

УДК 621.375.826

Г. И. КОСТЮК

**ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПРИ ИЗ «ВОЛКАР» ДЛЯ СОЗДАНИЯ НА НЁМ НАНОСТРУКТУРНОГО СЛОЯ**

Для случая действия фемтосекундного лазера на твёрдый сплав ВолКар исследованы зависимости максимальной температуры, скорости роста температуры и температурных напряжений от плотности теплового потока ( $q = 10^{12} - 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>) для разных времён его действия ( $t = 10^{-16} - 10^{-10}$  с), также получены зависимости объема нанокластера при радиусах пятна контакта  $R = 5 \cdot 10^{-7}$ ,  $R = 10^{-6}$  м от технологических параметров обработки, что позволило получить требуемые технологические параметры для получения наноструктур с применением фемтосекундного лазера.

**Ключові слова:** технологические параметры лазера, фемтосекундный лазер, твердый сплав «ВолКар», режущий инструмент, наноструктурные слои.

Для випадку дії фемтосекундного лазера на твердий сплав ВолКар досліджені залежності максимальної температури, швидкості росту температури і температурних напружень від щільності теплового потоку ( $q = 10^{12} - 10^{16}$  Вт / м<sup>2</sup>) для різних часів його дії ( $t = 10^{-16} - 10^{-10}$  с), також отримано залежності обсягу нанокластера при радіусах плями контакту  $R = 5 \cdot 10^{-7}$ ,  $R = 10^{-6}$  м від технологічних параметрів обробки, що дозволило отримати необхідні технологічні параметри для отримання наноструктур із застосуванням фемтосекундного лазера.

**Ключевые слова:** технологічні параметри лазера, фемтосекундный лазер, твердый сплав «ВолКар», ріжучий інструмент, наноструктурні шари.

In the case of the action of femtosecond laser VolKar hard alloy investigated over-dependence of maximum temperature, temperature rise rate and temperature stresses on the heat flux density ( $q = 10^{12} - 10^{16}$  W / m<sup>2</sup>) for different times of its operation ( $t = 10^{-16} - 10^{-10}$  s), as prepared according nanocluster volume at the contact patch radii  $R = 5 \cdot 10^{-7}$ ,  $R = 10^{-6}$  m from the technological machining parameters as possible to obtain the required process parameters for obtaining nanostructures using a femtosecond laser.

**Keywords:** technological parameters of the laser, the femtosecond laser, solid alloy "VolKar", cutting tools, nanostructured layers.

**Введение.** Твёрдый сплав «Волкар» создан на базе карбида вольфрама, но пока ещё не имеет широкого применения в технике, из-за относительно невысокой износостойкости (HV 18 – 24 ГПа), тогда как твёрдость применения нанопорошков WC повышает твёрдость (HV 26,4 ГПа), очевидно даже у спеченного из nano порошков «ВолКара» работоспособность и износостойкость может быть выше. Если же обеспечить появление наноструктур на поверхности за счёт дополнительного воздействия лазерного излучения, то можно ожидать получение более высокой микротвёрдости поверхности, а, следовательно, и износостойкость будет значительно выше.

Выше изложенное показывает важность рассмотрения вопроса о перспективе создания наноструктур на режущем инструменте с размерами зерна порядка 10 нм, что существенно повысит микротвёрдость «ВолКар».

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, nano- 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.

**Состояние вопроса.** На сегодняшний день относительно большое число работ выполнено по изучению наноструктур (НС), основная масса работ посвящена их экспериментальному изучению. Теоретические работы в этом направлении даны в монографиях [1-11]. Обобщение результатов экспериментальных работ представлено в монографиях [12,13].

Несмотря на то, что в работе [14] рассмотрена возможность обработки нового твёрдого сплава «Волкар», результатов его применения в производстве и даже в экспериментах в настоящее время нет. Очевидно, что ожидать значительного повышения эффективности и работоспособности твёрдых сплавов за счёт применения «ВолКар» не приходится, даже при использовании «ВолКар», полученного из порошка наноразмеров (100 нм). Возможность же обработки этого твёрдого сплава лучом фемтосекундного лазера с целью образования наноструктурного слоя с достаточно малыми размерами зерна (порядка 10 нм), может координально улучшить свойства этого сплава и обеспечить высокую работоспособность и эффективность его работы.

Всё это говорит об актуальности и своевременности теоретических исследований по возможности образования НС на твёрдом сплаве «ВолКар» при обработке фемтосекундным лазером.

