

Выбор технологических параметров лазера для получения наноструктур на инструментальной стали У8

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина
Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, Украина*

На основе исследования полей температур, температурных напряжений, скорости изменения температур получены технологические параметры лазеров, при которых возможно получение наноструктур из инструментальной стали У8. В качестве критериев образования наноструктур были выбраны требуемый диапазон температур, скорости роста температуры больше, чем 10^7 К/с, а также оценены температурные напряжения, которые в диапазоне значений $10^7 \dots 10^9$ Па, могут существенно ускорять образование НС, а при напряжениях, больших 10^{10} Па, могут непосредственно приводить к образованию НС.

Ключевые слова: напряжённое состояние, температуры, температурные напряжения, режущий инструмент, лазер, наноструктуры.

Введение

В настоящее время в Украине имеется значительное количество лазерных установок, которые не используются, а если и используются, то очень незначительное время. Поэтому есть большие перспективы применять эти установки для создания наноструктурных слоев на деталях и режущем инструменте (РИ). РИ из стали У8 в настоящее время практически не используется из-за невысоких эксплуатационных характеристик этих инструментов, при создании же на их поверхности наноструктурных слоёв существует большая вероятность повышения их работоспособности и эффективности за счёт уникальных свойств наноструктур (НС). В наноструктурном слое существенно повышается твёрдость, а значит, повысится износостойкость РИ. Создание наноструктурных слоёв с разным размером зерна по глубине может обеспечить организацию слоя со сжимающими остаточными напряжениями, что приведёт к увеличению усталостной прочности, а снижение модуля упругости в наноструктурном слое обеспечит высокую сопротивляемость ударным нагрузкам. Всё это свидетельствует о своевременности такого исследования, которое, очевидно, будет иметь практическое применение.

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 то, что в современной научной литературе есть значительное число монографий и оригинальных работ, посвящённых НС [1–11], теоретических и экспериментальных работ по исследованию получения НС при действии лазерного излучения (ЛИ) практически нет. Подход к теоретическому описанию процессов в зоне действия лазерного излучения должен соединять в себе описание характера теплового воздействия ЛИ на материал (т.е. описание лазера как теплового источника), учитывать теплофизические и термомеханические процессы в зоне действия лазера и энергию, затрачиваемую на кристаллизацию при образовании НС. Кроме того, в дальнейшем необходимо будет рассматривать теплофизические и термомеханические характеристики, полученные стохастическим и рассчитанные квантово-механическим методами.

Всё это позволит получить приближение физической картины к расчётной и даст возможность с большей точностью определить технологические параметры лазера для получения НС, что свидетельствует об актуальности, своевременности и важности проводимого исследования.

Теоретическая модель и постановка задачи исследования

Решали совместную задачу теплопроводности и термоупругости, в которой учитывали энергию образования НС. Рассчитывали поля температур в зоне действия ЛИ (первый полушаг расчёта), по этим значениям температур определяли температурные напряжения, с учётом которых корректировали температуру, а следовательно, и энергию на деформирование. Находили области материала детали или РИ, где выполняют критерии для образования НС, что и позволило определить объем НС в зависимости от технологических параметров, а следовательно, вычленили объём, в котором реализовались НС.

Результаты расчёта и их обсуждения

Проведено исследование изменения максимальной температуры на разных глубинах, скорости изменения максимальной температуры и температурные напряжения от плотности теплового потока, создаваемого лазерным излучением (ЛИ) $q=10^8 \dots 10^{11}$ Вт/м² при разных временах его действия. Кроме того, рассмотрены зависимости температуры, скорости изменения максимальной температуры и температурных напряжений от времени действия теплового потока для разных плотностей теплового потока ($q=10^8 \dots 10^{11}$ Вт/м²). Так, на рис. 1 показана зависимость максимальной температуры в зоне действия ЛИ на инструментальную сталь У8 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени его 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.

