

## **Особенности теплового и напряжённого состояния РИ из стали У8 при действии лазера в фемтосекундном диапазоне времён**

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

Проведено исследование действия лазерного излучения с плотностями теплового потока  $10^{12} \dots 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> и временем его действия  $10^{-16} \dots 10^{-10}$  с. Получены температуры, скорости их роста и температурные напряжения, что позволяет, используя критерии определения наноструктур по диапазону температур и скорости их роста, оценить возможность получения наноструктур по этим критериям, а полученные значения температурных напряжений позволяют определить режимы и зоны в теле режущего инструмента, где реально можно получить наноструктуры.

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

### **Введение**

Ранее в наших работах, обобщённых в монографиях [1–5] получены результаты исследования температур и температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения с относительно невысокими плотностями теплового потока и довольно значительными временами действия, где показано, что получить наноструктуры можно только в узком диапазоне технологических параметров. Создание фемтосекундных лазеров и новых систем фокусировки лазерного луча позволяет уже на новом уровне рассматривать эти процессы и оценить перспективы их применения для образования наноструктурных слоёв на режущем инструменте (РИ) и деталях.

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**

Образованию наноструктур при действии лазерного излучения посвящено очень мало работ, а при действии фемтосекундных лазеров их практически нет.

Теоретическому исследованию вопроса образования наноструктур при действии лазерного излучения посвящены монографии [1–3], что позволяет с единых теоретических позиций оценить возможность получения наноструктур при действии лазерного излучения в фемтосекундном диапазоне времён.

Проведенный анализ показывает, что исследование этого вопроса практически не проводилось, и данная работа носит пионерский характер.

Всё это позволяет утверждать, что проводимая работа важна для промышленности, актуальна и своевременна.

### **Постановка задачи исследования**

Решена совместная задача теплопроводности и термоупругости в материала РИ из инструментальной стали У8. Рассчитаны температуры в зоне действия импульсного лазерного излучения в диапазоне времён  $10^{-16} \dots 10^{-12}$  с при плотностях теплового потока  $10^{12} \dots 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>, по которым оценивали скорости роста температуры и температурные напряжения. Причём на первом шаге рассчитаны температуры, а на втором – оценены температурные напряжения и уточнены значения температур по трём координатам материала РИ. Приняты критерии образования наноструктур (диапазон температур 500...1500 К, скорости роста температур превышают  $10^7$  К/с), а также возможность ускорения образования НС за счёт действия температурных напряжений в диапазоне  $10^7 \dots 10^9$  Па.

### **Результаты расчётов и их обсуждение**

Проведено исследование максимальных температур, максимальных скоростей их роста и температурных напряжений в зависимости от плотности теплового потока и от времени действия лазерного излучения.

Так, зависимости максимальной температуры от плотности теплового потока на разных глубинах в РИ из У8 показаны на рис. 1 для случая действия ЛИ разной длительности: а –  $10^{-10}$ , б –  $10^{-11}$ , в –  $10^{-12}$ , г –  $10^{-13}$ , д –  $10^{-14}$ , е –  $10^{-15}$ , ж –  $10^{-16}$ . Видно, что при временах  $10^{-16}$  с получение НС возможно при плотностях теплового потока  $5 \cdot 10^{14} \dots 5 \cdot 10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>. При увеличении времени действия до  $10^{-15}$  с реализация наноструктур возможна при плотностях теплового потока  $10^{14} \dots 2 \cdot 10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>. Дальнейшее увеличение времени до  $10^{-14}$  с приводит к смещению зоны получения НС к меньшим значениям плотностей теплового потока, которые уже составляют величины  $7 \cdot 10^{13} \dots 5 \cdot 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>. При времени  $10^{-13}$  с НС реализуются в диапазоне плотностей теплового потока от  $5 \cdot 10^{13} \dots 2 \cdot 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>, при временах же  $10^{-12}$  с эта зона перемещается в диапазон плотностей теплового потока  $2 \cdot 10^{13} \dots 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>. При времени  $10^{-11}$  с диапазон плотностей теплового потока  $8 \cdot 10^{12} \dots 4 \cdot 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>, и, наконец, при времени  $10^{-10}$  с реализация НС возможна при  $3 \cdot 10^{12} \dots 8 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Обнаружено, что с ростом времени действия теплового потока глубина, где могут образовываться НС, существенно увеличивается.