**Теоретические методы исследования.** Теоретические исследования проводились на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости, которая позволяла получать поля температур, температурных напряжений, оценивать скорость роста температуры и в дальнейшем с учётом критериев образования НС находить объёмы зерна и ограничив размер зерна 100 нм, оценить зоны технологических параметров лазера, при которых есть вероятность получения НС, так как ранее была проверена

© Г.И. Костюк, 2017

адекватность [1] этой модели, то результаты расчётов будут достоверными.

**Результаты расчётов и их обсуждения.** В случае действия фемтосекундного лазера для технологических режимов с плотностью теплового потока  $q = 10^{12} - 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> и времён его действия  $t = 10^{-16} - 10^{-10}$  с были проведены расчёты максимальных температур,

скоростей роста температур и температурных напряжений на различных глубинах, результаты которых представлены на рисунка 1 – 3.

Так анализ рисунка 1 показывает, что по температурам при больших временах ( $t = 10^{-10} - 10^{-11}$  с), реально можно получать НС при плотностях теплового потока  $q = 10^{12} - 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup> (рис. 1, а, рис. 1, б).

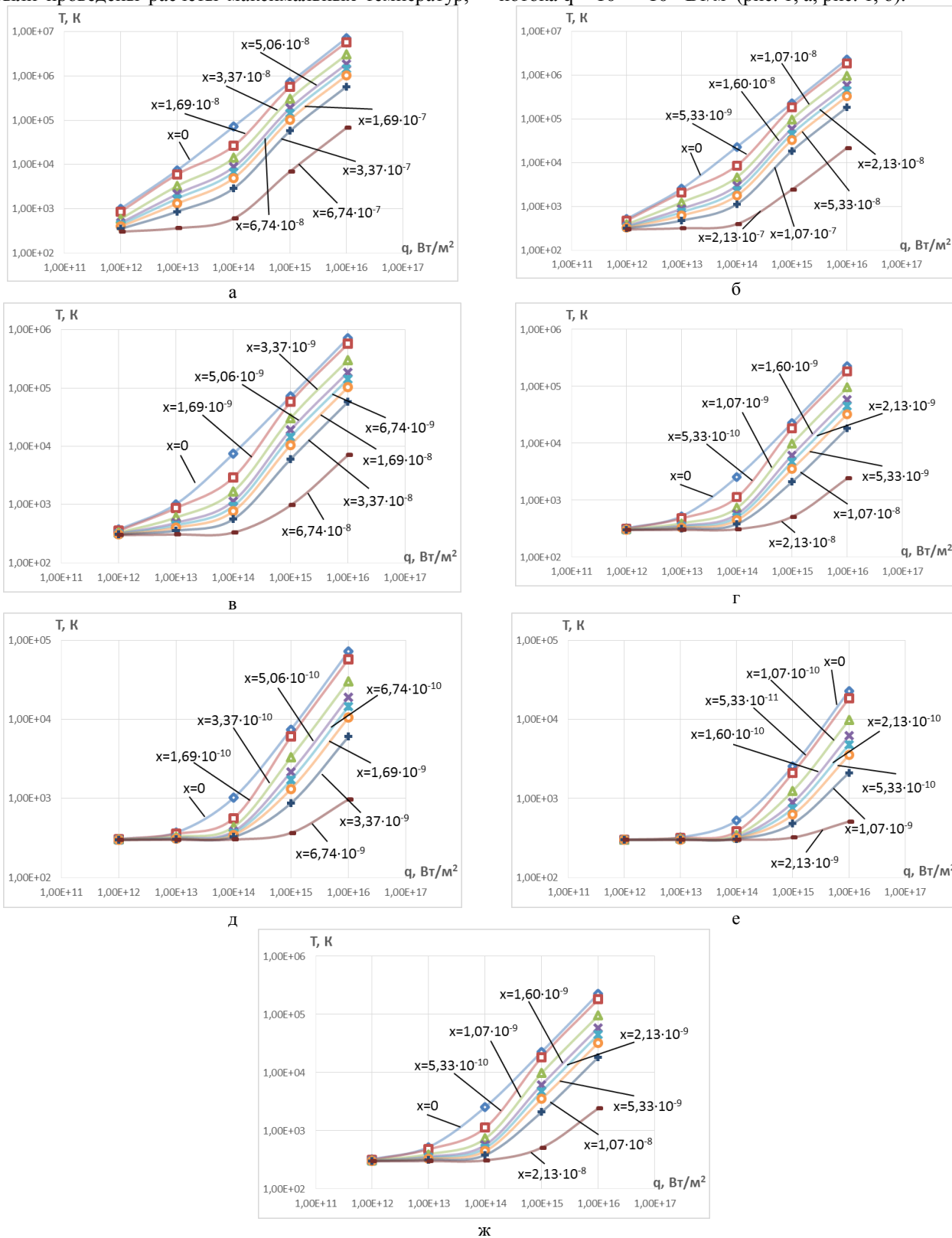


Рис. 1. – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на материал «ВолКар» от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а -  $t = 10^{-10}$  с; б -  $t = 10^{-11}$  с; в -  $t = 10^{-12}$  с; г -  $t = 10^{-13}$  с; д -  $t = 10^{-14}$  с; е -  $t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

