

## **Теоретическое исследование действия ионизирующего излучения на конструкционные материалы и образование наноструктур в алюминиевом сплаве Д16Т**

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

Исследованы поля температур и скорости их нарастания в зоне действия ионизирующего излучения, которые позволяют оценить зону вероятного получения наноструктур, а следовательно, объем нанокластера и глубину его залегания в алюминиевом сплаве Д16Т.

**Ключевые слова:** ионизирующее излучение, наноструктуры, температуры, скорость нарастания температур, нанокластер, алюминиевый сплав.

### **Введение**

Широкое применение алюминиевых сплавов в авиационной технике, а также в современном машиностроении выдвигает на первый план задачи о высокоэффективной, надежной и длительной их работе, но относительно невысокие физико-механические характеристики алюминиевых сплавов зачастую не позволяют их использовать. Применение же наноструктурных слоев для упрочнения алюминиевых сплавов позволит существенно повысить их износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность и обеспечит их работоспособность при ударных нагрузках.

Всё это подтверждает тезис о том, что алюминиевые сплавы при малом удельном весе и высоких физико-механических характеристиках будут широко применяться не только в авиационно-космической технике, но и в машиностроении, где проблема веса изделий также существует, особенно для автомобильной и судостроительной промышленности.

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**

В настоящее время, несмотря на то, что исследованию наноструктур уделяют большое внимание, вопрос о получении наноструктур в алюминиевых сплавах практически не изучен как теоретически, так и экспериментально [1–

18]. Теоретические исследования тоже ограничены, исключение составляет работа [1], но и в ней для алюминиевых сплавов исследования не проводились. Так как эксперименты требуют значительных затрат, то необходимо определить технологические режимы, при которых можно получить наноструктуры, а затем уже проводить эксперименты с тем, чтобы проверить правильность теоретических предположений и выявить технологические параметры, при которых реализуются наноструктуры и субмикроструктуры. Всё это свидетельствует о важности и практической значимости теоретических исследований возможности получения наноструктур.

Целью работы является исследование полей температур и температурных напряжений в зоне действия ионизирующего излучения в связи с необходимостью прогнозирования технологических параметров для получения наноструктур и субмикроструктур и определения объема кластеров и размера зерна.

Лазерное излучение не исследовали как инструмент для получения наноструктур, поэтому такой подход к исследованию перспектив использования ионизирующего излучения для получения наноструктур (НС) и определения технологических параметров для реализации наноструктурных и субмикроструктурных слоев, так как не только наноструктуры, но и субмикроструктуры обладают повышенными физико-механическими характеристиками. Это свидетельствует о достаточно высокой значимости проводимых исследований.

### Материалы исследований

В работе проведено теоретическое исследование действия ионизирующего излучения на алюминиевый сплав Д16Т. Решали совместную задачу теплопроводности и термоупругости, что позволяло определить характер распределения температур и температурных напряжений в зоне действия ионизирующего излучения, по которым выявляли зоны, где возможна реализация наноструктур по следующим критериям: температуры лежат в пределах 500...1500 К, скорости их нарастания превышают  $10^7$  К/с и температурные напряжения (ускоряющие процесс образования НС) составляют величины  $10^7...10^9$  Па.

### Результаты расчетов и экспериментов

По характеру развития полей температур и температурных напряжений выбирали области в материале алюминиевого сплава, в которых реализуются критерии образования наноструктур: во-первых, обеспечение требуемого диапазона температур (для этого объема также проверяется скорость нарастания температуры, которая должна превышать  $10^7$  К/с) и желательный диапазон температурных напряжений  $10^7...10^9$  Па.

В результате расчетов были получены поля температур на различных глубинах:  $X = 0$  (рис. 1, а),  $X = 0,5 \sqrt{at}$  (рис. 1, б),  $X = \sqrt{at}$  (рис. 1, в),  $X = 2 \sqrt{at}$  (рис. 1, г). Видно, что с увеличением глубины температуры снижаются с 2550 до 630 К, но значения температур на поверхности в этом случае несколько выше, чем необходимые для получения наноструктур. На больших глубинах эти температуры понижаются, и там могут реализоваться наноструктуры.