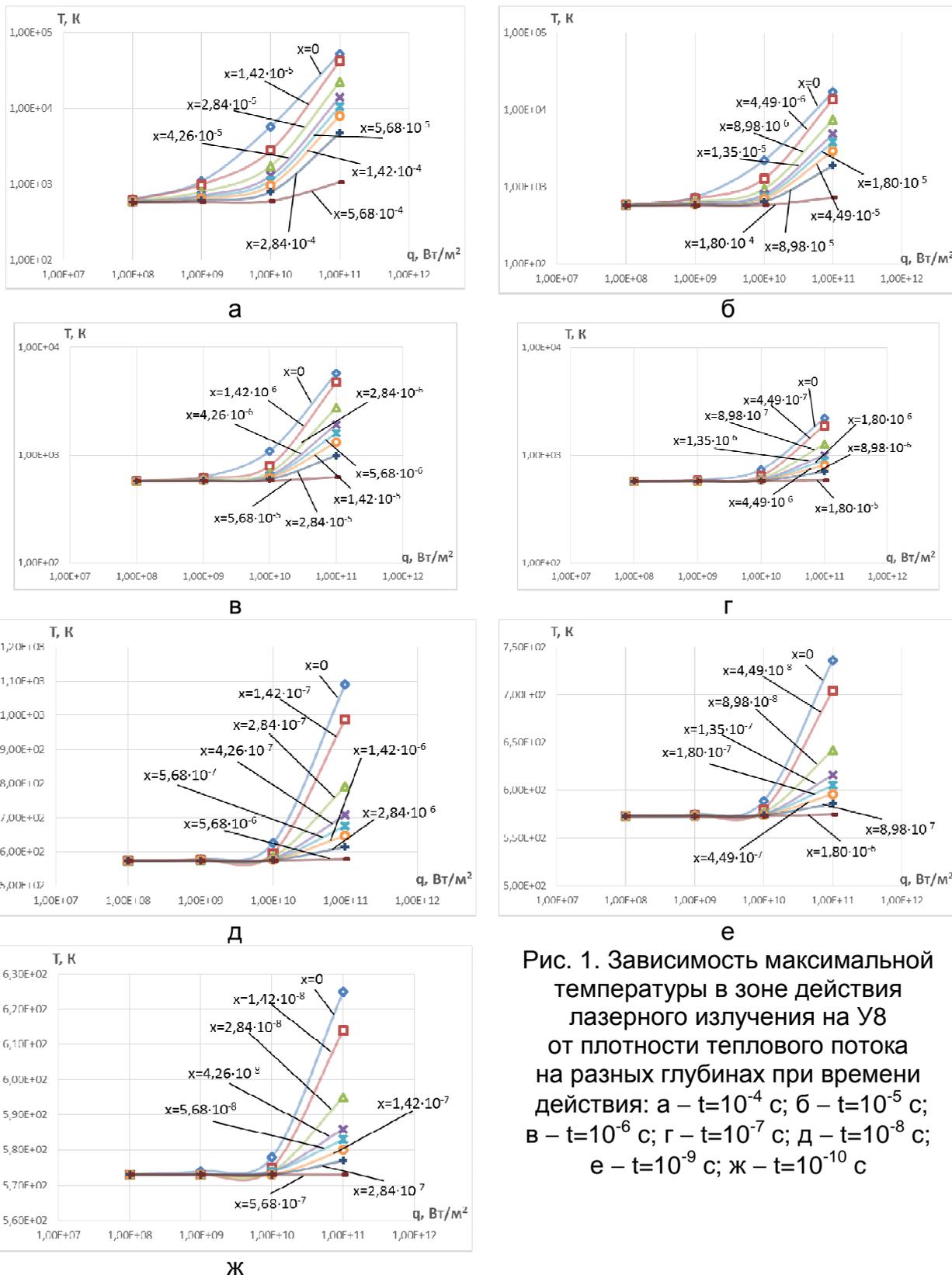
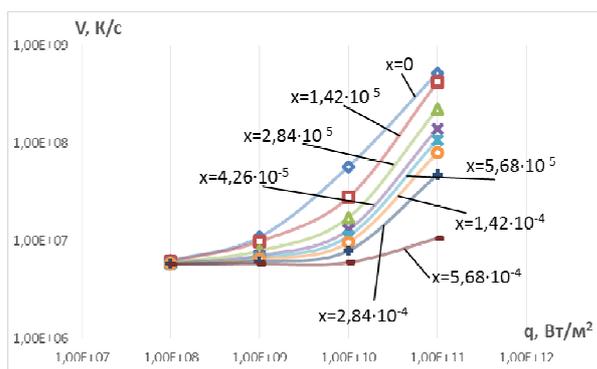


Рис. 1. Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на У8 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-4}$ с; б – $t=10^{-5}$ с; в – $t=10^{-6}$ с; г – $t=10^{-7}$ с; д – $t=10^{-8}$ с; е – $t=10^{-9}$ с; ж – $t=10^{-10}$ с

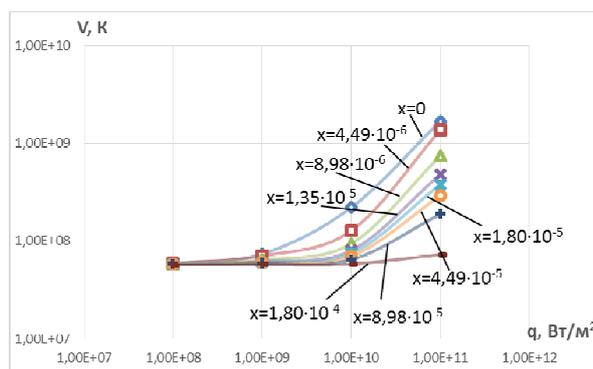
Видно, что при большом времени действия теплового потока практически для всех плотностей теплового потока есть зоны, где реализуется необходимый диапазон температур ($t=10^{-6}$... 10^{-4} с), уже при 10^{-7} с эти температуры реализуются