Уменьшение времени действия до  $t = 10^{-12} - 10^{-13}$  с приводит к тому, что НС возможно получать при плотностях теплового потока  $q = 10^{13} - 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup> и даже при  $q = 10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>, но только на очень больших глубинах  $2,13 \cdot 10^{-8}$  м (рис. 1, в, рис. 1, г). Снижение времени действия до  $t = 10^{-16} - 10^{-14}$  с приводит к тому, что НС образуются только при плотностях теплового потока  $q = 10^{15} - 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> на незначительных глубинах причём глубина слоя, где реализуются НС достигает  $6,74 \cdot 10^{-10} - 3,37 \cdot 10^{-9}$  м. (рис. 1, д, рис. 1, е, рис. 1, ж).

Результаты расчёта скорости роста температур представлены на рис. 2 для 2-х режимов  $t = 10^{-10}$  с и  $t = 10^{-16}$  с. Видно, что для этих режимов реализуются условия достаточные для образования НС по этому критерию, так как они превышают  $10^7$  К/с.

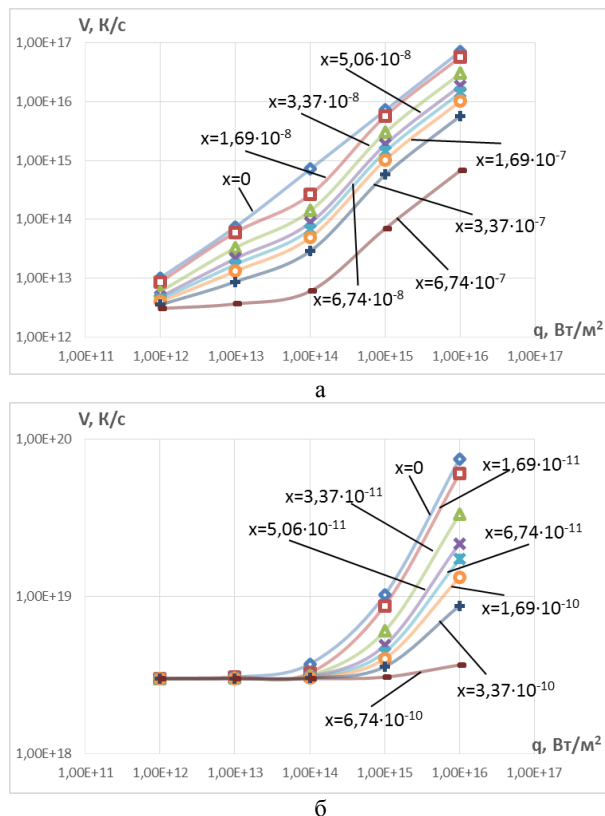


Рис. 2 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на материал «ВолКар» от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а -  $t = 10^{-10}$  с; б -  $t = 10^{-16}$  с.

Температурные напряжения могут ускорять процесс образования НС или даже непосредственно участвовать в их образовании при превышении их критического значения -  $10^{10}$  Па, поэтому были проведены расчёты температурных напряжений в диапазоне приведенных технологических параметров, результаты, которых представлены на рисунке 3.

Видно, что при временах  $t = 10^{-10} - 10^{-11}$  с реализуются температурные напряжения значительных величин и на достаточно больших глубинах до  $6,74 \cdot 10^{-7}$  м, в этом случае при плотностях теплового потока  $q = 10^{10} - 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup> есть возможность получения НС за счёт действия температурных напряже-

ний, хотя в этих случаях температурный режим не соответствует необходимому для образования НС, температуры значительно выше, что говорит о вероятности снижения этого эффекта (рис. 3, а, рис. 3, б).