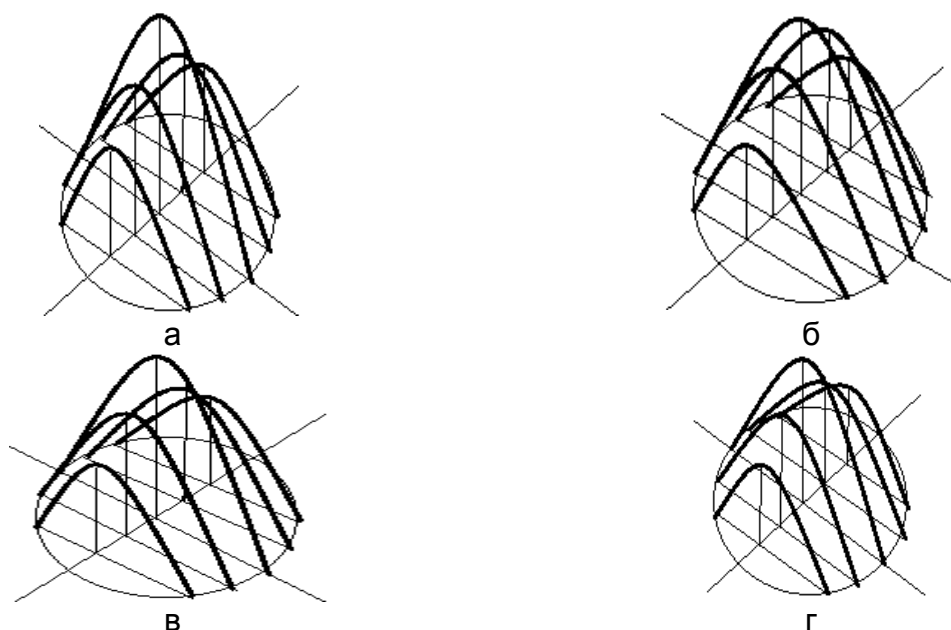


Рис. 1. Распределение температур на поверхностях а –  $x = 0$ ;  $T_{\max} = 2550$  К; б –  $0,5\sqrt{at}$ ;  $T_{\max} = 2230$  К; в –  $\sqrt{at}$ ;  $T_{\max} = 1960$  К; г –  $2\sqrt{at}$ ;  $T_{\max} = 1630$  К при действии лазерного излучения плотностью теплового потока  $q = 10^6$  (r пятна равен 2 мм) на алюминиевый сплав Д16Т

Для случая действия теплового потока  $q = 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> максимальная температура снизилась до значений 2050 К, а на глубине  $2\sqrt{at}$  она составляет 630 К. В этом случае уже с глубин  $0,5\sqrt{at}$  до  $2\sqrt{at}$  реализуются наноструктуры. Оценка скорости нарастания температуры показывает, что она в этом случае превышает  $10^7$  К/с (рис. 2 а, б, в, г).