только для плотности теплового потока $q=10^{10} \dots 10^{11}$ Вт/м². С дальнейшим уменьшением времени действия критерий получения НС по температуре реализуется в основном при плотности теплового потока 10^{11} Вт/м², причём с уменьшением времени зона НС перемещается всё ближе к поверхности, и при 10^{10} Вт/м² возможна её реализация только вблизи поверхности (рис. 1).

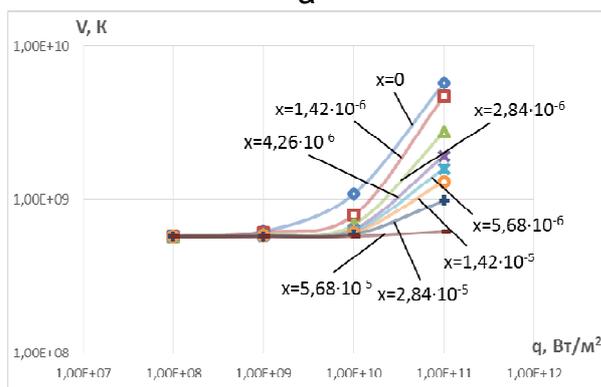
Исследование зависимости скорости изменения максимальной температуры на У8 от плотности теплового потока на разных глубинах показало, что при всех временах его действия реализуются скорости изменения температуры больше 10^7 К/с, что свидетельствует о том, что по этому критерию образование НС возможно во всём диапазоне плотностей теплового потока, времён его действия и на всех исследованных глубинах (рис. 2).



