективность режущего инструмента будет выше.

**Состояние вопроса.** В настоящее время есть достаточное количество теоретических работ по расчёту размера зерна [1 - 7], с учётом различных факторов и процессов при действии потоков ионов или ионизированного излучения. Но сравнения результатов расчётов размеров зерна в твёрдых сплавах после воздействия фемтолазера нет. Проведём такое сравнение для двух твёрдых сплавов T12A и T23A (производство Японии), причём у первого имеем  $0,83\text{TiN}+0,12\text{TaN}$  сравнение результатов по объёмам зерна наноразмеров даст нам перспективность использования того или иного твёрдого сплава, а значит и определяют доли нитрида тантала на физико-

технические характеристики и работоспособность твёрдого сплава.

**Модель расчёта параметров наноструктур.** На основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости, учитывающей не только основные источники и стоки тепла, но и энергию кристаллизации, и использование теплофизических и термомеханических характеристик материала РИ, рассчитанных квантово-механическим методом полученные основные характеристики наноструктур, это прежде всего объём зерна, а также технологические параметры обработки.

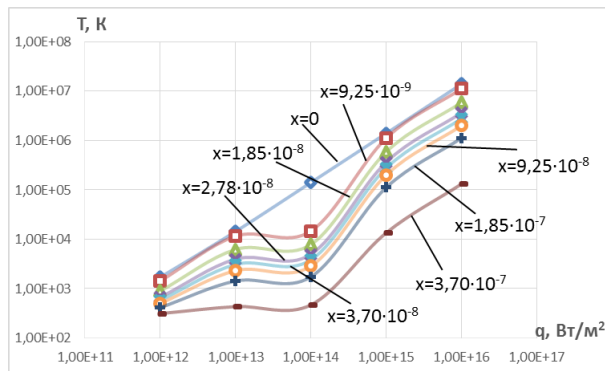
**Результаты и их обсуждение.** Для случая действия фемтосекундного лазера зависимости максимальной температуры на разной глубине ( $x=0$ ,  $x=x_1$  и  $x=x_2$ ,  $x=x_3$ ) представлены на рис. 1 при его действии на T12A и на рис. 2 при его действии на T23A. Для случая описания теплофизических и термомеханических характеристик стохастическим методом и аналогично для случая квантово-механического метода их расчета на рис. 3 и 4 соответственно. Сравнение этих рисунков показывает, что значение максимальных температур при квантово-механическом описании теплофизических и

© . И. Костюк, Ю. В. Екасёва, 2018

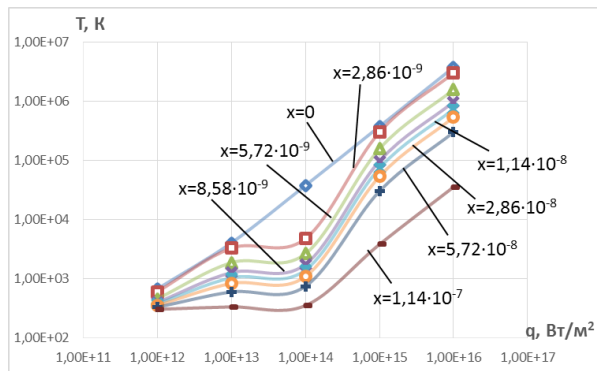
термомеханических характеристик приводит к увеличению расчетной температуры при всех рассмотренных вариантах.

Всё это говорит о том, что следует ожидать в последнем случае больших по величине зон, где могут быть получены наноструктуры. Поэтому были проведены расчеты объемов зон, где реализуются наноструктуры на РИ из Т12А и Т23А.

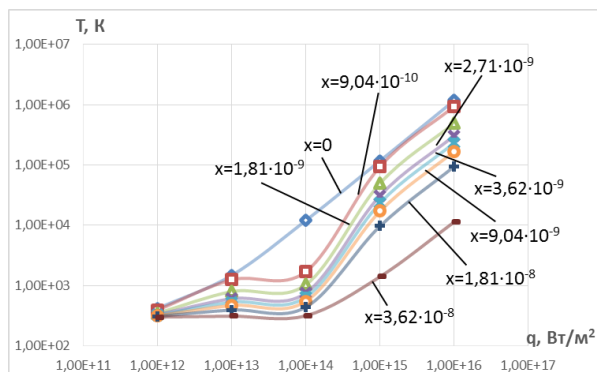
В результате расчёта получены зависимости объема наноструктуры от плотности теплового потока для фемтосекундного лазера. Исследовался диапазон плотностей теплового потока  $10^{11} - 10^{16}$  для случая радиуса  $10^{-6}$  м (рис. 3),  $10^{-7}$  м (рис. 4).



