

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»
Национальный авиационный университет, г. Киев*

На основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости в зоне действия лазерного излучения исследованы поля температур, температурных напряжений, скоростей роста температуры и с учетом критериев образования наноструктур определены эффективные технологические параметры для получения наноструктур. По объемам наноструктур определены размеры зерна, что позволило оценить эффективные технологические параметры, необходимые для получения наноструктур. Показано, что полученные наноструктуры могут существенно повысить физико-механические характеристики инструментальной стали У12, что позволит использовать её вместо быстрорежущих сталей.

Ключевые слова: эффективность получения наноструктур, поля температур, температурные напряжения, скорость роста температуры, размер зерна, объем зерна.

Введение

Во всём мире большое количество лазерных установок не находят эффективного применения, так как появляются более совершенные, к использованию которых стремятся производители, а использование этих установок для получения наноструктур (НС) может дать им вторую жизнь. Наноструктуры могут существенно увеличить износостойкость за счет повышения микротвердости поверхностного слоя. Повышение предела текучести увеличит возможность воспринимать большие изгибные нагрузки, а образование слоя с остаточными сжимающими напряжениями может повысить усталостную прочность. Применение наноструктур снижает модуль упругости, что позволяет работать материалу с высокими относительными перемещениями, причем снятие нагрузки не даст изменения ни размерам, ни свойствам материала.

Всё это свидетельствует о возможности использования результатов данного исследования в машиностроении.

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

Несмотря на литературный бум в области нанотехнологии [1–11], работ по исследованию вопроса получения наноструктур с помощью использования лазерного излучения (ЛИ) практически нет. Всё это свидетельствует о необходимости проведения исследований как теоретического, так и экспериментального плана.

Будет проведено теоретическое исследование на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости, а также с учетом энергии кристаллизации НС. Очевидно, необходимо определять теплофизические и термомеханические характеристики материала как стохастическим, так и квантово-механическим методом.

Всё это позволит существенно приблизить физическую и расчетную картины процессов при действии лазерного излучения, а следовательно, повысит точность расчета технологических параметров лазера для получения НС, что, в свою очередь, свидетельствует об актуальности, важности и своевременности проводимого исследования.

Теоретическая модель и постановка задачи исследования

Методом двойной прогонки решали совместную задачу теплопроводности и термоупругости, причем на первом полушаге рассчитывали температуры, далее по этим температурам определяли температурные напряжения, а следовательно, и энергию деформирования, с учётом которой определяли температуру в конце первого шага. На каждом шаге процедуру повторяли. В результате решения этой задачи получены поля температур, температурные напряжения и скорости роста температуры; с учетом их значений и критериев образования наноструктур оценивали область детали, где образуются НС, а значит, определяли объём наноструктуры, по которому оценивали размер зерна.

Результаты расчетов и их обсуждение

На основе исследования температурных полей построены зависимости максимальной температуры от плотности теплового потока ($10^8 \dots 10^{11}$ Вт/м²) и при действии лазерного излучения (рис. 1) за время: а – $t=10^{-4}$ с; б – $t=10^{-5}$ с; в – $t=10^{-6}$ с; г – $t=10^{-7}$ с; д – $t=10^{-8}$ с; е – $t=10^{-9}$ с; ж – $t=10^{-10}$ с.

Видно, что при больших временах действия 10^{-4} , 10^{-5} с существует довольно широкая область плотностей тепловых потоков, для которых есть возможность реализации наноструктур на разных глубинах (рис. 1, а, б), тогда как со снижением времени действия до 10^{-6} , 10^{-7} с эта область перемещается в сторону больших тепловых потоков 10^{10} , 10^{11} Вт/м². Дальнейшее снижение времени действия приводит к тому, что практически только при действии ЛИ с плотностью теплового потока 10^{11} Вт/м² есть невысокая вероятность получения НС, и то только на небольшой глубине вблизи поверхности.

Для оценки возможности получения НС под влиянием скорости роста температуры было проведено исследование влияния теплового потока ($10^8 \dots 10^{11}$ Вт/м²) при времени $10^{-10} \dots 10^{-4}$ с, результаты которого показаны на рис. 2. Анализ результатов свидетельствует о том, что практически для всех исследованных режимов этот критерий выполняется, так как скорость роста температуры превышает 10^7 К/с (рис. 2).