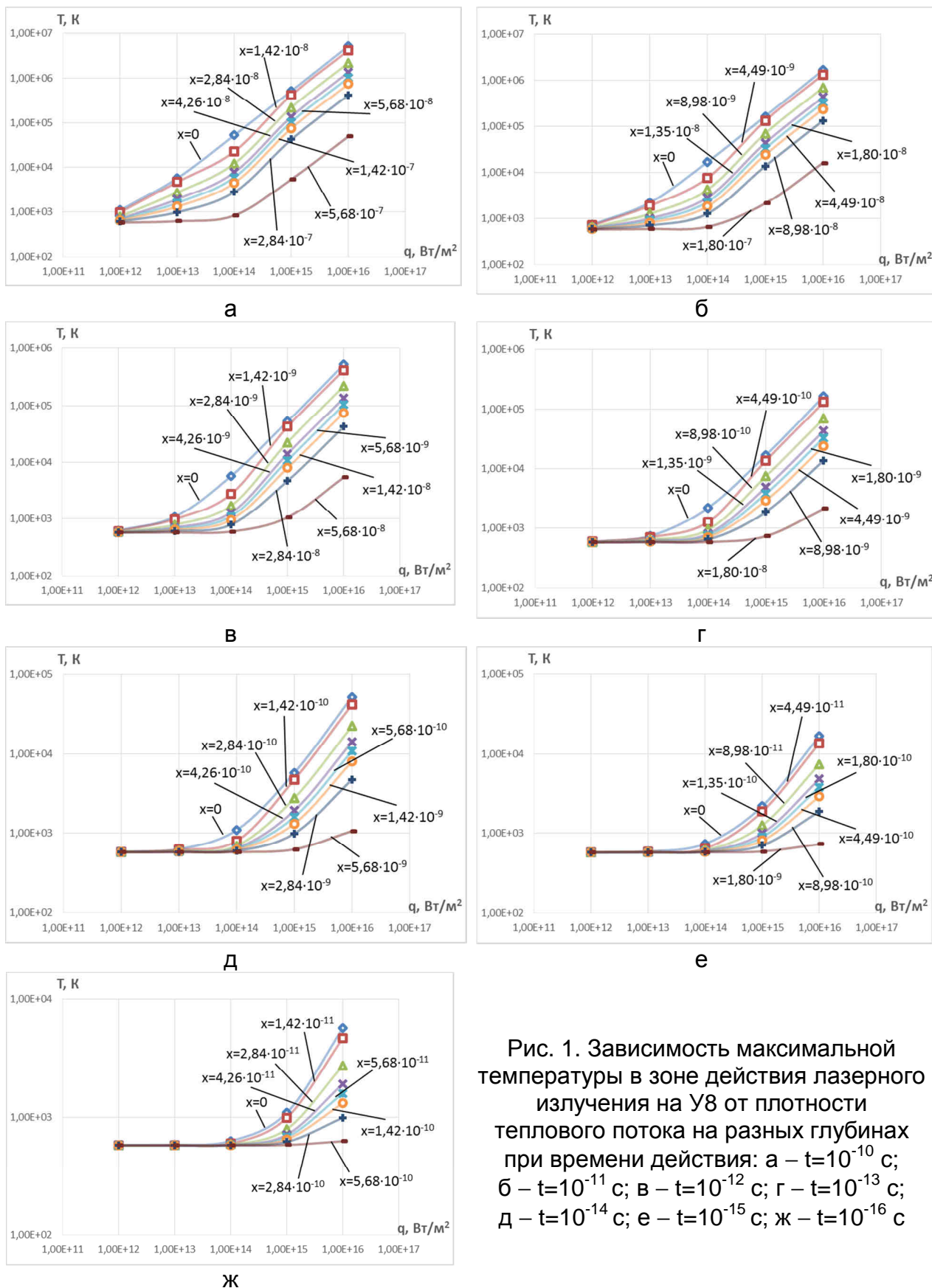


Рис. 1. Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на У8 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t = 10^{-10}$  с; б –  $t = 10^{-11}$  с; в –  $t = 10^{-12}$  с; г –  $t = 10^{-13}$  с; д –  $t = 10^{-14}$  с; е –  $t = 10^{-15}$  с; ж –  $t = 10^{-16}$  с

На рис. 2 показана зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на У8 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.