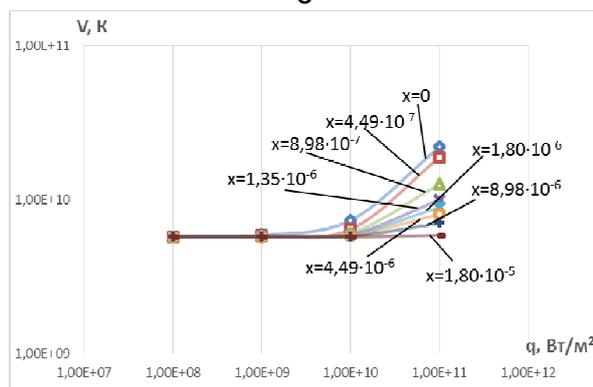
а



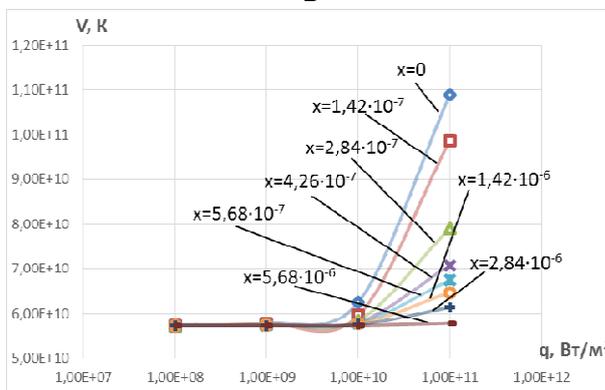
б



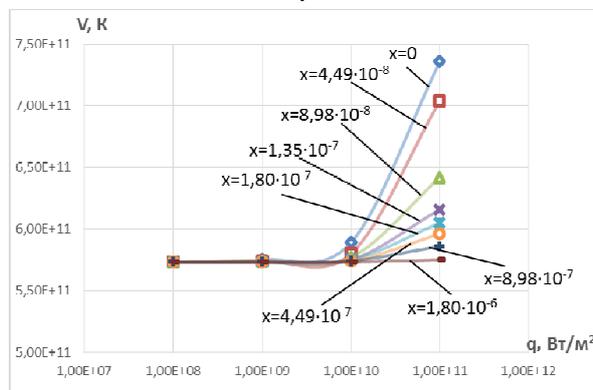
в



г



д



е

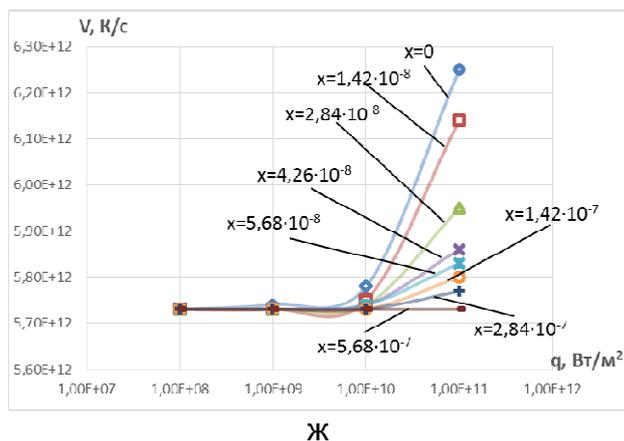
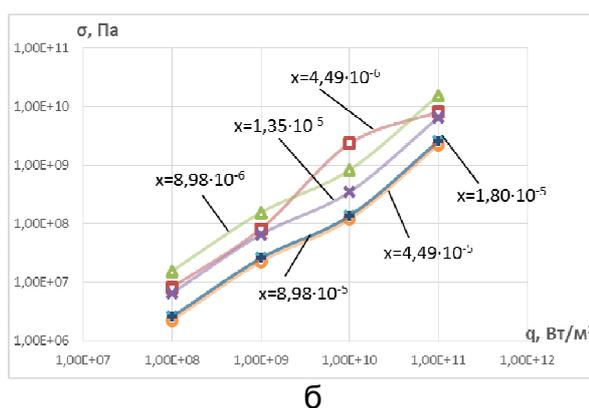
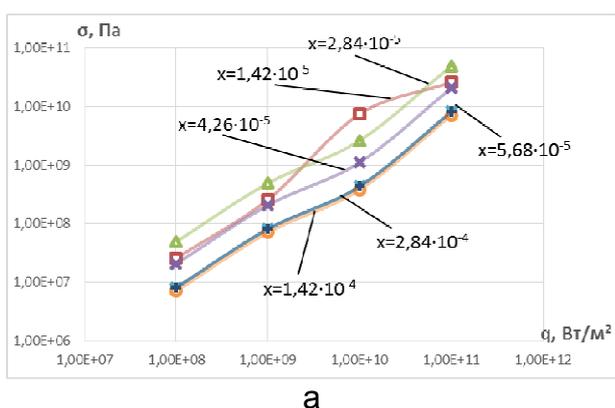


Рис. 2. Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на У8 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-4}$ с; б – $t=10^{-5}$ с; в – $t=10^{-6}$ с; г – $t=10^{-7}$ с; д – $t=10^{-8}$ с; е – $t=10^{-9}$ с; ж – $t=10^{-10}$ с

Оценка температурных напряжений необходима для решения вопроса о возможности получения НС непосредственно в результате действия напряжений (более 10^{10} Па) или определения возможности ускорения образования НС при реализации напряжений в диапазоне $10^7 \dots 10^9$ Па. Так, для тех же режимов были рассчитаны значения температурных напряжений в зоне действия на У8 при плотностях $10^8 \dots 10^{11}$ Вт/м² 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 (рис. 3). Видно, что непосредственное образование НС от действия температурных напряжений практически невозможно, правда, при времени $10^{-5} \dots 10^{-4}$ с их значения приближаются к требуемым при плотности теплового потока 10^{11} Вт/м². Во всех остальных случаях температурные напряжения лежат в пределах $10^4 \dots 10^5$ Па, причём требуемые минимальные значения температурных напряжений реализуются далеко не во всём диапазоне плотностей теплового потока и при времени 10^{-10} и 10^{-9} с они реализуются только при плотности теплового потока $10^{10} \dots 10^{11}$ Вт/м². С ростом времени действия теплового потока этот диапазон расширяется, и для 10^{-7} с в него уже входит плотность теплового потока 10^{10} Вт/м², а при 10^{-6} с увеличивается глубина, на которой возможна реализация необходимого диапазона температурных напряжений для ускорения образования НС (рис. 3).