При меньших временах действия  $t = 10^{-12} - 10^{-13}$  с непосредственное образование НС за счёт действия температурных напряжений может быть реализовано, только на незначительных глубинах порядка  $2,13 \cdot 10^{-8} - 6,74 \cdot 10^{-8}$  м. и плотности теплового потока  $q = 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup> (рис. 3, в, рис. 3, г), а для остальных глубин и плотностей теплового потока есть возможность ускорения образования НС, за счёт действия температурных напряжений.

При временах действия  $t = 10^{-14} - 10^{-16}$  с есть вероятность только некоторого ускорения процесса образования НС и то при высоких плотностях теплового потока  $q = 10^{15} - 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> (рис. 3, д, рис. 3, е, рис. 3, ж).

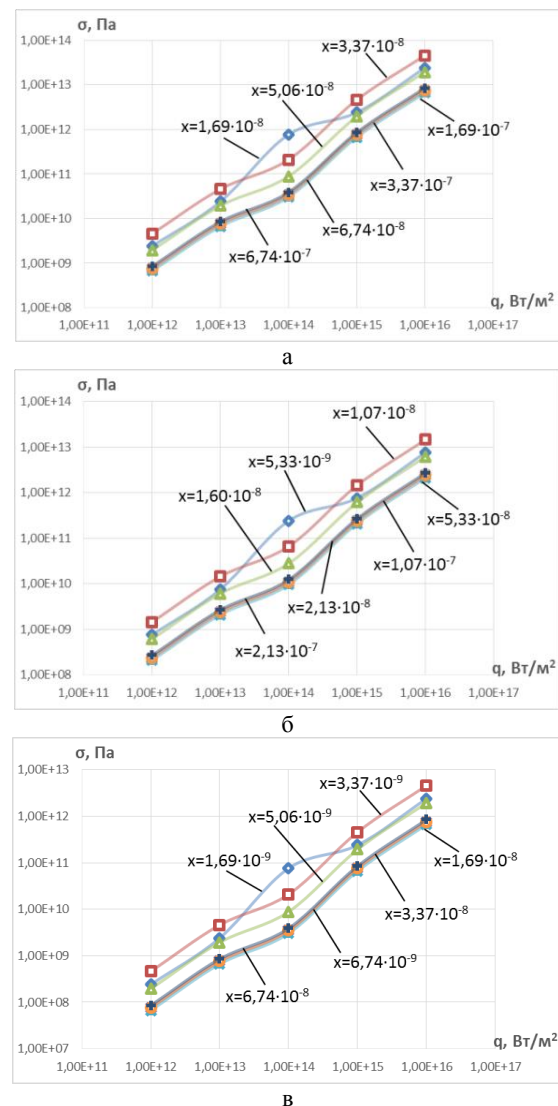


Рис. 3 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на материал «ВолКар» от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а -  $t = 10^{-10}$  с; б -  $t = 10^{-11}$  с; в -  $t = 10^{-12}$  с; г -  $t = 10^{-13}$  с; д -  $t = 10^{-14}$  с; е -  $t = 10^{-15}$  с; ж -  $t = 10^{-16}$  с.