Видно, что при всех технологических параметрах реализуются условия по второму критерию, скорость изменения температуры существенно превышает  $10^7$  К/с, т.е. по этому критерию будут всегда реализовываться НС.

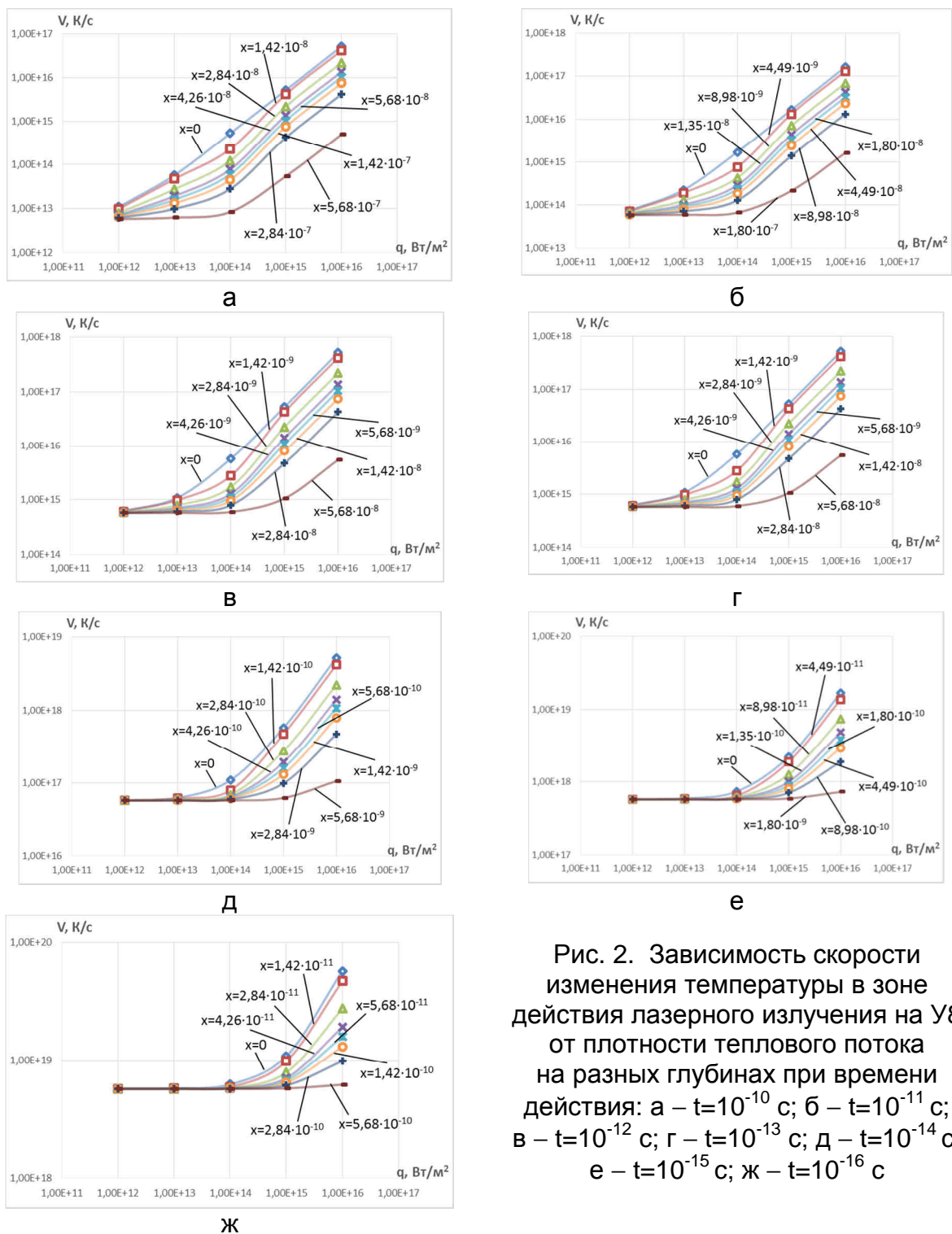


Рис. 2. Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на У8 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

Зависимость максимальной температуры в зоне действия ЛИ от времени действия теплового потока на разных глубинах показана на рис. 3 при плотностях теплового потока: 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. Эти зависимости для различных времён действия теплового потока позволяют найти те зоны (глубины), при которых появляется НС, что дает возможность определить необходимые технологические параметры для получения НС в необходимой зоне, а значит, есть возможность конструирования наноструктурного слоя.