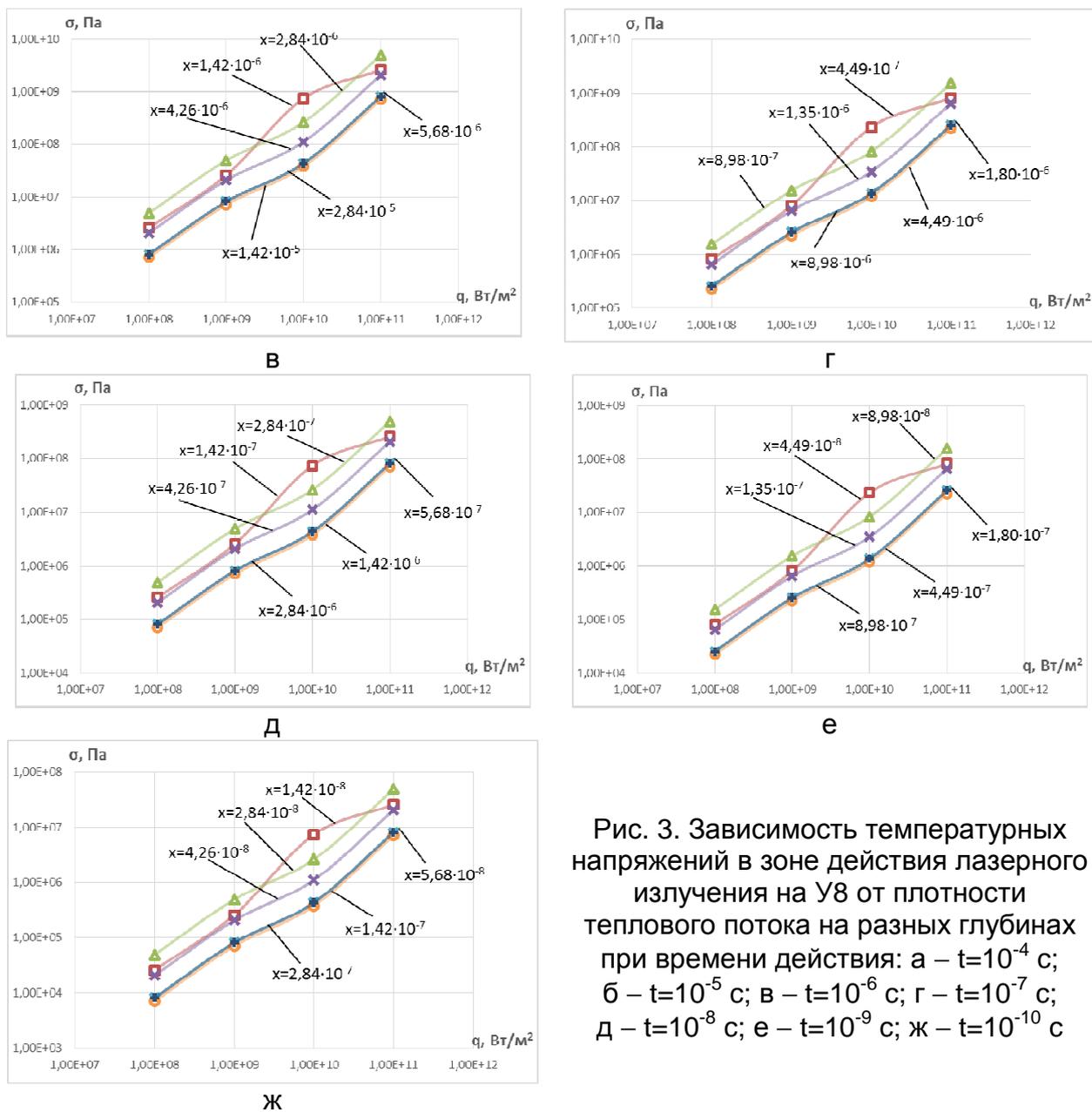


Рис. 3. Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на У8 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-4}$ с; б – $t=10^{-5}$ с; в – $t=10^{-6}$ с; г – $t=10^{-7}$ с; д – $t=10^{-8}$ с; е – $t=10^{-9}$ с; ж – $t=10^{-10}$ с

Важной характеристикой является объем зерна, который, в конечном счете, определяет возможность реализации наноструктур. Поэтому на рис. 4 и 5 даны объемы нанокластера при радиусе пятна $R=10^{-6}$ м и $R=5 \cdot 10^{-7}$ м соответственно в зависимости от минимальной (а) и максимальной (б) глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока на инструментальную сталь У8. Видно, что объемы, обеспечивающие получение наноструктур (лежат ниже пунктирной кривой), для радиуса пятна $R=5 \cdot 10^{-7}$ м – значительно больший диапазон технологических параметров, где можно реализовать наноструктуры. Аналогичные зависимости для размера зерна нанокластера от минимальной и максимальной глубины его залегания показаны на рис. 6 и 7 при радиусе пятна $R=10^{-6}$ м и $R=5 \cdot 10^{-7}$ м.