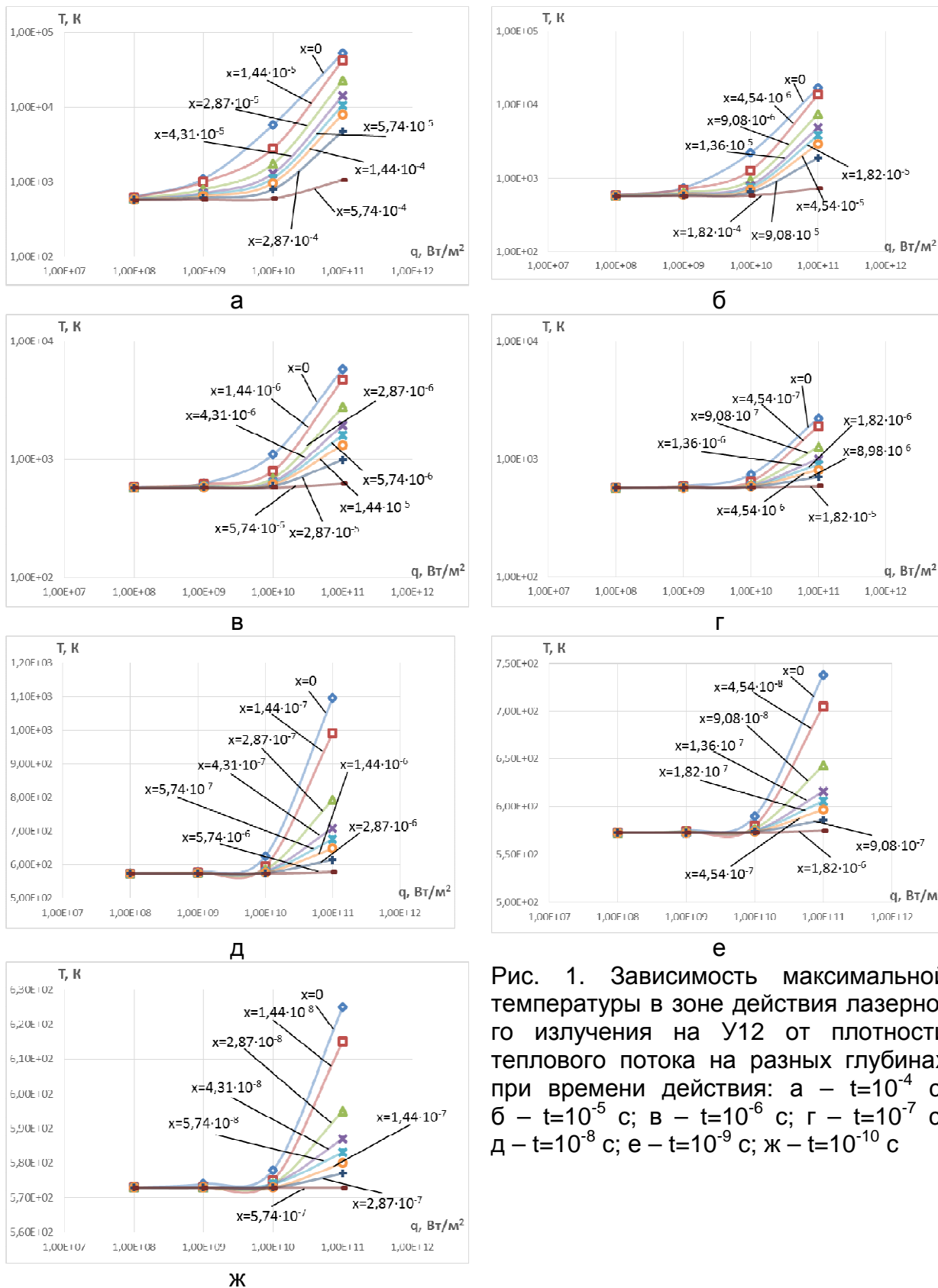


Рис. 1. Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на У12 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-4}$ с; б – $t=10^{-5}$ с; в – $t=10^{-6}$ с; г – $t=10^{-7}$ с; д – $t=10^{-8}$ с; е – $t=10^{-9}$ с; ж – $t=10^{-10}$ с

Так как температурные напряжения могут ускорять образование наноструктур при $10^7...10^9$ Па и даже могут непосредственно образовывать наноструктуры

(более 10^{10} Па), то были рассчитаны максимальные температурные напряжения, которые могут действовать в зоне облучения.