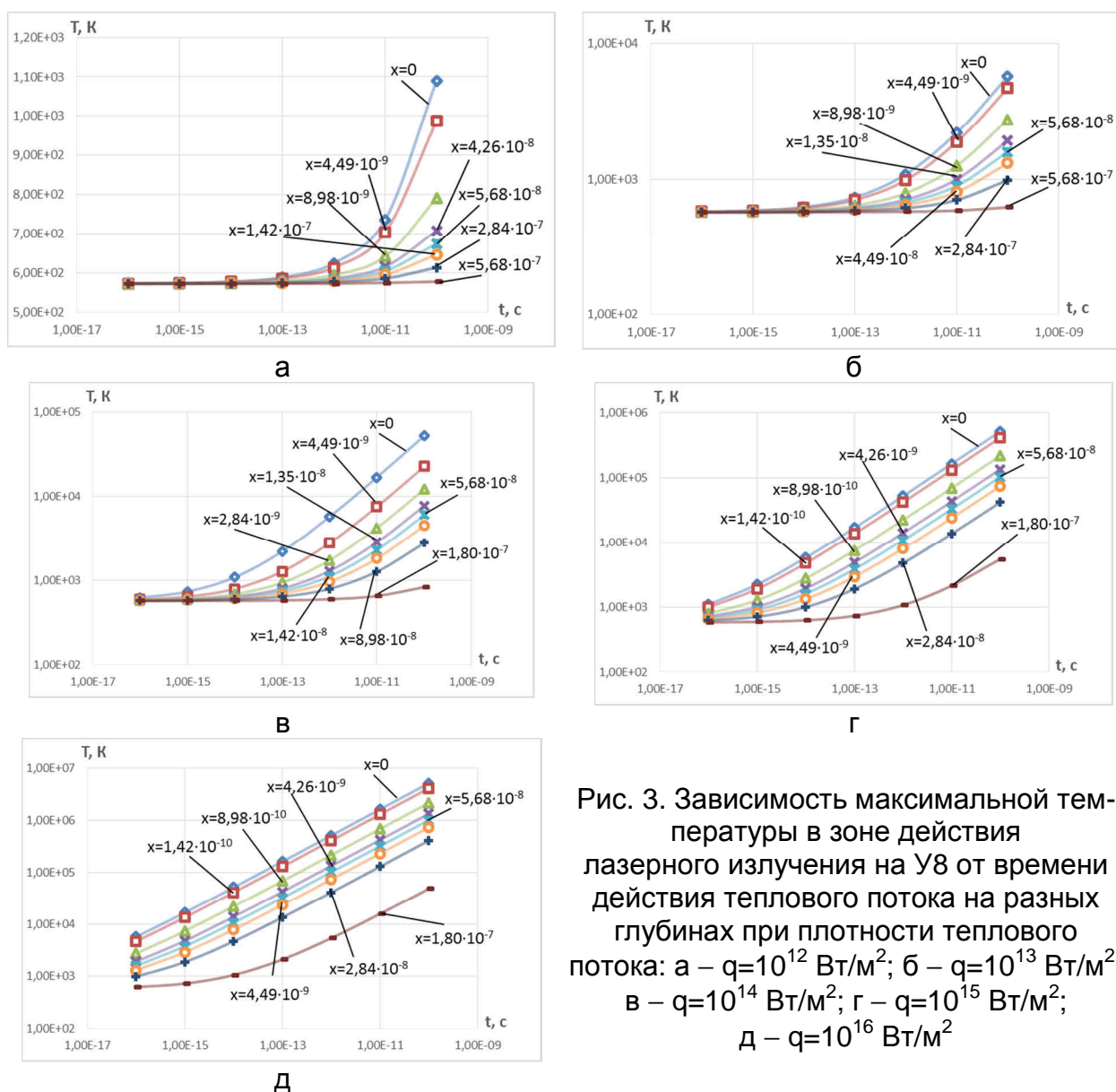
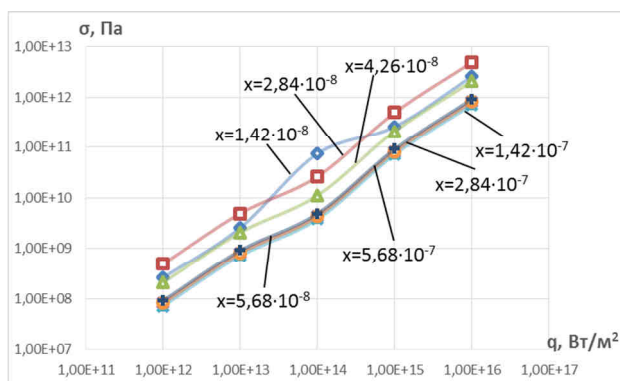