а

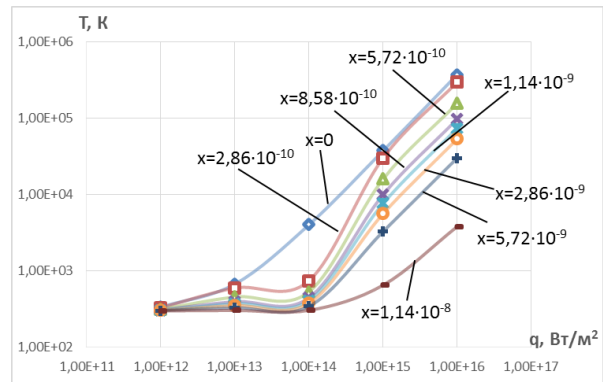


б

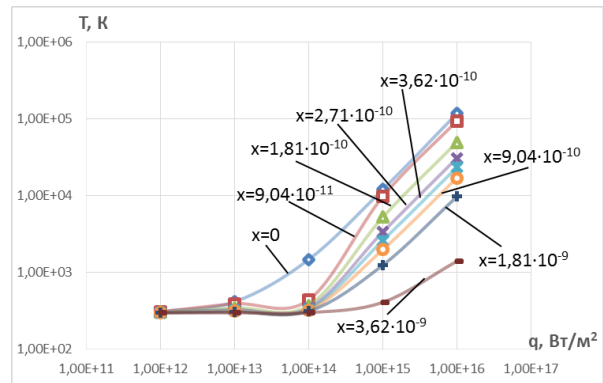


в

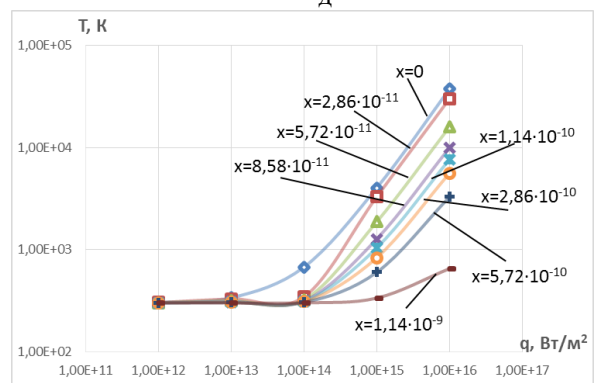
Рис. 1 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на Т12А от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - t=10-10 с; б - t=10-11 с; в - t=10-12 с; г - t=10-13 с; д - t=10-14 с; е - t=10-15 с; ж - t=10-16 с



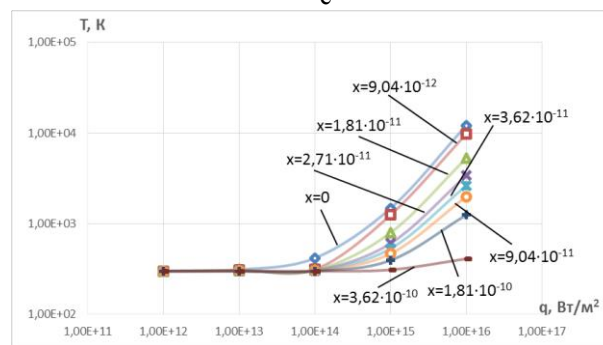
г



д



е



ж

Рис. 1 – Продолжение (Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на Т12А от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - t=10-10 с; б - t=10-11 с; в - t=10-12 с; г - t=10-13 с; д - t=10-14 с; е - t=10-15 с; ж - t=10-16 с)