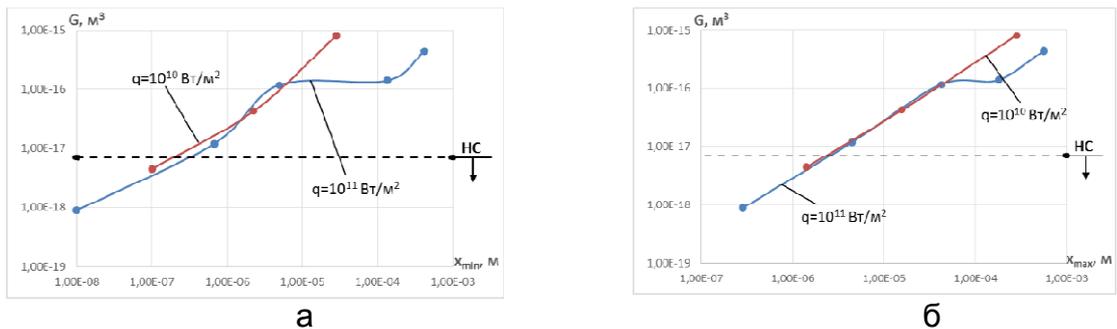


Рис. 4. Зависимость объёма нанокластера при $R=10^{-6}$ м от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (У8)

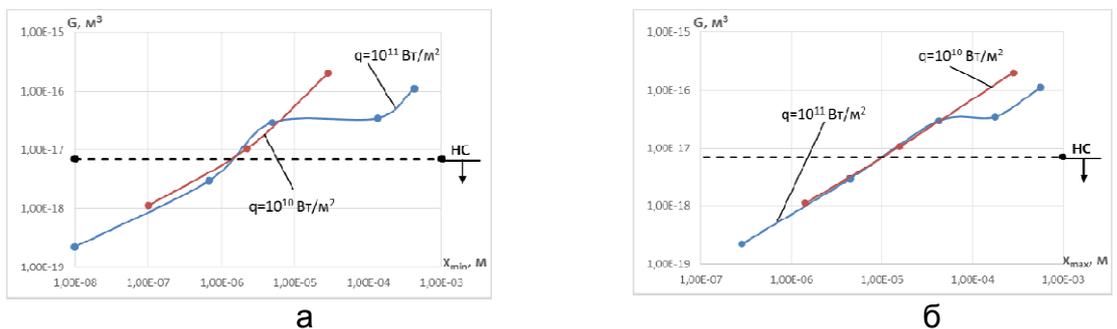


Рис. 5. Зависимость объёма нанокластера $R=5 \cdot 10^{-7}$ м от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (У8)

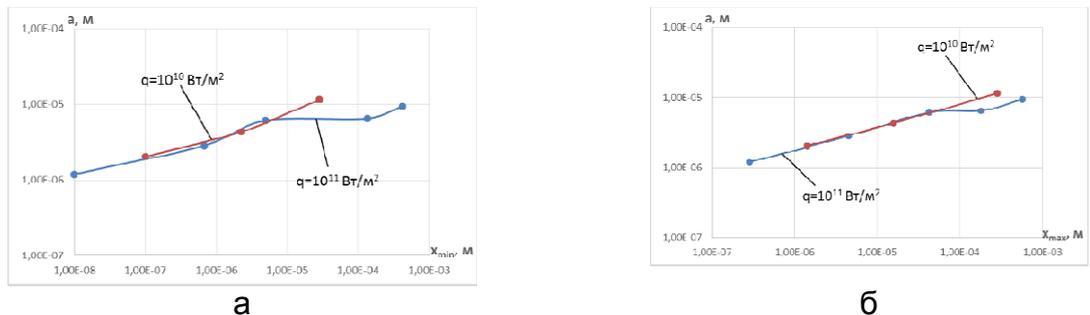


Рис. 6. Зависимость размера зерна нанокластера $R=10^{-6}$ м от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (У8)

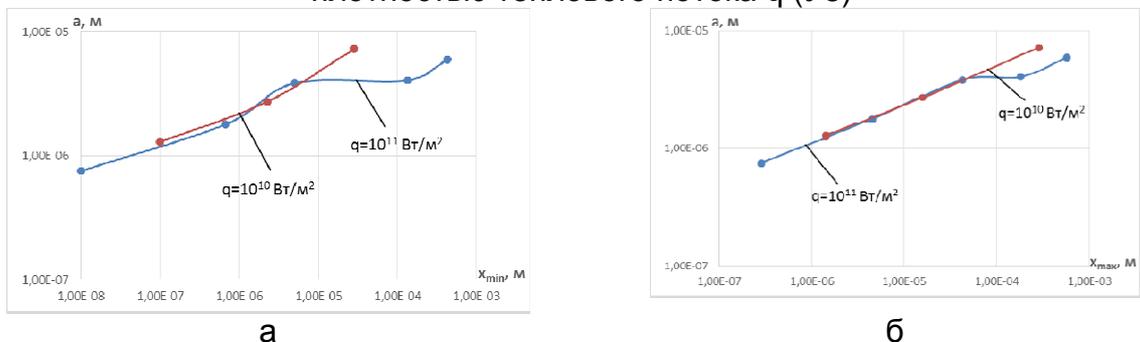


Рис. 7. Зависимость размера зерна нанокластера $R=5 \cdot 10^{-7}$ м от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (У8)