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на У8 от времени действия теплового потока на разных глубинах при плотности теплового потока: а –  $q=10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>; б –  $q=10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>; в –  $q=10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>; г –  $q=10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>; д –  $q=10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>

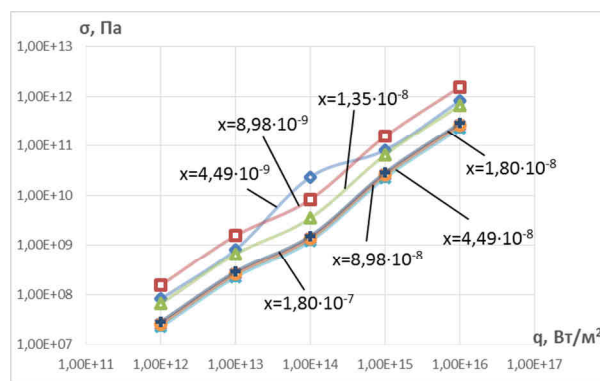
Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на У8 от плотности теплового потока на разных глубинах показана на рис. 4 при времени действия: а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с. Видно, что значение температурных напряжений при времени, превышающих  $10^{-15}$  с, появляется небольшая зона, где, возможно, реализуются НС вследствие действия температурных напряжений. Даль-

нейший рост времени действия приводит к расширению этой зоны и к увеличению вероятности появления НС, но в то же время есть вероятность образования трещин под действием температурных напряжений. Видно, что температурные напряжения могут не только существенно влиять на образование НС, но и ускорять их образование за счёт других критериев.

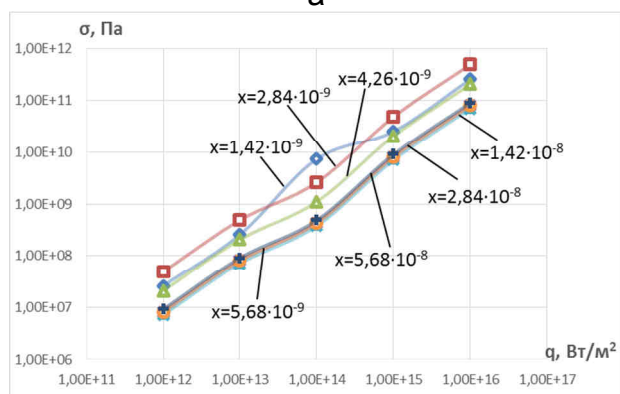
Все это позволяет утверждать, что НС за счёт дополнительного действия температурных напряжений будут реализовываться быстрее и с большей вероятностью.