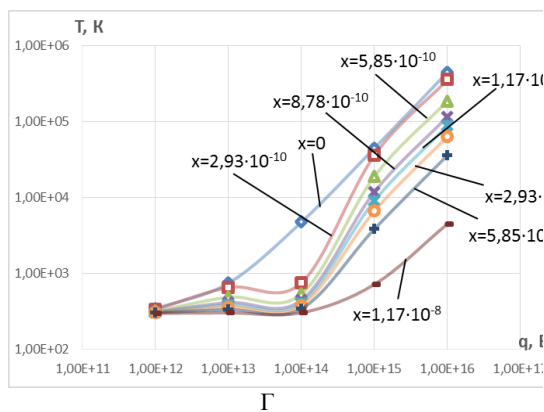
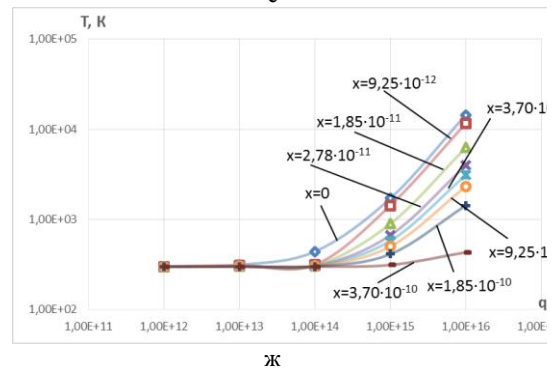
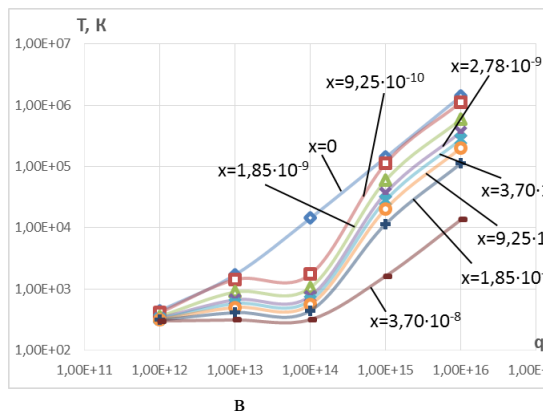
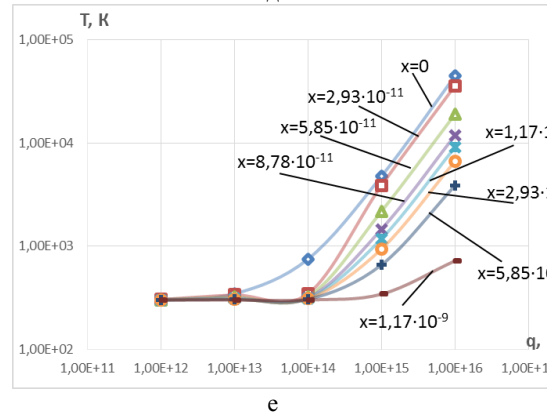
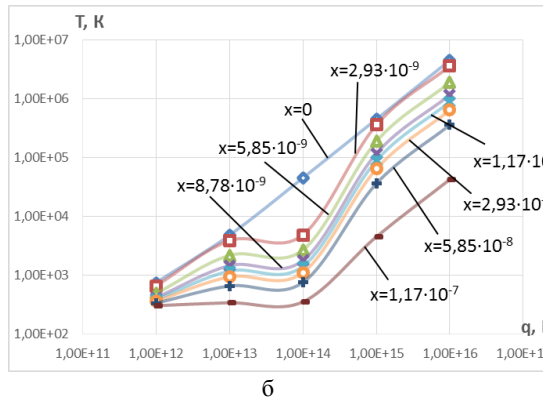
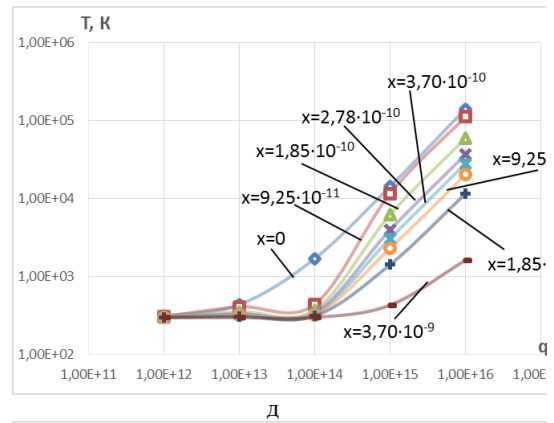
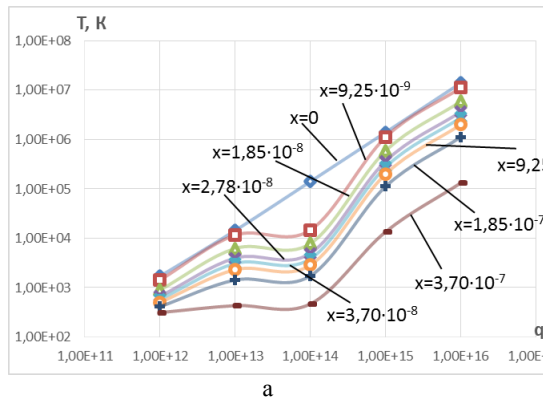