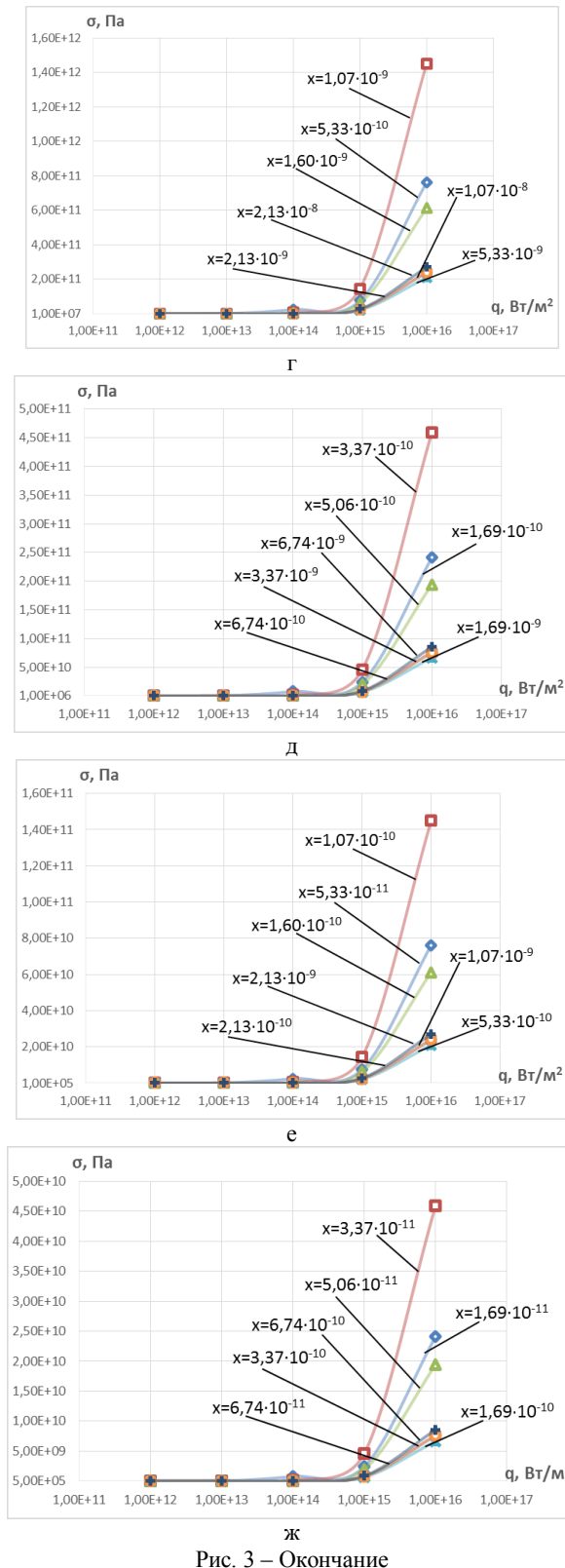
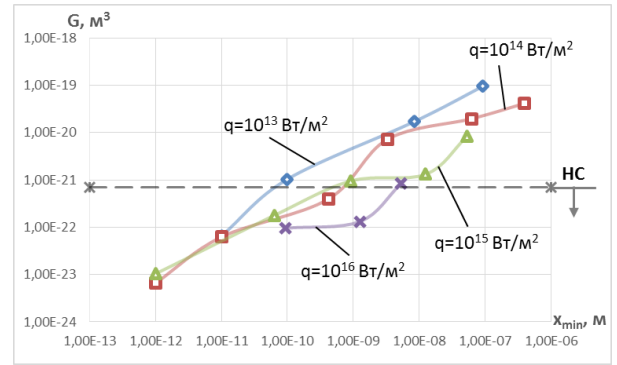


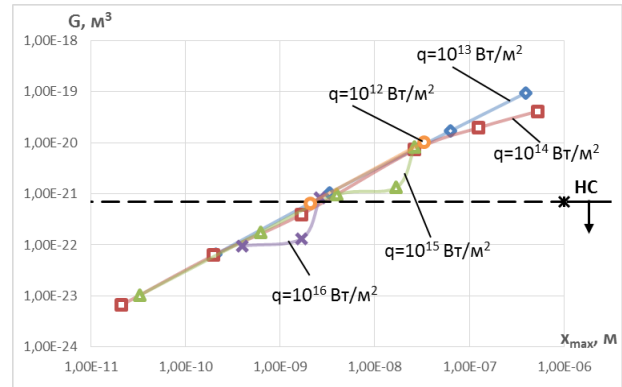
Рис. 3 – Окончание

Объем зерна определяет возможность реализации наноструктур в материале, а технологические параметры, которые их обеспечивают, являются важным результатом исследования. Кроме того, глубины залегания этого зерна также важны для конструирования поверхности деталей из наноструктур. Поэтому было проведено исследование зависимости объема нанокластера от минимальной и максимальной гл-

бины залегания НС (пунктиром был обозначен объем, соответствующий границе появления НС).