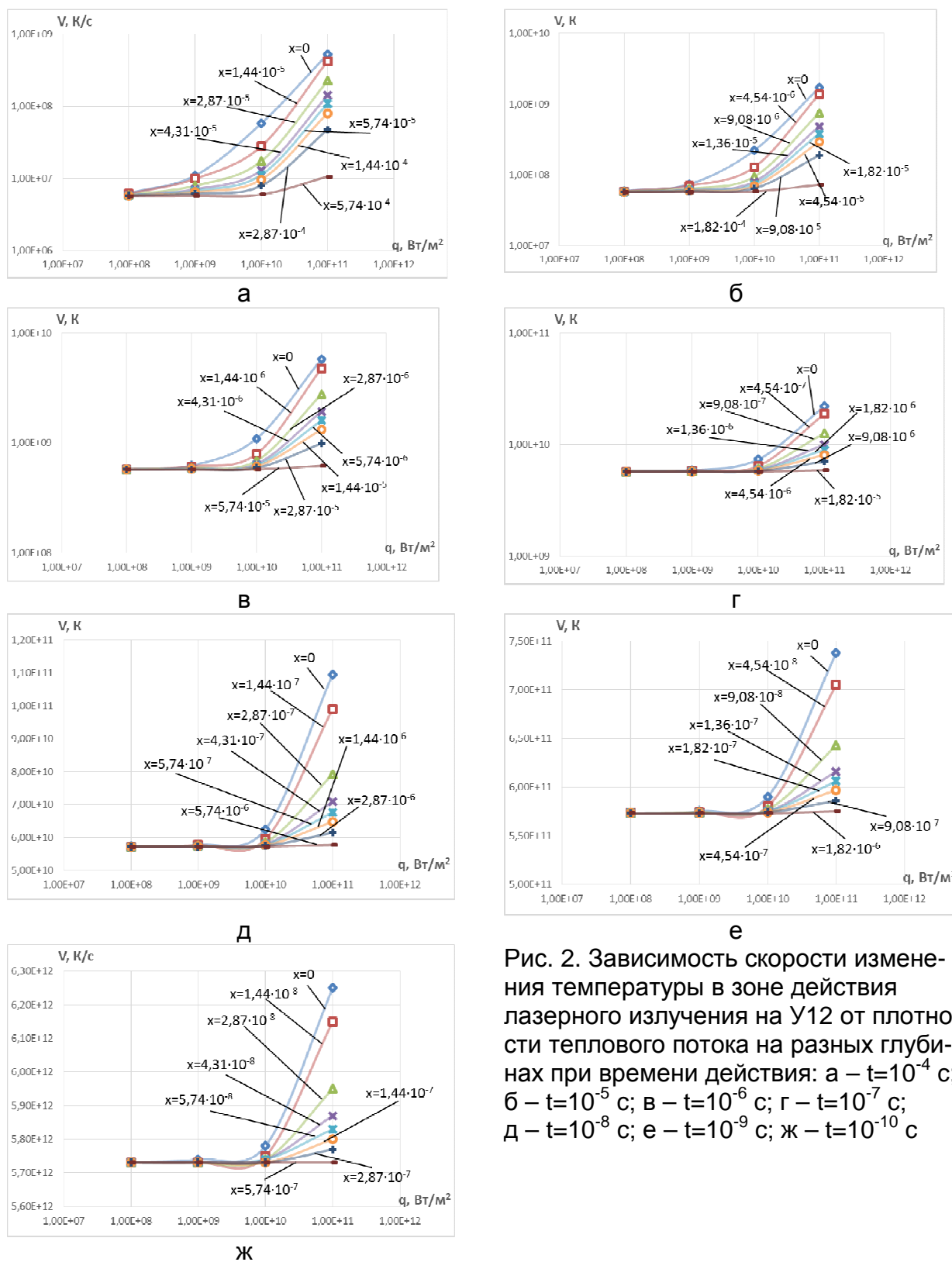
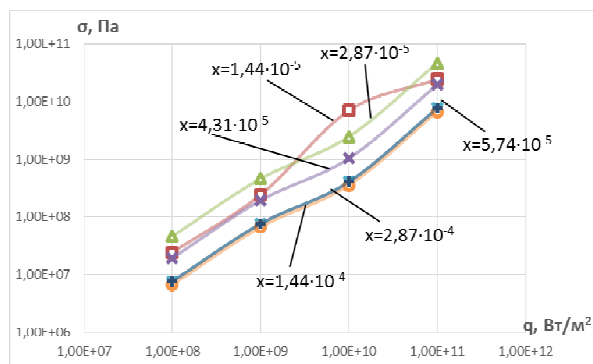