Рис. 2 – Продолжение (Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на Т23А от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а -  $t=10^{-10}$  с; б -  $t=10^{-11}$  с; в -  $t=10^{-12}$  с; г -  $t=10^{-13}$  с; д -  $t=10^{-14}$  с; е -  $t=10^{-15}$  с; ж -  $t=10^{-16}$  с)

Рис. 2 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на Т23А от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а -  $t=10^{-10}$  с; б -  $t=10^{-11}$  с; в -  $t=10^{-12}$  с; г -  $t=10^{-13}$  с; д -  $t=10^{-14}$  с; е -  $t=10^{-15}$  с; ж -  $t=10^{-16}$  с

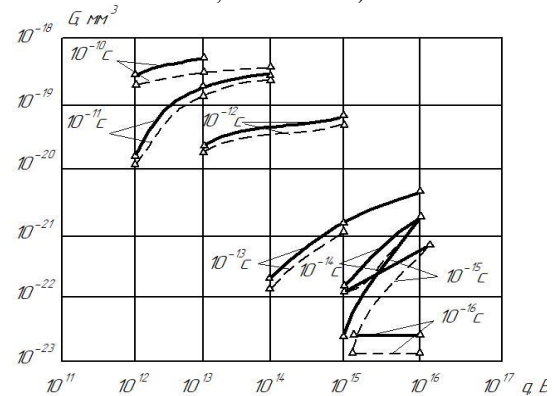


Рис. 3 – Зависимости объема, занятого наноструктурами, от плотности теплового потока  $q$  и времени для фемтосекундного лазера, действующего на Т12А (---) и Т23А (—) при  $R_p = 10^{-6}$  м

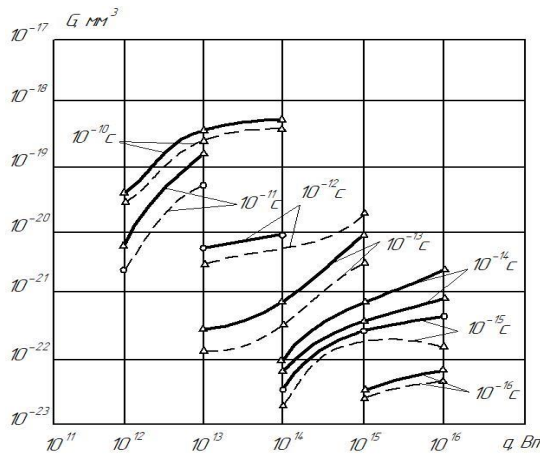


Рис. 2 – Зависимости объема, занятого наноструктурами, от плотности теплового потока  $q$  и времени для фемтосекундного лазера, действующего на T12A (-----) и T23A (-----) при  $R_p = 10^{-7}$  м

С учетом возможности непосредственного образования наноструктур при действии температурных напряжений больше, чем  $10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, т.е. есть возможность получения наноструктур по критерию достижения критических давлений (напряжений).