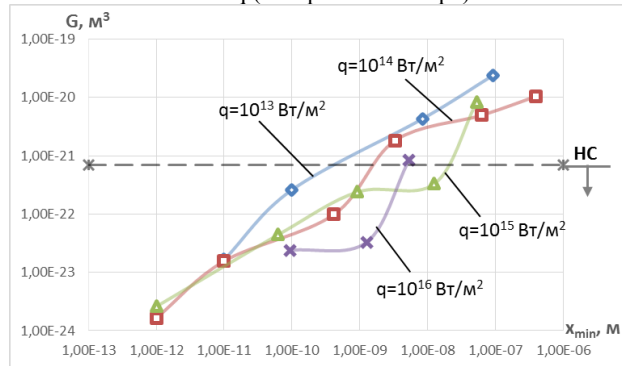


а

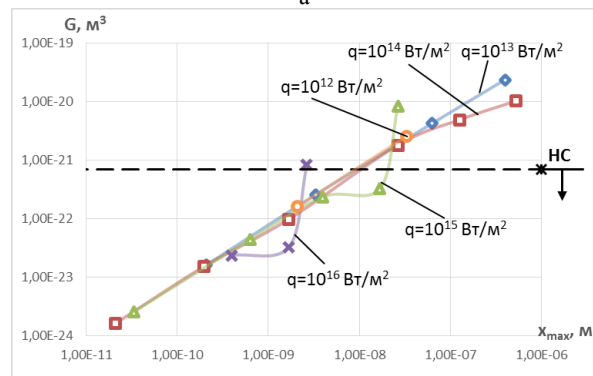


б

Рис. 4 – Зависимость объема нанокластера  $R=10^{-6}$  м от: а – минимальной; б – максимальной глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока  $q$  (материал «ВолКар»).



а



б

Рис. 5 – Зависимость объема нанокластера  $R=5 \cdot 10^{-7}$  м от: а – минимальной; б – максимальной глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока  $q$  (материал «ВолКар»).

Такие зависимости представлены для радиуса пятна ЛИ на детали  $R=10^{-6}$  м (рис. 4) и  $R=5 \cdot 10^{-7}$  м (рис. 5). Сравнение этих рисунков показывает, что в последнем случае ( $R=5 \cdot 10^{-7}$  м) для большей гаммы технологических параметров есть возможность получения НС на твердом сплаве «ВолКар».

Для экспресс-оценки технологических параметров, при которых реализуются НС, были построены объемные картины зависимости объема нанокластера от плотности теплового потока ЛИ и времени его действия (рис. 6, 7) для пятна контакта  $R=10^{-6}$  м (рис. 6) и для пятна контакта  $R=5 \cdot 10^{-7}$  м (рис. 7). Сравнение этих рисунков показывает, что во втором случае при  $R=5 \cdot 10^{-7}$  м зона технологических параметров ЛИ расширена, т.е. при большем количестве технологических параметров есть возможность получения НС. Построенные зависимости позволяют выбирать предварительно технологические параметры, при которых возможна реализация НС, что имеет большое практическое значение для применения «ВолКар» с НС-слоем.

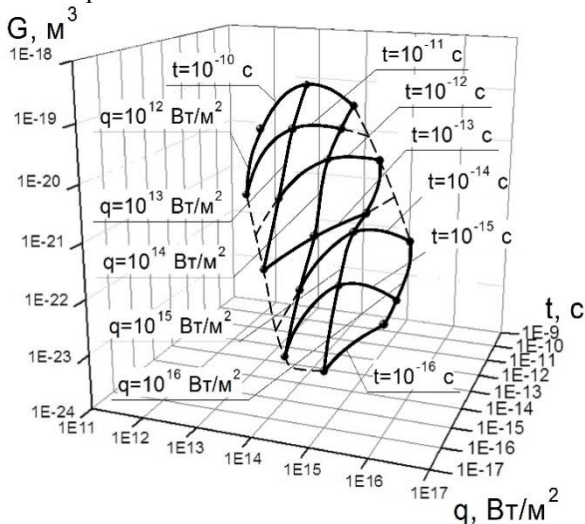


Рис. 6 – Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения –  $q$  и времени его действия  $t$  в зоне, где образуются наноструктуры ( $R=10^{-6}$  м) (материал «ВолКар»)