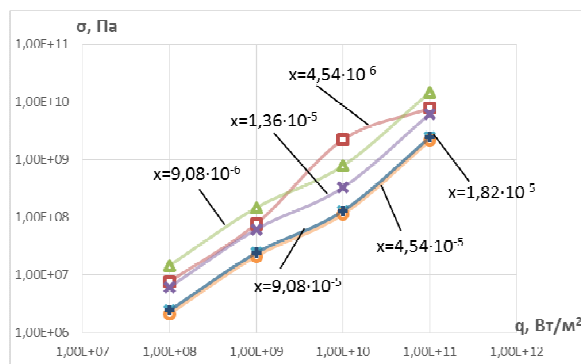
Рис. 2. Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на У12 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-4}$ с; б – $t=10^{-5}$ с; в – $t=10^{-6}$ с; г – $t=10^{-7}$ с; д – $t=10^{-8}$ с; е – $t=10^{-9}$ с; ж – $t=10^{-10}$ с

Исследованы зависимости температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на инструментальную сталь У12 от плотности теплового потока на разных глубинах (рис. 3) при времени действия: а – $t=10^{-4}$ с; б – $t=10^{-5}$ с; в – $t=10^{-6}$ с; г – $t=10^{-7}$ с; д – $t=10^{-8}$ с; е – $t=10^{-9}$ с; ж – $t=10^{-10}$ с. Видно, что при больших временах действия ЛИ 10^{-4} , 10^{-5} с есть режимы при тепловых потоках 10^{10} и, тем более, 10^{11} Вт/м², когда возможно получение НС под влиянием действия температурных напряжений. В остальных режимах и на больших глубинах есть возможность ускорить образование НС за счет температурных напряжений и других критериев.

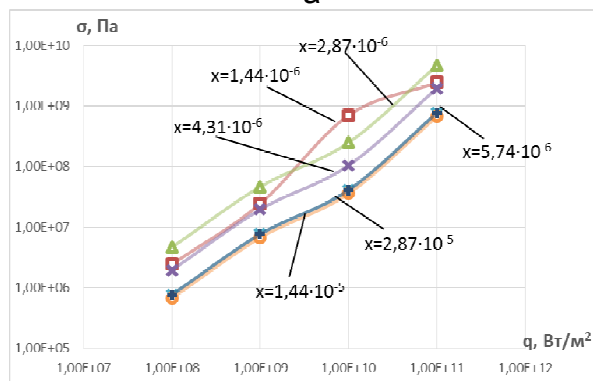
Снижение времени действия ЛИ приводит к тому, что при временах $10^{-6} \dots 10^{-8}$ с есть реальная возможность образования НС под действием температурных напряжений (рис. 3, в, г, д). В то же время при времени действия 10^{-9} , 10^{-10} с практически только на поверхности и то при действии теплового потока 10^{11} Вт/м², есть возможность ускорения образования НС. В остальных режимах температурные напряжения не приводят к росту скорости образования НС.



