

О критериях образования наноструктур при действии ионизирующего излучения на конструкционные материалы и режущий инструмент

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

На основе анализа экспериментальных данных рассмотрены новые критерии образования наноструктур. При получении наноструктур на твердом сплаве ВК6 проанализированы следующие критерии: диапазон и скорость роста температур, максимальные температурные напряжения. Получены зависимости объема нанозерна от плотности теплового потока для случая действия фемто- и пикосекундного лазеров. Показана возможность усиления эффектов, связанных с температурой и температурными напряжениями, за счет различного рода колебаний.

Ключевые слова: фемто- и пикосекундные лазеры, критерии образования наноструктур, температуры, скорость роста температур, температурные напряжения.

Введение

В работах [1–7] использованы в основном три критерия образования наноструктур: достижение требуемого диапазона температур, скорости их роста и частично – величины температурных напряжений (давлений). Действие ионизирующих излучений выдвигает на передний план целый ряд новых эффектов, которые могут влиять на получение наноструктур, – это наличие катализатора, скорость деформирования и целого ряда различного рода колебаний: от действия термоупругой волны, электромагнитных колебаний, электронного газа в атомах, фононном газе в атоме, атомов в решетке под действием электрических полей, электронов атома под действием магнитных полей, ионной (атомной) решетки под действием светового (ионизирующего) излучения, волнового действия ионизирующего (лазерного) излучения.

Очевидно, что в общем критерии создания наноструктур должны быть учтены все перечисленные эффекты, что даст возможность обеспечить точность размера зоны, где можно получить наноструктуры.

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.

Состояние вопроса

Несмотря на большое количество экспериментальных работ по получению наноструктур, обзоры которых представлены в работах [8–9], в настоящее время нет эффективного суммарного критерия создания наноструктур, который бы учитывал все физические процессы, влияющие на их образование. В представленной статье рассмотрим те физические процессы и факторы, которые могут повлиять на возможность и скорость образования наноструктур. Такое исследование является актуальным и своевременным, так как даст возможность уточнить технологические параметры, при которых можно получать наноструктуры при действии ионизирующего излучения, как импульсного, так и непрерывного, на конструкционные материалы и режущий инструмент (РИ).

Важность этого вопроса обусловлена тем, что в настоящее время появляется много нового оборудования, которое работает в новом диапазоне технологических параметров: так, время действия импульсного лазера может быть уменьшено до единиц фемтосекунд, а плотность теплового потока – существенно увеличена для этих времён действия до $10^{14} \dots 10^{15}$ Вт/м². Всё это расширяет круг физических процессов, влияющих на эффективность образования наноструктур в объёме детали или РИ. В работе [10] показано, что вероятность получения наноструктур довольно высокая и при этом появляются новые возможности влияния на скорость образования наноструктур с помощью новых эффектов, таких, как скорость деформирования материала под действием термоупругих и термопластических эффектов; перемещение термоупругой волны, приводящее к увеличению энергии в зонах, где частота собственных колебаний близка или кратна частоте изменения термоупругой волны (резонанс); при кратности частоты собственных колебаний деталей или РИ, частоте лазера (резонанс). При действии переменных электрических и магнитных полей могут возникать колебания в материале детали или РИ, которые при кратности с частотой их собственных колебаний, т.е. при резонансе, могут существенно повлиять на возможность образования наноструктур в зонах, где амплитуды колебаний будут накладываться друг на друга. Действие колебаний ионизирующего излучения на фононный и электронный газ в атоме при кратности частот также может повлиять на возможность образования наноструктур за счёт резонансного действия на материал, а также непосредственного действия ионизирующего излучения на материал детали или РИ при кратности частот ионизирующего излучения и собственных колебаний материала детали или РИ.

Методы исследования

На основе квантово-механического подхода к описанию материала рассмотрены частотные характеристики его в зависимости от температуры, температурных напряжений, скорости роста температуры, первоначальной структуры материала и целого ряда различных воздействий на него. Представлена теоретическая задача, позволяющая уточнить физические характеристики воздействия на материал и оценить их влияние на возможность образования наноструктур.

Использован метод МКЕ для расчёта температур, температурных напряжений, скоростей их роста и сопоставление частот лазерного излучения с частотами фононного, электронного газов и с собственной частотой материала и РИ, а также с частотами колебаний ионной (атомной) решетки, причем решали совместную задачу теплопроводности и термоупругости.