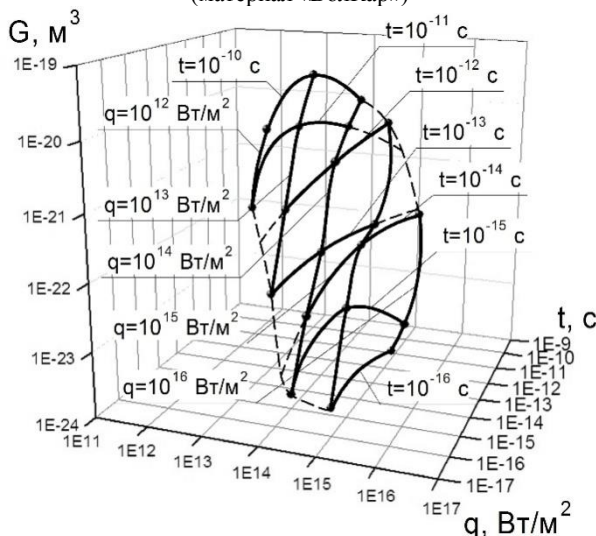


Рис. 7 – Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения –  $q$  и времени его действия  $t$  в зоне, где образуются наноструктуры ( $R=5 \cdot 10^{-7}$  м) (материал «ВолКар»).

## Выводы.

Проведенные исследования показали реальную возможность получения наноструктур с помощью лазерной обработки в фемтосекундном диапазоне твердого сплава «ВолКар», причем можно выбирать, с помощью экспресс-оценки, предварительные технологические параметры и настройки лазера (размера пятна) для того, чтобы получить наноструктуры на определенной глубине, а изменяя технологические параметры заполнить полностью наноструктурами довольно-таки значительный поверхностный слой детали (порядка  $10^{-5}$  м). Все это позволит существенно повысить работоспособность и эффективность режущего инструмента из твердого сплава «ВолКар».

## Список литературы

1. Костюк Г. И., Эффективный режущий инструмент с нанопокрывтиями и наноструктурными модифицированными слоями: Монография-справочник: в 2 кн./Г.И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
2. Костюк Г. И., Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Костюк Г. И., Наноструктуры и нанопокрывтия: перспективы и реальность [Текст]: учеб.пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
7. 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.
8. 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.
9. Костюк Г. И., Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с.
10. 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.
11. Гречихин Л. И., Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
12. Гусев А. И., Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
13. Андриевский Р.А., Наноструктурные материалы [Текст]: учеб.пособие / Р.А. Андриевский, А.В.Рагуля. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 117 с.
14. Узунян М.Д., Шлифование наноструктурных твердых сплавов [Текст]: учеб.пособие / М.Д. Узунян, Р.М. Стрельчук. – Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХП»», 2015. – 182 с. – На рус.яз.

## Bibliography (transliterated)

1. Kostyuk, G.I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, Planeta print, 2016. 735 p.

2. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur: monogr* [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 472 p.
3. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy: monogr* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 648 p.
4. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 1: *Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionnoluchevykh, plazmennykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and combined technologies]. 596 p.
5. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 2: *Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya* [Reference for calculation of the main physical and technological parameters, assessing opportunities, selecting the type of technologies and equipment]. 482 p.
6. Kostyuk, G. I. *Nanostrukturny i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' ucheb.posobiye* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2009. 406 p.
7. Kostyuk, G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy: ucheb.posobiye* [The scientific basis for the creation of modern technologies] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2008. 552 p.
8. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: monogr.-sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. 633 p.
9. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, AINU, 2003. 412 p.
10. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva* [Physical and technical bases of robotized production] – Kharkov, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2006. – 614 p.
11. Grechikhin, L. I. *Fizika nanochastits i nanote-khnologiy* [The physics of nanoparticles and nanotechnology] – Moscow, UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
12. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology] – Moscow, Fizmatlit, 2005. 416 p.
13. Andrievskiy R.A., *Nanostrukturnye materialy* [Tekst]: ucheb.posobie – Moscow. Akademiya. 2005. 117 p.
14. Uzunyan M.D., *SHlifovanie nano-strukturnykh tvorydyh splavov* [Tekst]: ucheb.posobie Kharkov. NTU «KhPI», 2015. – 182 pp.

Поступила (received) 10.03.17

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Фемтосекундна лазерна обробка з волокна для нанесення наноструктурного шару / Г. І. Костюк** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2017. – №17 (1239). – С. 49–54. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-004X.

**Фемтосекундная лазерная обработка рри из «волкар» для создания на нём наноструктурного слоя / Г. И. Костюк** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 49–54. – Библиогр.: 14 назв. – ISSN 2079-004X.

**Femtosecond laser treatment from "Volkar" to create nanostructured layer on it / G. Kostyuk**// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.49–54. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-004X.

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

**Костюк Геннадій Ігорович** – доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Костюк Геннадий Игоревич** – доктор технических наук, профессор, профессор Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Kostyuk Gennadiy Igorevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovsky, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.