Для определения технологических параметров, обеспечивающих получение НС, были построены пространственные зависимости объема НС от плотности теплового потока и времени его действия для радиуса пятна $R=10^{-6}$ м (рис. 8) и $R=5 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 9). Видно, что получение НС более реально для размера пятна $5 \cdot 10^{-7}$ м, хотя вероятность их получения тоже невысока. На рис. 10 и 11 показаны аналогичные зависимости для размера зерна от плотности теплового потока и времени его действия для размера пятна $R=10^{-6}$ м и $R=5 \cdot 10^{-7}$ м при действии на инструментальную сталь У8. Полученные пространственные картины позволяют, зная требуемый размер зерна, выбрать технологические параметры ЛИ, позволяющие их реализовать.

Рис. 8. Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=10^{-6}$ м) (У8)

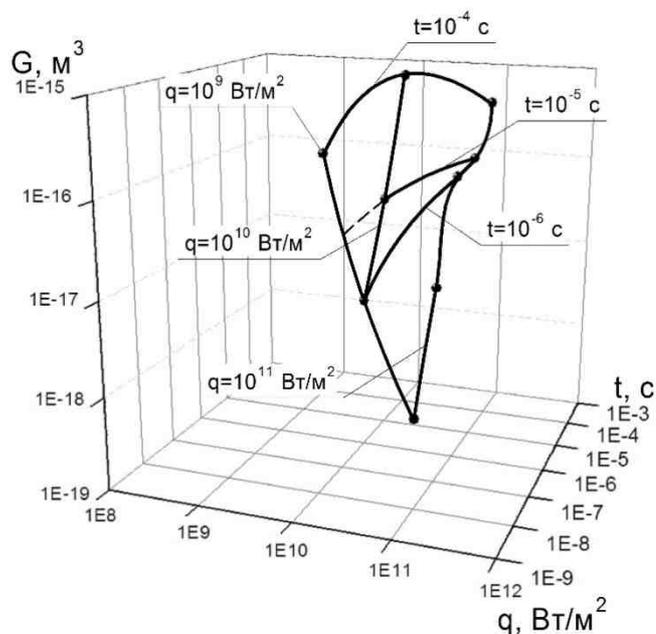
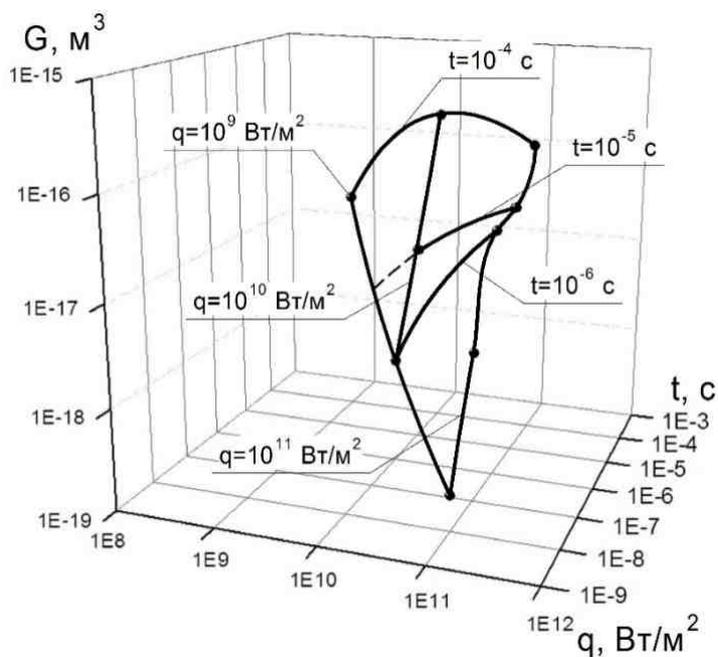


Рис. 9. Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=5 \cdot 10^{-7}$ м) (У8)



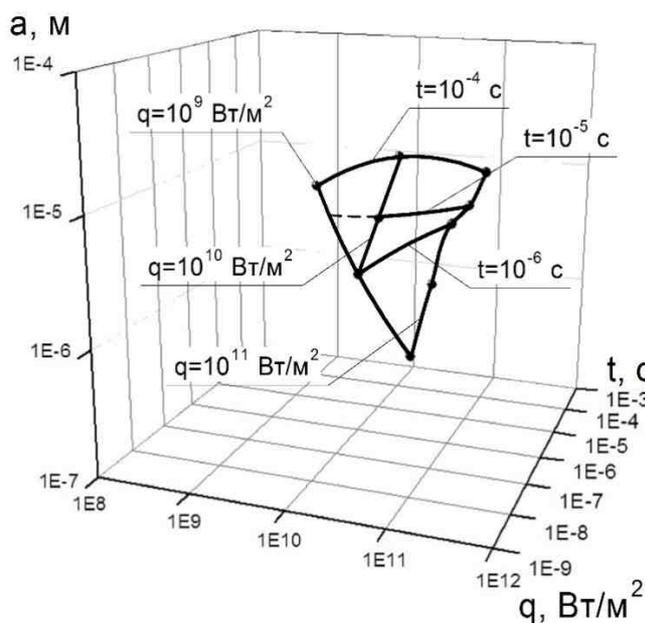


Рис. 10. Зависимость размера зерна нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=10^{-6}$ м) (У8)