Постановка задачи

Для определения всех необходимых параметров, таких как температура, температурные напряжения, скорости их роста при нагревании и снижения при остывании решена совместная задача теплопроводности и термоупругости, в которой была учтена энергия, затрачиваемая на образование зерна. Рассмотрены теплофизические и термомеханические характеристики материала при классическом подходе (экспериментальные значения) и с использованием расчетов на основе квантово-механического подхода к их определению. Используя квантово-механический подход, определяем первоначальное состояние электронного и фононного газов, состояние решетки и с изменением температур и температурных напряжений оцениваем волновые свойства, сопоставляем длину волны с длиной волны излучения и определяем возможность максимального усиления волны в зоне сжатия, что позволит оценить возможность образования наноструктур за счет волновых эффектов. На каждом этапе рассчитываем все рассматриваемые характеристики.

Результаты экспериментов и расчётов

Было проведено исследование возможных критериев образования наноструктур при действии ионизирующего (лазерного) излучения на материалы РИ и конструкций. На рис.1 показаны, на наш взгляд, основные критерии образования наноструктур.

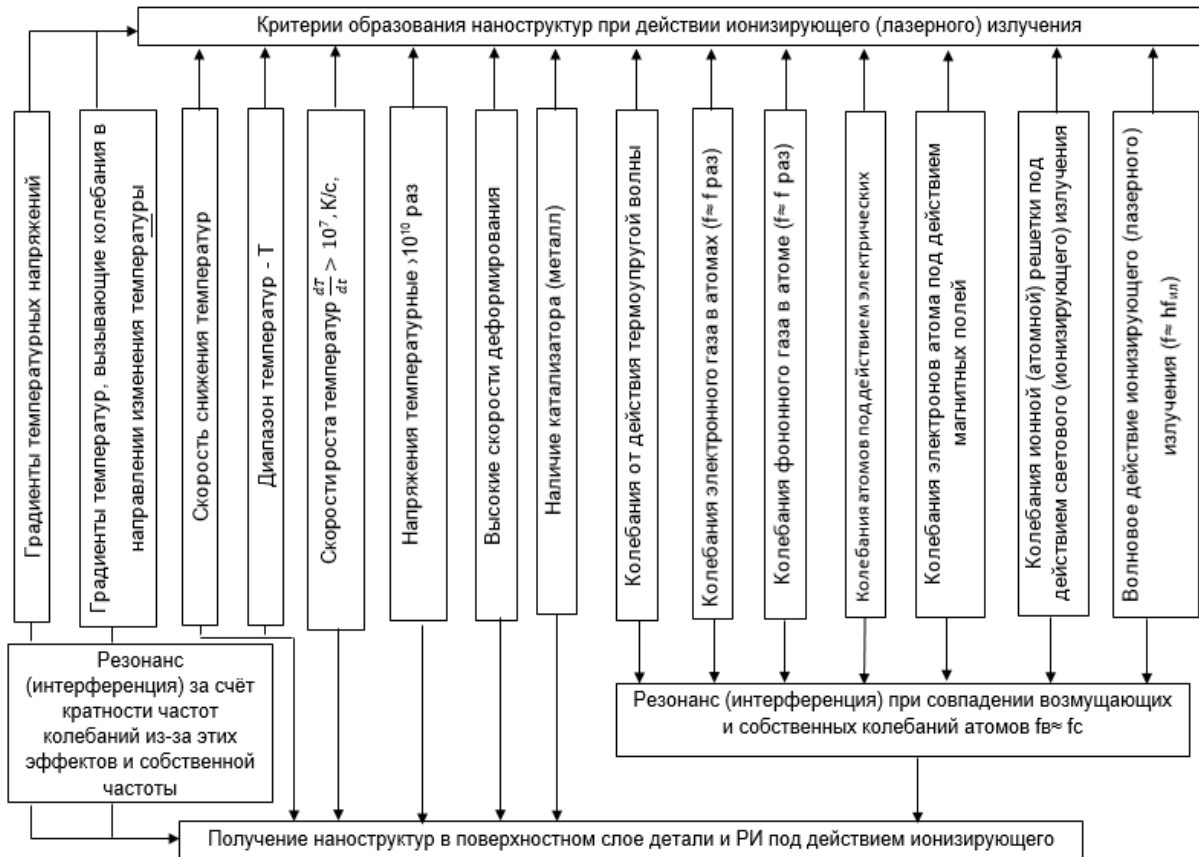


Рис. 1. Возможные критерии образования наноструктур и перспективы получения обобщенного критерия создания наноструктур