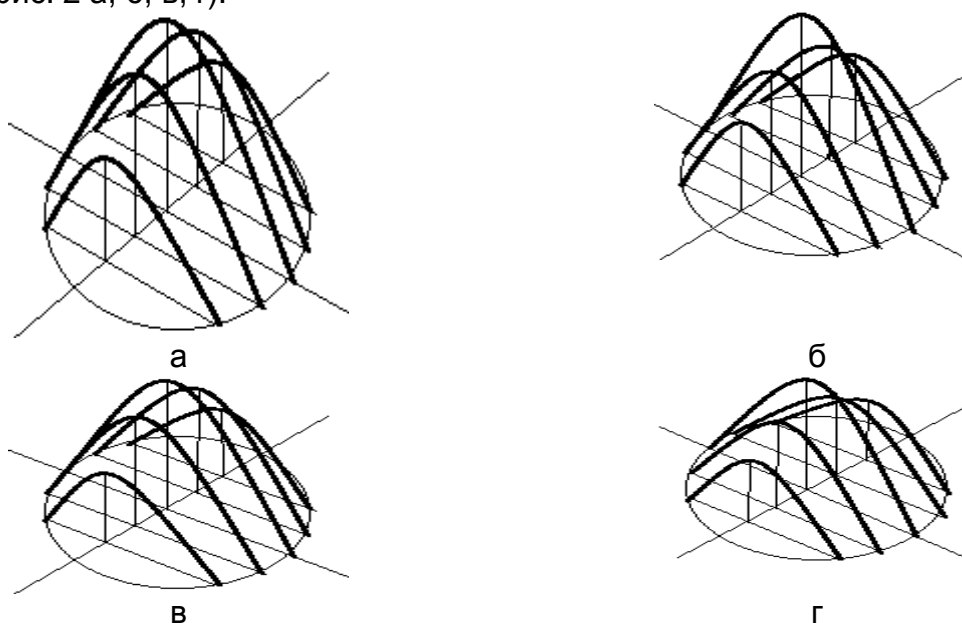


Рис. 2. Распределение температур на поверхностях а –  $x = 0$ ;  $T_{\max} = 2050$  К; б –  $0,5\sqrt{at}$ ;  $T_{\max} = 1780$  К; в –  $\sqrt{at}$ ;  $T_{\max} = 1340$  К; г –  $2\sqrt{at}$ ;  $T_{\max} = 1630$  К при действии лазерного излучения плотностью теплового потока  $q = 10^5$  (r пятна равен 2 мм) на алюминиевый сплав Д16Т

По выбранному диапазону температур были определены зоны, где реали-

зуются наноструктуры и оценен их объем. Так, зависимость объема кластера от плотности теплового потока и времени его действия для случая действия теплового потока в исследуемом диапазоне от  $10^8$  до  $10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup> и времени его действия в диапазоне от  $10^{-9}$  до  $10^{-3}$  с показаны на рис. 3.

Приведены поверхности, на которых реализуются наноструктуры по объему нанокластера. Видно, что при плотностях теплового потока порядка  $10^8$  и более чем  $10^{11}$  наноструктуры не реализуются, а для времен действия  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  и  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  с для всех плотностей теплового потока также реализация наноструктур маловероятна. Исследовано также влияние размера пятна, в котором реализуется ионизирующее излучение на возможность образования наноструктур. Исследование для больших размеров пятна от  $3 \cdot 10^3$  до  $10^{-3}$  м показало, что наноструктуры практически не реализуются, тогда как снижение размера пятна до  $10^{-4}$  м приводит к возможности реализации наноструктуры.

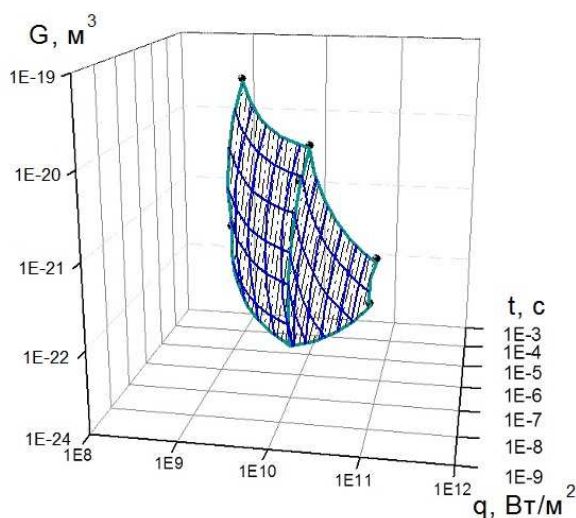


Рис. 3. Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока ионизирующего излучения  $q$  и времени его действия  $t$  в зоне, где образуются наноструктуры ( $R = 10^{-4}$  м) на алюминиевых сплавах