Видно, что для случая радиуса  $10^{-6}$  м для твёрдого сплава T12A размеры зерна несколько меньше, чем для твёрдого сплава T23A при одних и тех же плотностях теплового потока, и временах его действия. При чём существует область технологических параметров, где наноструктуры для T12A образуются с меньшими затратами энергии и самое главное обеспечивается минимальный размер зерна. Как, например, при высоких временах (порядка  $10^{-10}$  с), объём наноструктур составляет от 4 до 7 на  $10^{-19}$  м<sup>3</sup>. Дальнейшее снижение времени действия до  $10^{-12}$  с приводит к снижению объёмов практически на порядок, при чём минимальные размеры реализуются для T12A. Снижение времён до  $10^{-12}$  и  $10^{-16}$  с, приводит к снижению объёмов наноструктур от 1,5 на  $10^{-3}$  до 6 на  $10^{-21}$  мм<sup>3</sup>, при чём и в этом случае минимальные объёмы зерна реализуются для T12A.

Переход к ещё меньшему размеру пятна луча до  $10^{-7}$  м приводит к увеличению зоны технологических параметров, где реализуются наноструктуры. Так при  $t = 10^{-10}$  с и  $q = 10^{12} - 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup> получение наноструктур в зоне плотностей светового потока  $10^{14} - 10^{16}$  реализуются при временах  $10^{-16}$  и  $10^{-14}$  с. При чём и в этом случае большие объёмы соответствуют твёрдому сплаву T23A (рис.4).

Анализ графиков показывает, что твёрдый сплав T12A с 12% тантала обеспечивает более низкие объёмы зерна, а, следовательно, и будет обеспечивать более высокие физико-механические характеристики по износостойкости РИ, его эффективности и производительности обработки, что было показано в монографии [7]. Всё это говорит, что даже при минимальных количествах нитрида тантала – 12% есть возможность получить довольно значительные повышения физико-механических характеристик, а

значит этот твёрдый сплав с наноструктурным слоем будет более износостойким, будет обеспечивать больший снимаемый объём материала за период стойкости

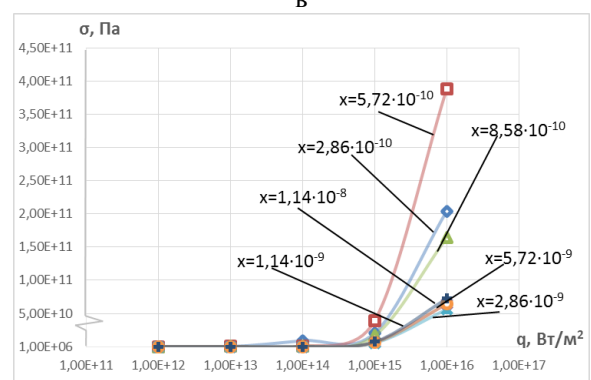
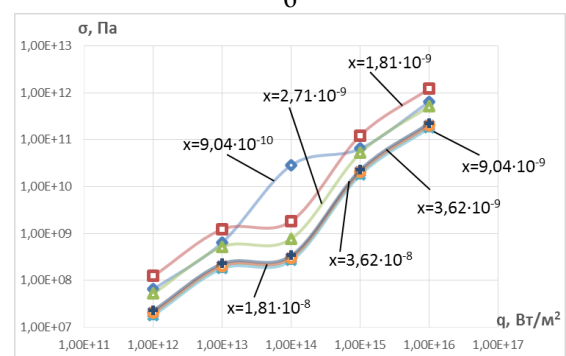
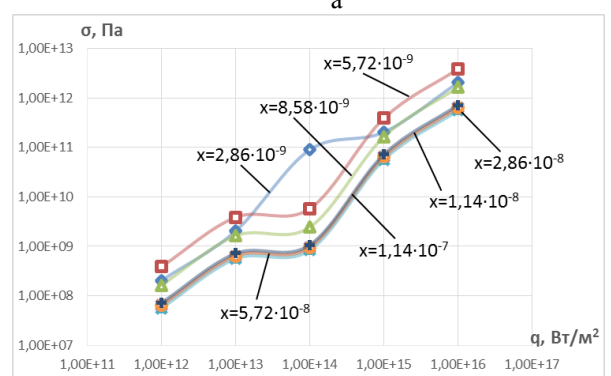
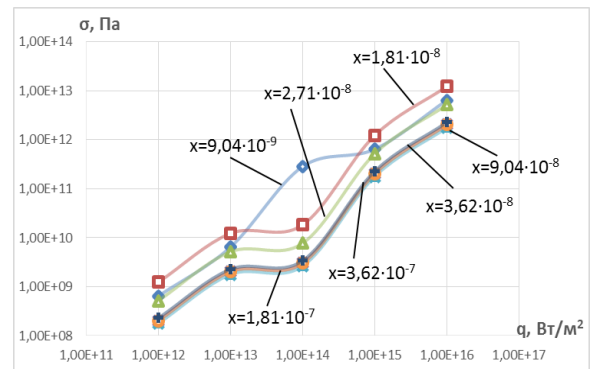
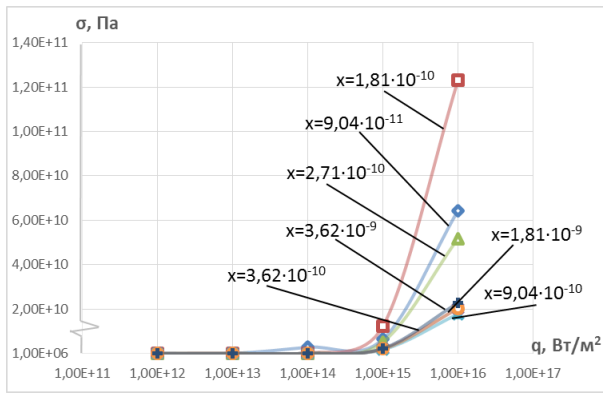
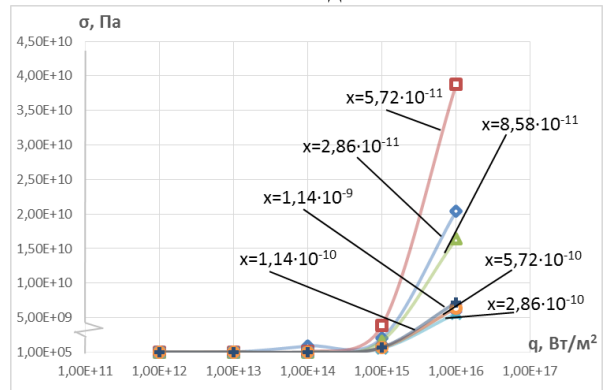