Эти критерии кроме уже использованных: диапазонов температур, скоростей роста температур, температурных напряжений и наличия катализатора учитывают скорость остывания, температурные напряжения (ранее рассматривали напряжения от внешних воздействий). Кроме того, исследовано влияние различных видов колебания на образование НС: колебания от действия термоупругой волны, колебания электронного газа атомов, колебания фононного газа в атомах, колебания атомов под действием электрических полей, колебания электронов атома под действием магнитных полей, колебания ионной решётки под действием светового (ионизирующего) излучения, волновое действие ионизирующего излучения на материал.

Очевидно, необходимо учитывать изменение градиентов температур и температурных напряжений, которые также будут создавать волны в обрабатываемом материале и влиять на скорость образования наноструктур при кратности длины волны лазерного излучения к различным типам колебаний, реализованными в материале за счет других рассмотренных физических процессов (рис. 1).

Результаты исследования зависимости максимальных температур при действии ЛИ на твердый сплав ВК6 от плотности теплового потока показаны на рис. 2 для времен его действия $t = 10^{-12}$ с и $t = 10^{-14}$ с.

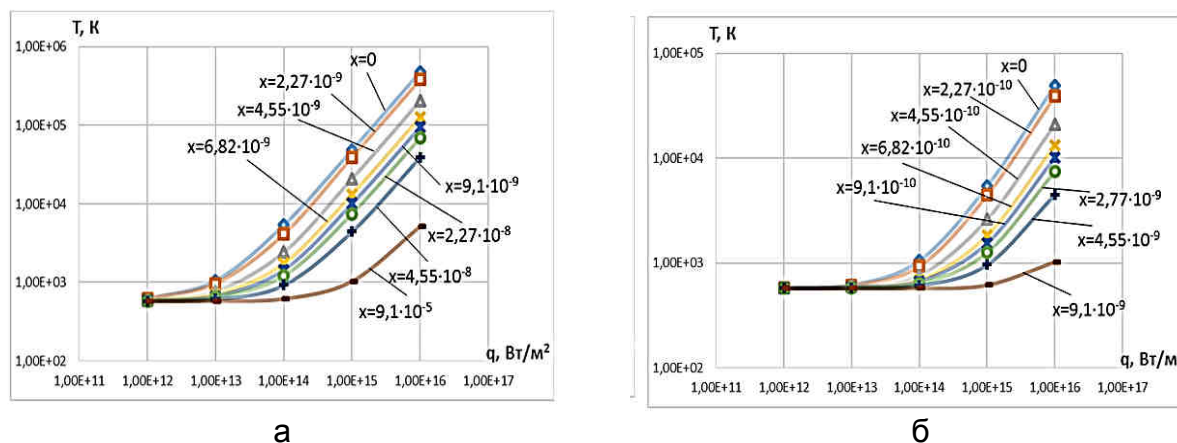


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на ВК6 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-12}$ с; б – $t=10^{-14}$ с

Видно, что для случая действия лазерного излучения на твердый сплав ВК6 есть довольно большая область плотностей теплового потока и времен его действия, при которых возможно получение наноструктур по критерию необходимого диапазона температур. Скорость роста температур практически для всех рассмотренных времен и величин теплового потока всегда превышает 10^7 К/с, следовательно и по этому критерию есть вероятность появления наноструктур (рис. 3, а, б).

Зависимости температурных напряжений от плотности теплового потока при времени его действия $t = 10^{-12}$ с и $t = 10^{-14}$ с показаны на рис. 4. Видно, что для фемтосекундного лазера есть возможность получения наноструктур за счет температурных напряжений.

С учетом рассмотренных критериев были получены зоны в материале, для которых есть возможность создания наноструктур и определен их объём, зависимость которого от плотности теплового потока и времени его действия показана на рис. 5.