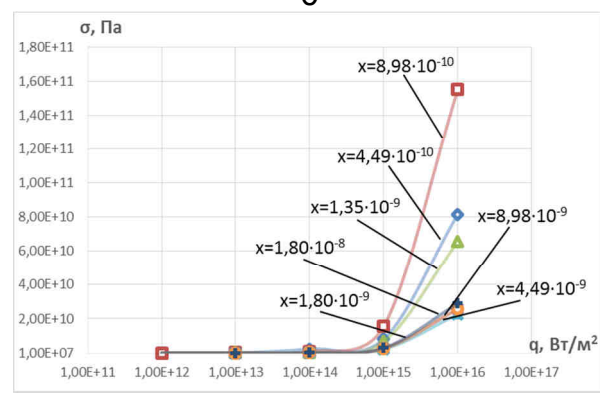
а



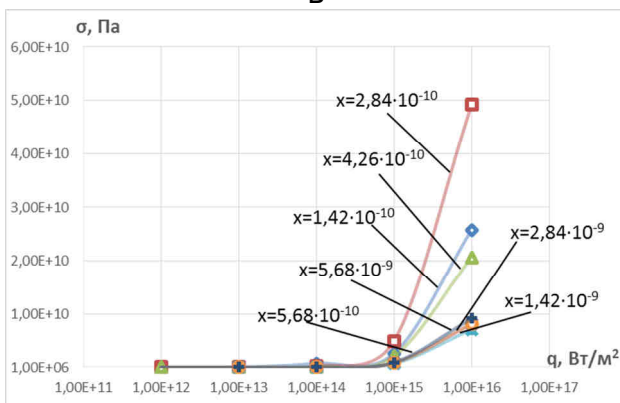
б



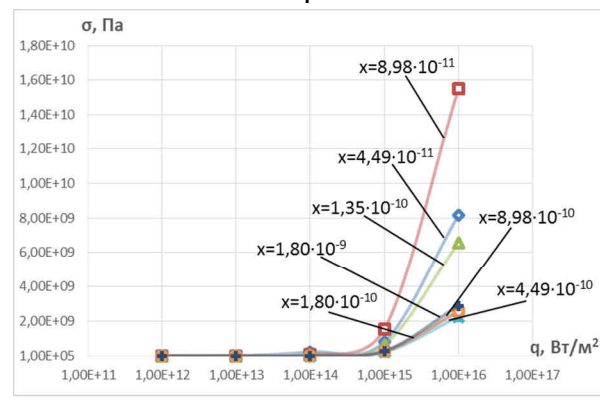
в



г



д



е



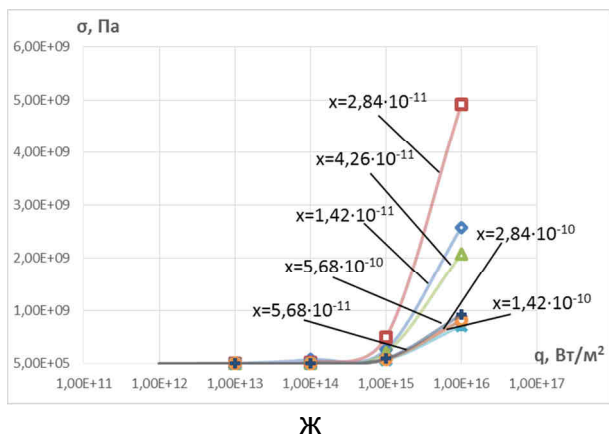


Рис. 4. Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на У8 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

Из показанных на рис. 5 зависимостей скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на У8 от времени действия теплового потока на разных глубинах при плотности теплового потока (а –  $q=10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>; б –  $q=10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>; в –  $q=10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>) видно, что значения скорости роста температуры превышают  $10^{15}$ , а значит, практически все режимы будут обеспечивать образование НС.

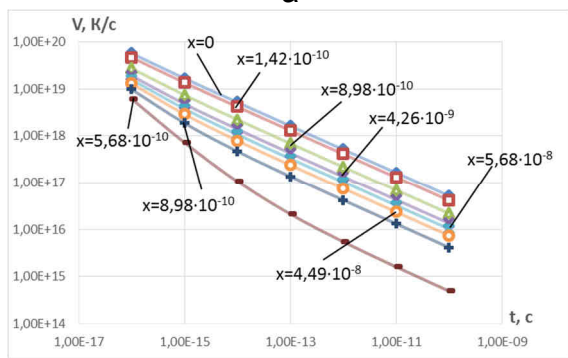
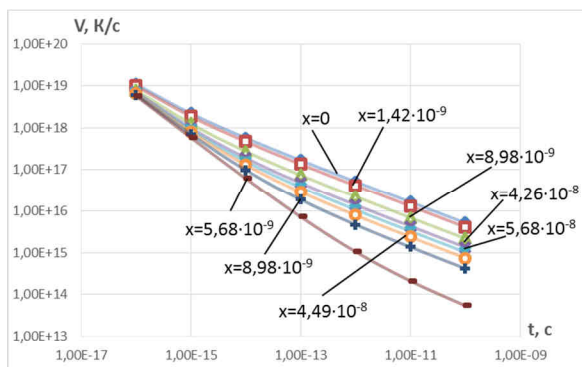
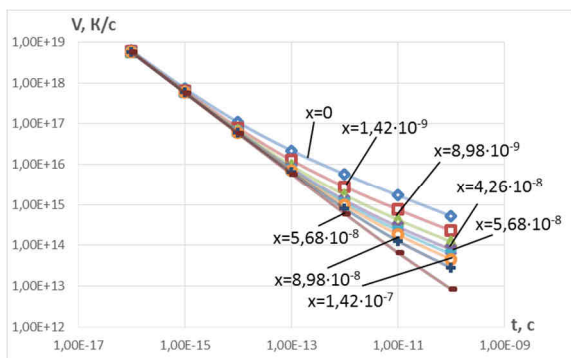