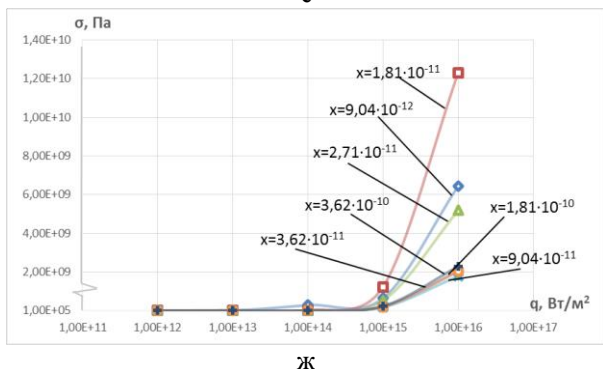
Рис. 5 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на T12A от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а -  $t=10^{-10}$  с; б -  $t=10^{-11}$  с; в -  $t=10^{-12}$  с; г -  $t=10^{-13}$  с; д -  $t=10^{-14}$  с; е -  $t=10^{-15}$  с; ж -  $t=10^{-16}$  с



Д

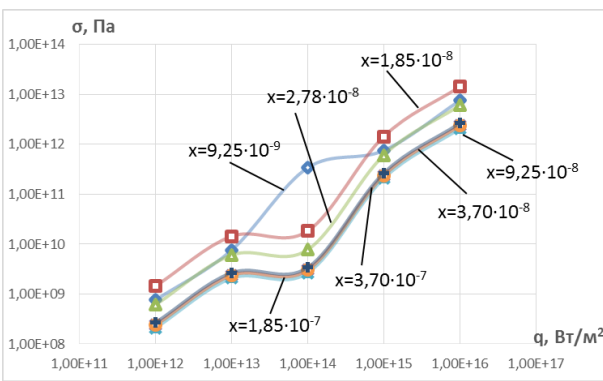


Е



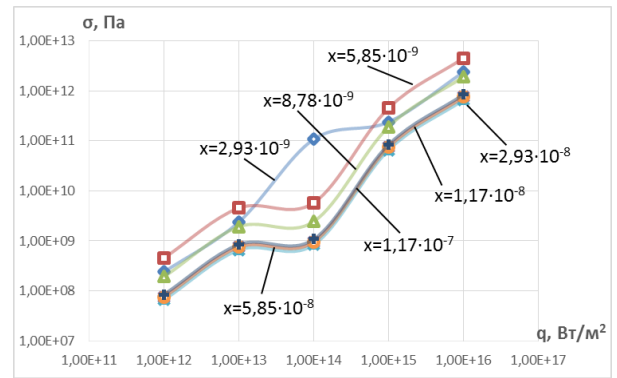
Ж

Рис. 5 – Продолжение

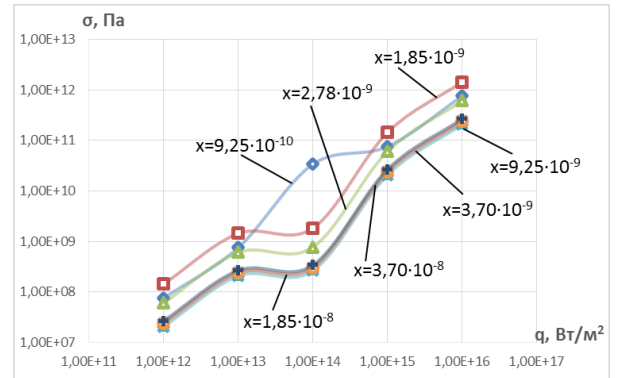


а

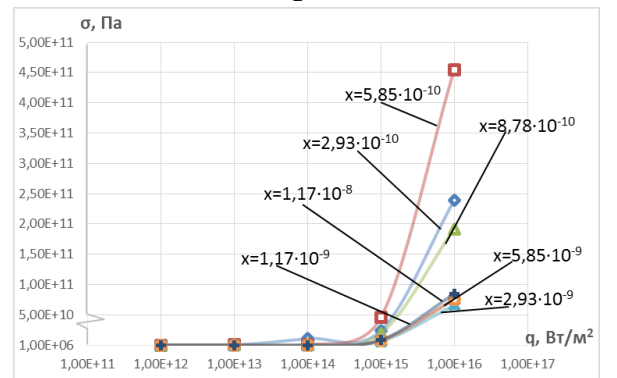
Рис. 6 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на Т23А от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а -  $t=10^{-10}$  с; б -  $t=10^{-11}$  с; в -  $t=10^{-12}$  с; г -  $t=10^{-13}$  с; д -  $t=10^{-14}$  с; е -  $t=10^{-15}$  с; ж -  $t=10$



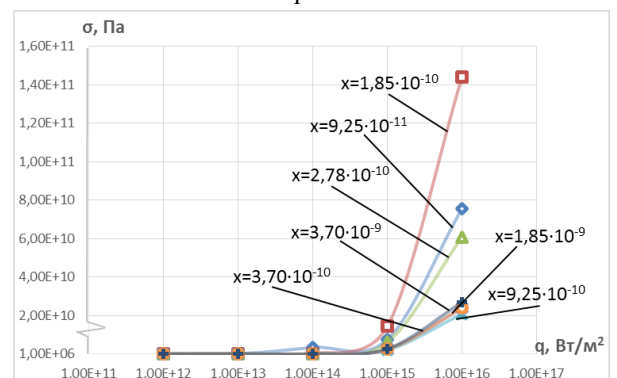
б



в



г



д

Рис. 6 – Продолжение (Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на Т23А от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а -  $t=10^{-10}$  с; б -  $t=10^{-11}$  с; в -  $t=10^{-12}$  с; г -  $t=10^{-13}$  с; д -  $t=10^{-14}$  с; е -  $t=10^{-15}$  с; ж -  $t=10$ )