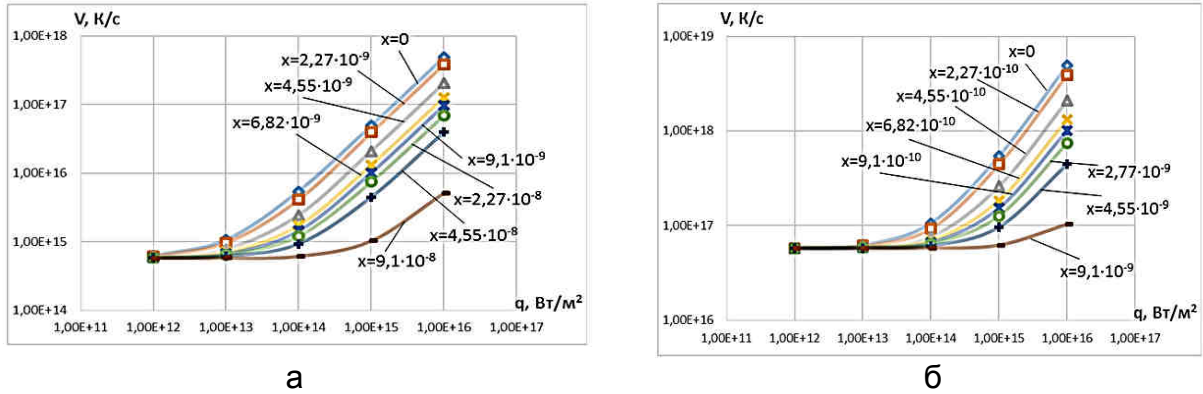


Рис. 3. Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на ВК6 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-12}$ с; б – $t=10^{-14}$ с

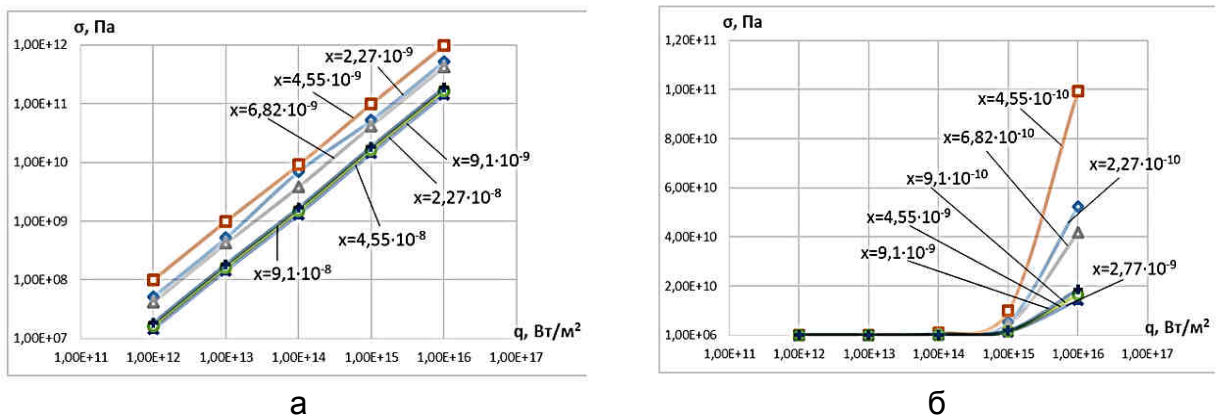


Рис. 4. Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на ВК6 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-12}$ с; б – $t=10^{-14}$ с

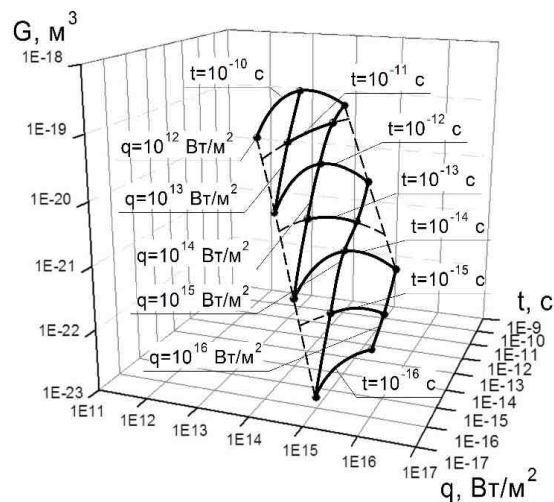


Рис. 5. Зависимость объема нанозерна от плотности теплового потока q и от времени его действия t для случая действия ИИ на твердый сплав ВК6

Видно, что для относительно небольшого диапазона параметров (плотности теплового потока и времени его действия) есть возможность получения наноструктур. По величине объёма наноструктуры можно определить размер зерна, а с учетом зависимостей физико-механических характеристик материалов и эксплу-

атационных характеристик деталей и режущего инструмента от размера зерна [1], –оценить физико-механические характеристики материала, работоспособность и эффективность применения деталей и РИ.