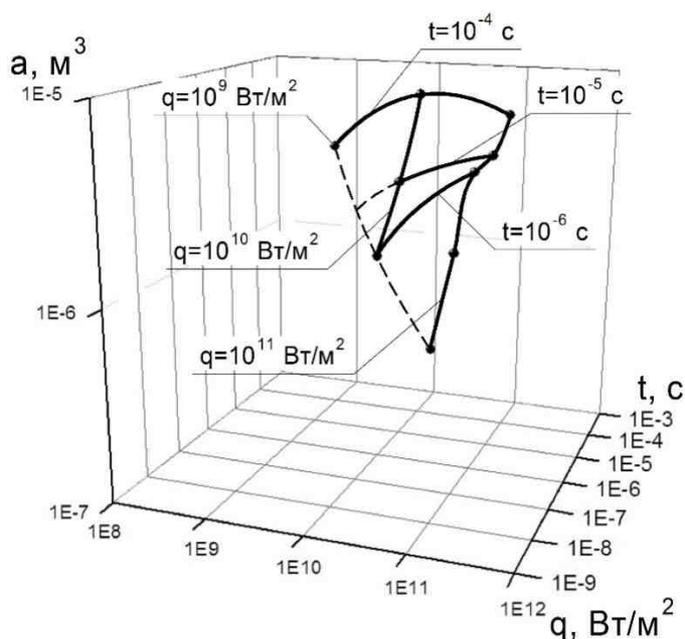


Рис. 11. Зависимость размера зерна нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=5 \cdot 10^{-7}$ м) (У8)

Выводы

Исследование полей температур, температурных напряжений и скоростей роста температуры позволяет заключить, что по критерию требуемого диапазона температур есть значительное число технологических параметров, при которых этот критерий выполняется. По критерию скорости роста температуры (должен превышать 107 K/с) практически для всех технологических параметров он выполняется.

По критерию непосредственного образования НС за счет действия температурных напряжений этот критерий выполняется в очень узком диапазоне техно-

логических параметров. Но величины температурных напряжений достаточны для ускорения образования НС (107...109 Па), в этом случае диапазон технологических параметров довольно значителен.

Полученные пространственные зависимости объема НС и размера зерна от технологических параметров (плотности теплового потока и времени его действия) показали, что есть незначительные области технологических параметров, где критерий образования НС выполняется.

Список литературы

1. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наноструктурными модифицированными слоями [Текст]: 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

Вибір технологічних параметрів лазера для отримання наноструктур на інструментальній сталі У8

На основі дослідження полів температур, температурних напружень, швидкості зміни температур, отримано технологічні параметри лазерів, при яких можливе отримання наноструктур на інструментальній сталі У8. Як критерії утворення наноструктур було обрано - необхідний діапазон температур, швидкості росту температури більше, ніж 10^7 K / с, так само оцінено температурні напруження, які знаходяться в діапазоні значень $10^7 \dots 10^9$ Па, можуть значно прискорювати утворення наноструктур, а при напрузі 10^{10} Па - вони можуть безпосередньо приводити до утворення НС.

Ключові слова: напружений стан, температури, температурні напруги, різальний інструмент, лазер, наноструктури.

The Choice of Process Parameters for Laser Nanostructures Tool Steels U8

On the basis of the temperature fields of research, temperature stress, temperature change rate obtained by the technological parameters of lasers, in which is possible to obtain nanostructures on the tool steel U8. As the nanostructures formation criteria were selected - the desired temperature range, a temperature rise rate greater than 10^7 K / s, as well as the temperature estimated voltage values are in the range $10^7 \dots 10^9$ Pa can significantly accelerate the formation of nanostructures, and at a voltage of 10^{10} Pa - they can directly lead to the formation of the National Assembly.

Keywords: stress state, temperature, thermal stresses, cutting tools, laser nanostructures.

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.

Панченко Юлия Сергеевна – студентка 4-го курса Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.

Костюк Елена Геннадиевна – доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры грузоподъемных машин Украинской педагогической академии, г. Харьков, Украина.