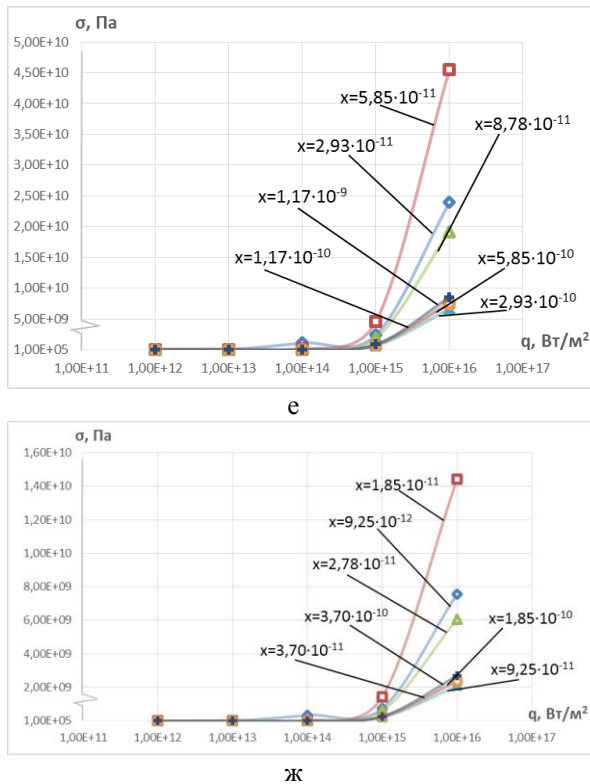


Рис. 6 – Продолжение

**Выводы.** Проведенные исследования показывают, что есть возможность определять состав твёрдого сплава, который будет обеспечивать наилучшие условия для образования наноструктур. Видно, что использование лазерного луча с меньшим диаметром ( $10^{-7}$  м), будет обеспечивать получение большего размера наноструктур в материале режущего инструмента или его покрытия.

Построенные графики позволяют выбирать технологические режимы и размер пятна луча, позволяющие получать наилучшие режимы для упрочнения твёрдого сплава, а значит и обеспечивать конструирование твёрдого сплава с учётом его упрочнения за счёт образования наноструктур.

#### Список литературы

1. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокровками и наноструктурными модифицированными слоями: монография-справ. в 2 кн. Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии / Г.И. Костюк – Харьков: «Планета-Принт», 2016. — 735 с.
2. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических

параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: монография / Г. И. Костюк. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.

3. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: монография / Г. И. Костюк. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. Костюк, Г. И. Наноструктуры и нанопокровтия: перспективы и реальность: учеб. пособ. / Г. И. Костюк. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. Костюк, Г. И. Научные основы создания современных технологий: учеб. пособ. / Г. И. Костюк. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
6. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: монография-справочник / 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: справочник / Г. И. Костюк. – Киев.: Вид-во АНУ, 2003. – 412 с.
8. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – Москва: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
9. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Харьков: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
10. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – Москва: Физматлит, 2005. – 416 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Kostyuk, G.I. Effective cutting tool with nanocoatings and nanoscale modified layers: monograph-reference. in 2 books. Book 1. Plasma-ion and ion-beam technologies. Kharkov. "Planet-Print", 2016. 735 p.
2. Kostyuk, G.I. Nanotechnologies: selection of technological parameters and installations, processing capacity, physical and mechanical characteristics of nanostructures: monograph. Kiev. Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2014. 472 p.
3. Kostyuk, G.I. Nanotechnology: theory, experiment, technology, perspectives: monograph. Kiev. Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2012. 648 p.
4. Kostyuk, G.I. Nanostructures and nanocoatings: perspectives and reality: Proc. Help. Kharkov: The national. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2009. 406 p.
5. Kostyuk, G.I. Scientific foundations of the creation of modern technologies: Textbook. Help. Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2008. 552 p.
6. Kostyuk, G.I. Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer: a monograph-reference book. Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2007. 633 p.
7. Kostyuk, G.I. Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer: a reference book. Kiev. View of АНУ, 2003. 412 p.
8. Grechikhin, L.I. Physics of Nanoparticles and Nanotechnologies / L.I. Grechikhin. - Moscow: UP "Technoprint", 2004. 397 p.
9. Aksenov, I.I. Vacuum arc in erosive plasma sources. Kharkov: Publishing house of scientific research institute "Kharkov Institute of Physics and Technology ", 2005. 211 p.
10. Gusev, A.I. Nanomaterials, nanostructures. Moscow: Fizmatlit, 2005. - 416

Поступила (received) 05.02.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Костюк Геннадій Ігорович (Костюк Геннадий Игоревич, Kostyuk Gennady Igorovich)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.

**Єкаєва Юлія Володимирівна (Екасева Юлия Владимировна, Ekas'ova Yuliya Volodimirivna)** – студентка, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.