Этот подход позволяет оценить вероятность получения наноструктур, физико-механические характеристики, работоспособность и эффективность работы детали и РИ, но в то же время, как показывают эксперименты, можно получить наноструктуры даже в том случае, когда эти критерии не выполняются:

– если температурные напряжения достигают или превышают значение 10^{10} Па (во взаимно перпендикулярных направлениях);

– когда частота собственных колебаний в обрабатываемом материале будет кратна длине волны лазерного излучения, т. е. в этом случае будет возможность резонансного увеличения сжимающих напряжений в зоне, где условия близки критериям, описанным выше, но не достаточны, а резонансные явления обеспечат реализацию наноструктур, что было обнаружено профессором Леонардо Ораци, Университет Модены и Реджо Эмилии, Италия, при действии лазерного излучения в фемтосекундном диапазоне, когда появлялись наноструктуры на расстоянии, кратном нескольким длинам волн. Всё это свидетельствует о необходимости проверки величин частот колебаний и длин волн кратных частоте и длине волны излучения.

Выводы

1. Определены диапазоны технологических параметров фемто- и пикосекундных лазеров, необходимых для непосредственного получения наноструктур.

2. Показано, что есть возможность получения наноструктур при технологических параметрах ЛИ, несколько отличных от необходимых по трем основным критериям: необходимому диапазону температур, скорости роста температуры и температурным напряжениям под влиянием реализации резонансных явлений в результате кратности частот колебаний различной природы под действием резонанса, приводящего к усилению волны сжатия, а значит, увеличению скорости образования наноструктур.

3. Обнаружено, что реализуются наноструктуры на твердом сплаве ВК6 при действии фемто- и пикосекундных импульсов лазерного излучения с высокой плотностью теплового потока, что позволяет использовать этот технологический процесс для повышения работоспособности РИ.

Список литературы

1. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наноструктурными модифицированными слоями : моногр.-справ. : в 2 кн. [Текст] / 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. – 427 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. Наноструктуры и нанопокрытия: перспективы и реальность [Текст]: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк.

авиационно-технологический институт», 2009. – 406 с.

5. Костюк, Г. И. Эффективные покрытия и модифицированные упрочненные слои на режущих инструментах [Текст]: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 728 с.

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

7. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст]: в 2 кн. / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – 1030 с.

8. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.

9. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С. 50 – 56.

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

Поступила в редакцию 02.06.2016

Про критерії утворення наноструктур при дії іонізуючого випромінювання на конструкційні матеріали та різальний інструмент

На основі аналізу експериментальних даних розглянуто нові критерії утворення наноструктур. При отриманні наноструктур на твердому сплаві ВК6 проаналізовано такі критерії: діапазон і швидкість росту температур, максимальні температурні напруження. Отримані залежності об'єма нанозерна від густини теплового потоку для випадку дії фемто- і пікосекундного лазерів. Показано можливість посилення ефектів, пов'язаних з температурою і температурними напруженнями, під впливом різного роду коливань.

Ключові слова: фемто- і пікосекундний лазері, критерії утворення наноструктур, температури, швидкість зростання температури, температурні напруження.

Criteria for the Formation of Nanostructures with Ionizing Radiation on Construction Materials and Cutting Tools

Based on the experimental results discussed new criteria utvo-Rennes nanostructures. For example, to obtain solid alloy nanostructures VK6 analyzed the following criteria: temperature range, the rate of growth tempera-tour and maximum of temperature stress, as well as the volume received on-Northern depending on the density of heat flow in the case of action femto and picosecond lasers. The possibility of strengthening effects associated with temperature and temperature stresses due to different kinds of vibrations.

Keywords: femto- and picosecond lasers. criteria formation nanostructures, temperature, rate of temperature increase, temperature stress.

Костюк Геннадий Игоревич - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры Теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков, Украина.

Кантемир Ирина Владимировна - аспирант кафедры Теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков, Украина