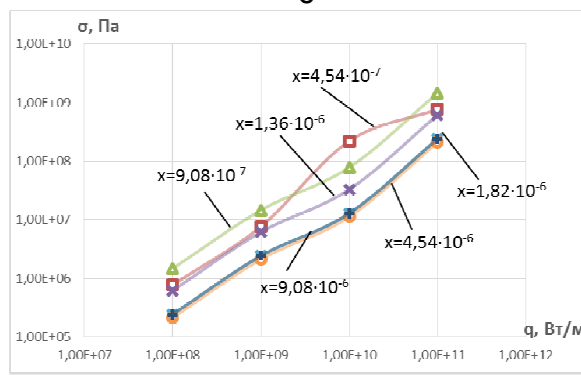
а



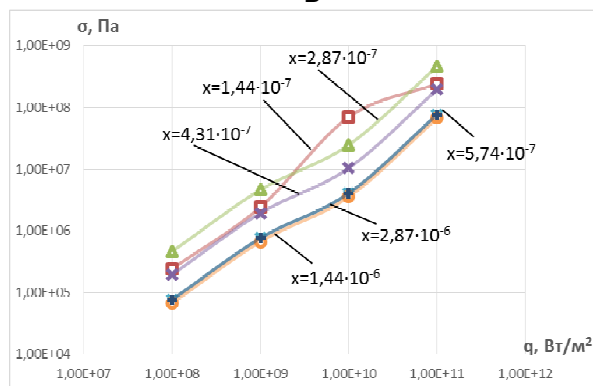
б



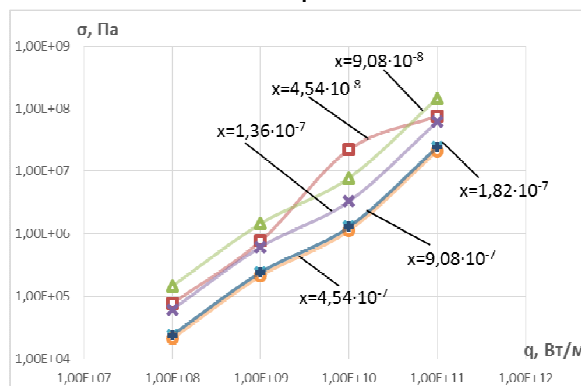
в



г



д



е

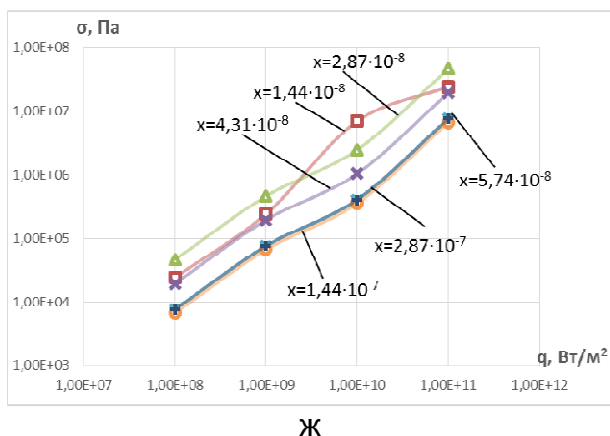


Рис. 3. Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на У12 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-4}$ с; б – $t=10^{-5}$ с; в – $t=10^{-6}$ с; г – $t=10^{-7}$ с; д – $t=10^{-8}$ с; е – $t=10^{-9}$ с; ж – $t=10^{-10}$ с

Для решения вопроса о выборе технологических параметров для получения НС были построены зависимости объёма нанокластера от минимальной (а) и максимальной (б) глубины его залегания при действии ЛИ с различной плотностью теплового потока на У12 при радиусе пятна 10^{-6} м (рис. 4) и радиусе $5 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 5). Видно, что есть наиболее реальная возможность получения НС при радиусе пятна $5 \cdot 10^{-7}$ м.