Рис. 5. Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на У8 от времени действия теплового потока на разных глубинах при плотности теплового потока: а –  $q=10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>; б –  $q=10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>; в –  $q=10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>

Зависимости температурных напряжений на рис. 6 в зоне действия лазерного излучения на У8 от времени действия теплового потока на разных глубинах при плотности теплового потока (а –  $q=10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>; б –  $q=10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>; в –  $q=10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>; г –  $q=10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>; д –  $q=10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>) позволяют найти глубины в материале, где есть возможность образования НС за счёт действия температурных напряжений, превышающих  $10^{10}$  Па.

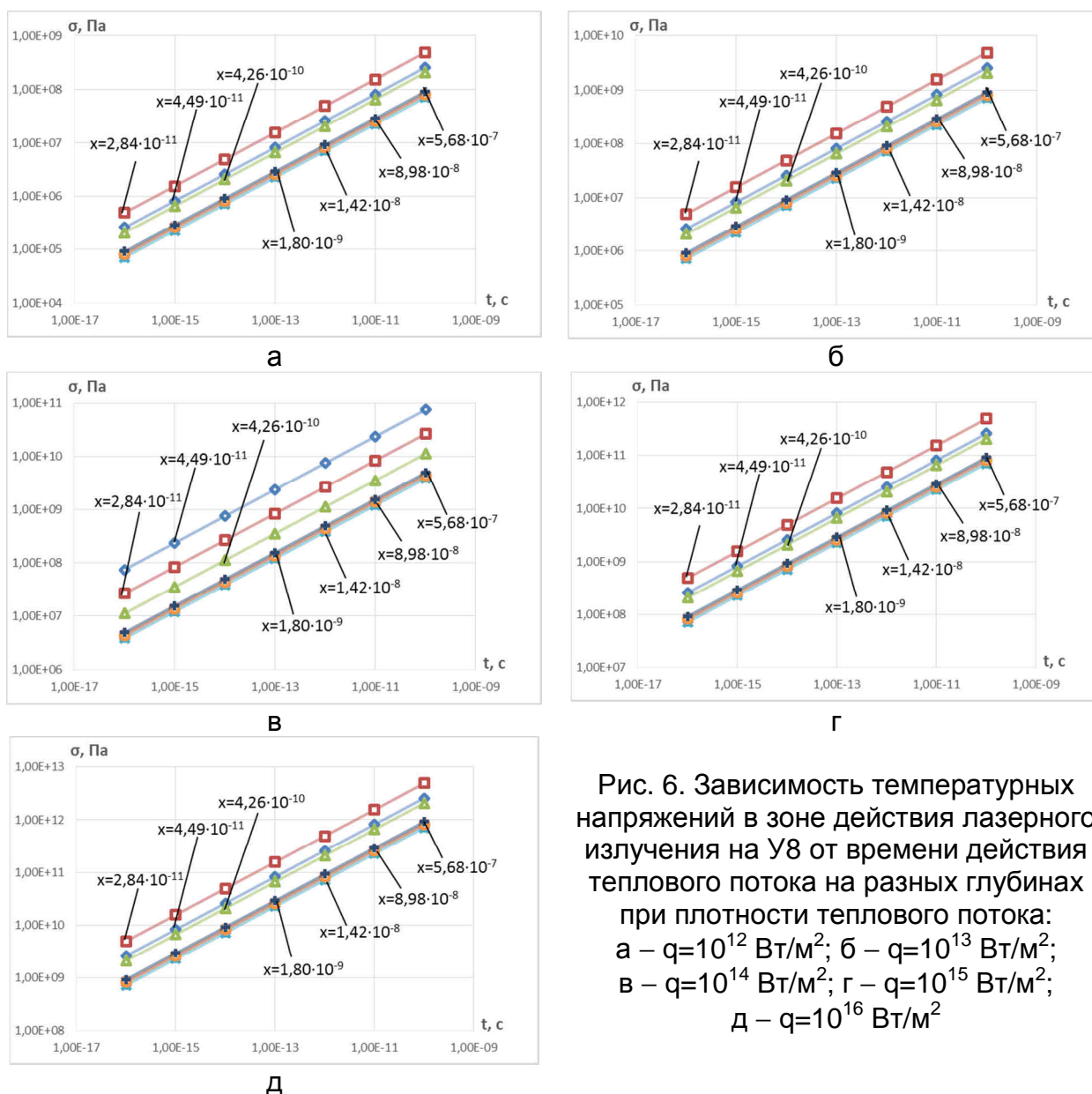


Рис. 6. Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на У8 от времени действия теплового потока на разных глубинах при плотности теплового потока: а –  $q=10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>; б –  $q=10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>; в –  $q=10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>; г –  $q=10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>; д –  $q=10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>

Проведенные исследования, в конечном счете, дадут возможность выбирать технологические параметры лазерной обработки, при которых есть возможность получения НС.

### Выводы

1. Максимальные температуры, реализующиеся в зоне действия ЛИ на У8 при различных плотностях теплового потока, позволяют выбрать технологические параметры, при которых есть реальная возможность получения НС по требуемому диапазону температур.

2. Показано, при скорости изменения температур для исследуемого диапазона технологических параметров (плотность теплового потока  $10^{12}...10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> и время действия  $10^{-16}...10^{-10}$  с) всегда реализуются скорости, превышающие  $10^7$  К/с.

3. Температурные напряжения в зоне действия лазерного излучения могут либо ускорять процесс образования НС за счёт первых двух критериев (малые



времена и относительно невысокие плотности теплового потока), либо непосредственно приводить к образованию НС, когда они превышают  $10^{10}$  Па.

4. Проведенные исследования позволяют обеспечить получения НС на требуемой глубине, а при их изменении, есть возможность получения наноструктурного слоя довольно значительной величины. Всё это свидетельствует о возможности получения НС.