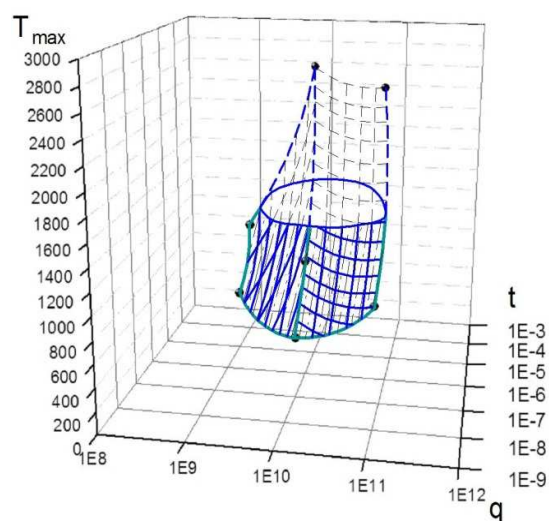


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры от плотности теплового потока ионизирующего излучения  $q$  и времени его действия  $t$  в зоне, где образуются наноструктуры на алюминиевых сплавах

Для экспресс-оценки возможности получения наноструктуры можно использовать зависимости максимальной температуры в зоне облучения от плотности теплового потока и времени его действия (рис. 4), где показаны максимальные температуры, которые могут быть реализованы в этих условиях. Тогда, проведя секущие плоскости по  $T_{\max} = 500$  К и  $T_{\max} = 1500$  К, можно также оценить технологические параметры, при которых следует ожидать появления наноструктур. Область, ограниченная этими секущими и полученными поверхностями, дает технологические параметры, где образуются наноструктуры.

Проведенные исследования позволяют оценить объем нанокластеров, реализующихся при действии ионизирующего излучения, по которому, очевидно, можно найти размер зерна, а значит, и спрогнозировать физико-механические характеристики поверхностного слоя алюминиевого сплава Д16Т.

### **Выводы**

1. Получены распределения температур на различных глубинах в зоне облучения, которые позволяют найти области, где выполняются критерии образования наноструктур по диапазону температур, скорости роста температуры.

2. Исследование объема кластера дает возможность найти его размеры в зависимости от технологических параметров обработки: плотности теплового потока излучения и времени его действия, что в дальнейшем позволит оценить размер кластера и решить, какое зерно реализуется: нано- или субмикроструктурное.

3. Полученные зависимости максимальной температуры от плотности теплового потока и времени его действия дают возможность оценить область технологических параметров, в которых следует ожидать появления наноструктур, что позволяет упростить выбор технологических параметров для реализации наноструктурных слоев.

4. Получив размеры кластеров, можно определить размер зерна, а значит, и прогнозировать физико-механические характеристики поверхностного слоя на алюминиевом сплаве.

### **Список литературы**

1. 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.

2. 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.

3. 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.

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. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с.

9. 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.

10. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
11. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
12. Хаякава, С. Ядерно-физический аспект: в 2 кн. [Текст] / С. Хаякава. – М.: Мир, 1973. – Кн. 2. – 701 с.
13. Готт, Ю. В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях [Текст] / Ю. В. Готт. – М.: Атомиздат, 1978. – 271 с.
14. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А. И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.
15. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
16. Решетняк, Е. Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А. И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130.
17. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.
18. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала [Текст] / А. А Гончаров, П. И. Игнатенко, В. В. Петухов и др. // ЖТФ. –2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 82 – 87.

Поступила в редакцию 12.05.2015

### **Теоретичне дослідження дії іонізуючого випромінювання на конструкційні матеріали і утворення наноструктур в алюмінієвому сплаві D16T**

Досліджено поля температур і швидкості їх зростання в зоні дії іонізуючого випромінювання, які дозволяють оцінити зону ймовірного отримання наноструктур, а отже, обсяг нанокластера і глибину його залягання в алюмінієвому сплаві D16T.

**Ключові слова:** іонізуюче випромінювання, наноструктури, температури, швидкість зростання температур, нанокластер, алюмінієвий сплав.

### **Theoretical study of the effects of ionizing radiation, of structural materials and the formation of nanostructured tour in the aluminum alloy D16T**

We study the field of temperature and pick up speed of temperature in the area of ionizing radiation, which allows to evaluate the probability of obtaining the area of nanostructures, and hence, the volume of the nanocluster and its depth in the aluminum alloy D16T.

**Keywords:** ionizing radiation, nanostructures, temperature, pick up speed of temperature, nanocluster, aluminum alloy.