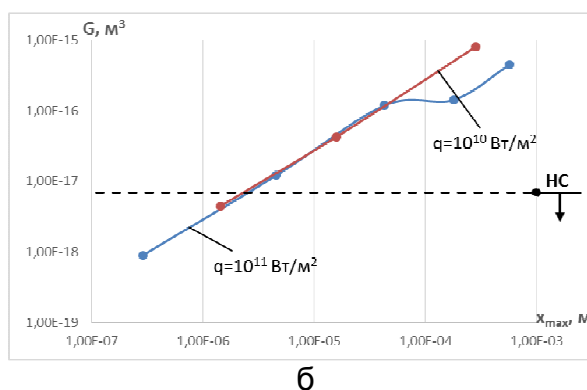
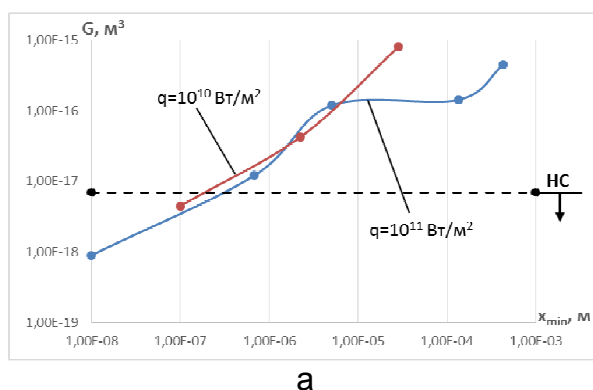


Рис. 4. Зависимость объёма нанокластера $R=10^{-6}$ м от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q

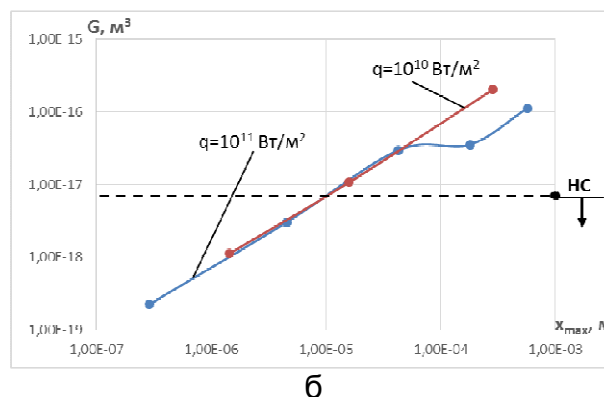
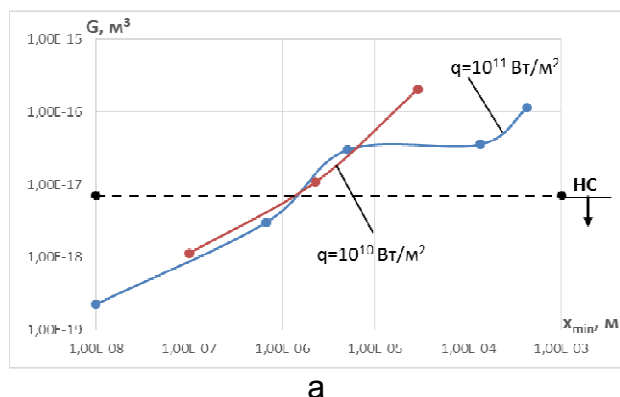


Рис. 5. Зависимость объёма нанокластера $R=5 \cdot 10^{-7}$ м от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q

Для экспресс-оценки возможности получения наноструктур были построены зависимости объёма нанокластера от плотности теплового потока ЛИ и времени его действия, где представлены зоны технологических параметров, при которых получаются НС для радиуса пятна 10^{-6} м (рис. 6) и радиуса $5 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 7). Видно, что эти зоны относительно невелики, а значит, и выбор технологических параметров осложняется тем, что при нестабильности технологических параметров есть возможность получения вместо наноструктур субмикро- и микроструктур. Всё это свидетельствует о том, что необходимо иметь лазеры с улучшенными технологическими параметрами для увеличения зоны технологических параметров, в которой реальна возможность получать наноструктуры.