### Список литературы

1. Костюк, Г. И Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наноструктурными модифицированными слоями [Текст]: моногр.-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. 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 нанопокрытия: 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. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.

13. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства [Текст] / А. И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.

14. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
15. Решетняк, Е. Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий [Текст] / Е.Н. Решетняк, А. И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130.
16. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский// Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.
17. 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 29.11.2016

### **Особливості теплового і напруженого стану РІ із сталі У8 при дії лазера в фемтосекундному діапазоні часів**

Проведено дослідження дії лазерного випромінювання з густиною теплового потоку  $10^{12} \dots 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> і часом його дії  $10^{-16} \dots 10^{-10}$  с. Отримані температури, швидкості їх росту і температурні напруги, що дозволяє, використовуючи критерії визначення наноструктур по діапазону температур і швидкості їх зростання, оцінити можливість отримання наноструктур за цим критеріям, а отримані значення температурних напружень дозволяють визначити режими і зони в тілі ріжучого інструменту, де реально можна отримати наноструктури.

**Ключові слова:** напружений стан, температури, температурні напруги, ріжучий інструмент, фемтосекундний лазер, наноструктури.

### **Features Heat and Napryajennogo of the State of RI from a Steel U8 with the Action of a Laser in Femtosecond Time Range**

A study of the action of laser radiation with the density of the heat flow  $10^{12} \dots 10^{16}$  W/m<sup>2</sup> and its action time  $10^{-16} \dots 10^{-10}$  s. The resulting temperature, speed of growth and thermal stresses, which allows, using the criteria of the definition of nanostructures by temperature range and speed of their growth, to assess the possibility of obtaining nanostructures according to these criteria, and the obtained values of thermal stress determine the modes and areas in the body of the cutting tool, where it is really possible to obtain nanostructures.

**Keywords:** stress state, temperature, thermal stresses, cutting tool, femtosecond laser, nanostructure.

#### **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.

**Матвеев Александр Александрович** – аспирант кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.