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

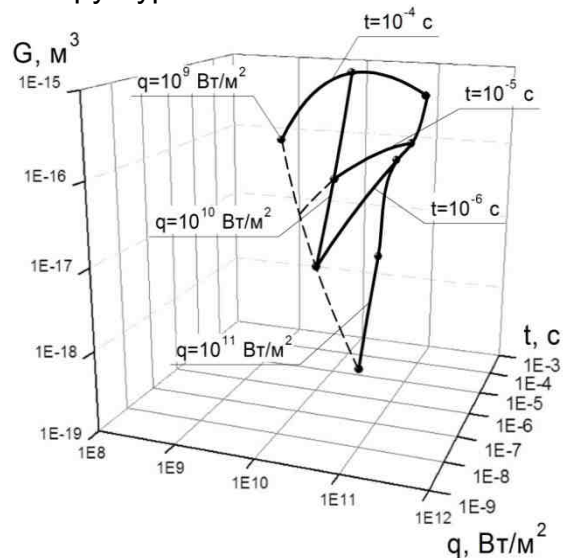
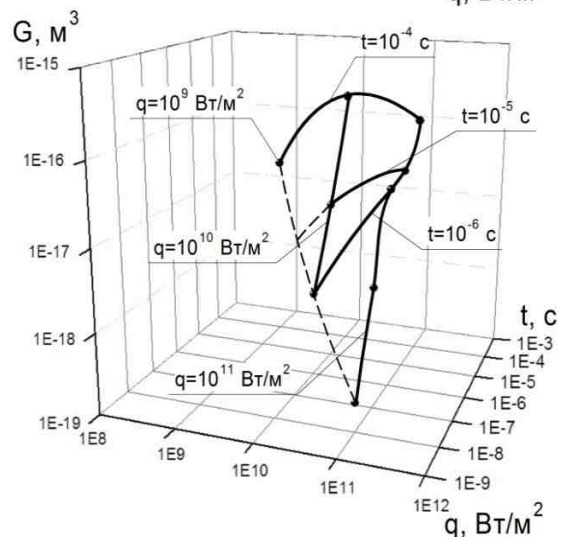


Рис. 7. Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения – q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=5 \cdot 10^{-7}$ м)



Выводы

1. Исследование температур в зоне действия излучения и температурных напряжений показало, что есть такие технологические параметры, при которых можно получить НС путем реализации требуемого диапазона температур (500...1500 К) или в случае превышения температурных напряжений над 1010 Па.

По скорости роста температуры при исследованных параметрах ЛИ этот критерий достигается автоматически.

2. Показано, что применение пространственных картин зависимости объема нанокластера от плотности теплового потока и времени его действия может позволить найти технологические параметры, при которых есть вероятность получения наноструктур.

Список литературы

1. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наноструктурными модифицированными слоями: Монограф.-справ.: 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. Наноструктуры и нанопокрытия: перспективы и реальность [Текст]: учеб.пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. 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.
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. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АІНУ, 2003. – 412 с.
8. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
9. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
10. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
11. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский// Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.

Поступила в редакцию 29.11.2016

Ефективність отримання наноструктур на інструментальній сталі У12 за рахунок дії лазерного випромінювання

На основі рішення спільної задачі теплопровідності та термопружності в зоні дії лазерного випромінювання досліджені поля температур, температурних напружень, швидкостей росту температури і, з урахуванням критеріїв утворення наноструктур, визначено ефективні технологічні параметри для отримання наноструктур. За об'ємами наноструктур визначені розміри зерна, що дозволило оцінити ефективні технологічні параметри, необхідні для отримання наноструктур. Показано, що отримані наноструктури можуть істотно підвищити фізико-механічні характеристики інструментальної сталі У12, що дозволить використовувати її замість швидкорізальних сталей.

Ключові слова: ефективність отримання наноструктур, поля температур, температурні напруження, швидкість зростання температури, розмір зерна, обсяг зерна.

Efficient Production of Nanostructures on the Tool Steel Y12 due to the Action of Laser Radiation

Based on the decision of joint problem of heat conduction and thermoelasticity in laser action zone investigated temperature field, thermal stress, temperature and growth rates, taking into account the criteria of formation of nanostructures defined effective technological options for nanostructures. On volumes of nanostructures defined grain sizes, which allowed us to estimate the effective process parameters required to produce nanostructures. It is shown that the resulting nanostructures can significantly improve the physical and mechanical properties of tool steel U12, which will use it instead of the high-speed steels.

Keywords: efficiency of production of nanostructures, temperature field, thermal stress, temperature, growth rate, grain size, the volume of grain.

Сведения об авторах

Костюк Геннадий Игоревич – профессор, доктор техн. наук, профессор кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.

Евсеенкова Анна Владимировна – студентка 4 курса Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.

Брюка Ольга Олеговна – доцент, канд. техн. наук, зав. отделом довузовской подготовки Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина.