

Эффективные режущие инструменты из инструментальных сталей после обработки фемтосекундным лазером

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

Показана возможность получения наноструктур на инструментальной стали У12 путем применения обработки фемтосекундным лазером. На основе теоретического исследования полей температур, температурных напряжений и скоростей роста температур показана возможность получения наноструктур при действии лазера при плотностях теплового потока $10^{12} \dots 10^{16}$ Вт/м² и при времени его действия $10^{-12} \dots 10^{-16}$ с. С учётом критериев образования наноструктур получены объёмы материала, где выполняются условия по критериям: требуемому диапазону температур, скоростей роста температур, по температурным напряжениям. По зависимостям полученного объёма материала от плотности теплового потока и времени его действия оценены технологические параметры получения наноструктур: чем больше такая область, тем эффективнее образуются наноструктуры..

Ключевые слова: инструментальные стали, наноструктуры, критерии образования наноструктур, объёмы нанокластера, поля температур, температурные напряжения, эффективность получения наноструктур.

Введение

Промышленное применение инструментальных сталей задерживается, так как их стойкость меньше по сравнению с твердыми сплавами, несмотря на то, что их стоимость значительно дешевле. Очевидно, получение наноструктурных слоёв на поверхности инструментальных сталей может существенно повысить микротвёрдость поверхностного слоя, а значит, и её износостойкость. В то же время НС имеют повышенный предел текучести, что способствует более удачному сопротивлению действию внешних нагрузок на РИ, а понижение модуля упругости в наноструктурном слое будет способствовать противодействию усталостному разрушению. Всё это свидетельствует о важности и своевременности проводимых исследований, а значит, можно ожидать реального использования инструментальных материалов с НС слоями в машиностроении в недалёком будущем.

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 мировой науке в настоящее время проведено значительное количество исследований по получению и исследованию свойств наноструктур (НС), но метод лазерной обработки и, тем более фемтосекундным лазером, ещё не использовался для получения НС, хотя есть исследования по снижению коэффициента трения и препятствию обледенению поверхностей, обработанных фемтолазерами. Очевидно, это свидетельствует о том, что поверхность приобретает новые свойства и можно предположить, что это НС. По теоретическому исследованию НС есть относительно небольшое количество монографий [1–5], хотя теоретического исследования процесса образования НС при действии фемтолазера практически нет. По экспериментальному исследованию НС выполнено значительное количество работ, обобщенных в [1–17], но экспериментальных исследований действия фемтолазера на материалы в целях получения НС в настоящее время нет.

Всё это свидетельствует о том, что теоретическое рассмотрение действия фемтолазера на инструментальные материалы может дать толчок к экспериментальным исследованиям, если будет теоретически обоснована возможность получения НС. Поэтому предлагаемое исследование является новым и актуальным с точки зрения науки и производства.

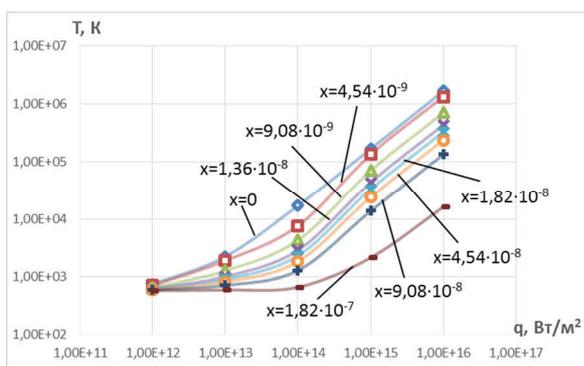
Постановка задачи исследования

На основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости с учётом энергии, затрачиваемой на кристаллизацию, были проведены исследования полей температур, скоростей роста температур и температурных напряжений. С учетом критериев образования НС были получены технологические режимы, при которых возможно образование НС. Так, зависимости максимальной температуры в зоне пятна от плотности теплового потока на разных глубинах в теле РИ из У12 показаны на рис. 1 для времени 10^{-11} с, 10^{-14} с, 10^{-16} с. Видно, что при времени $t = 10^{-11}$ с НС образуются при плотностях теплового потока 10^{13} Вт/м², 10^{14} Вт/м², и частично при $q = 10^{15}$ Вт/м² (на большой глубине) есть возможность получения НС (рис. 1, а).

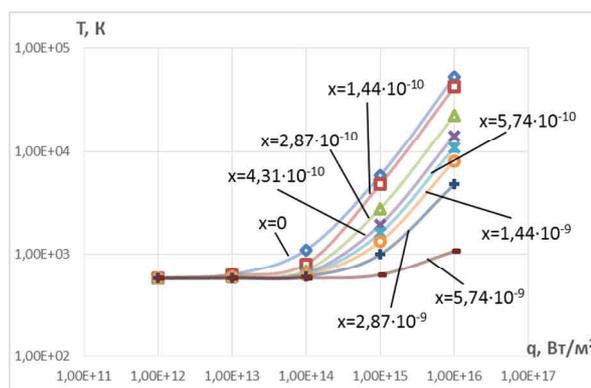
При времени $t = 10^{-14}$ с зона получения НС смещается в сторону больших тепловых потоков $q = 10^{14} \dots 10^{16}$ Вт/м² (при большем q эта зона удаляется от поверхности, рис. 1, б).

При времени $t = 10^{-16}$ с возможность образования НС реализуется при $q = 10^{15} \dots 10^{16}$ Вт/м², причём для последнего в зоне глубин $2,87 \cdot 10^{-11} \dots 5,74 \cdot 10^{-10}$ м (рис. 1, в).

Всё это свидетельствует о том, что по критерию требуемого диапазона температур есть возможность реализовывать режимы с образованием НС.

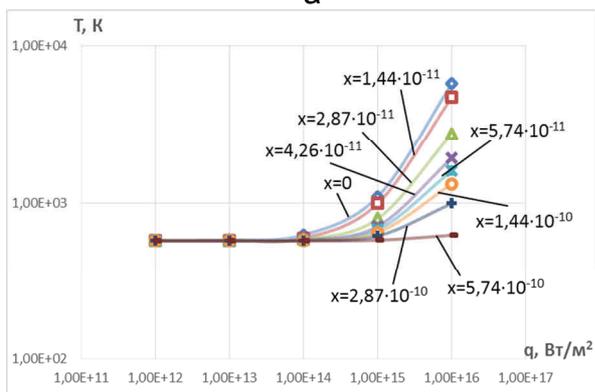


а



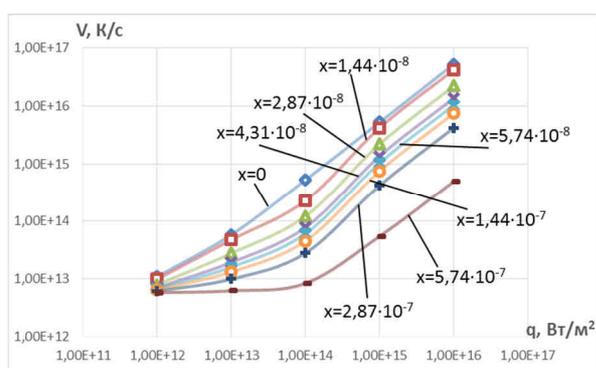
б

Рис. 1. Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на У12 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-11}$ с; б – $t=10^{-14}$ с; в – $t=10^{-16}$ с

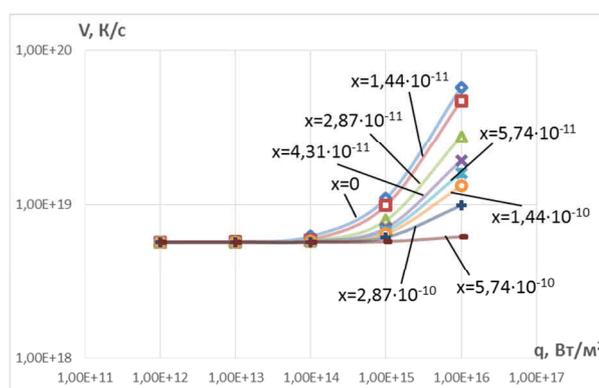


в

Анализ зависимости скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на инструментальную сталь У12 на разных глубинах при времени $t = 10^{-10}$ с (рис. 2, а) и $t = 10^{-16}$ с (рис.2, б) показал, что в диапазоне времён и плотностей теплового потока скорости роста теплового потока превышают необходимые 10^7 К/с.



а



б

Рис. 2. Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на У12 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-10}$ с; б – $t=10^{-16}$ с

Для оценки возможности образования НС непосредственно под действием температурных напряжений были исследованы зависимости температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на У8 от плотности теплового потока (рис. 3). На рис. 3 показаны два наиболее характерных режима, а также то,

что в широком диапазоне плотностей теплового потока есть возможность образования НС ($t=10^{-12}$ с). Для времён, приближающегося к $t=10^{-16}$ с (рис. 3, б), образование НС практически невозможно, но существует вероятность ускорения образования НС под влиянием других критериев.

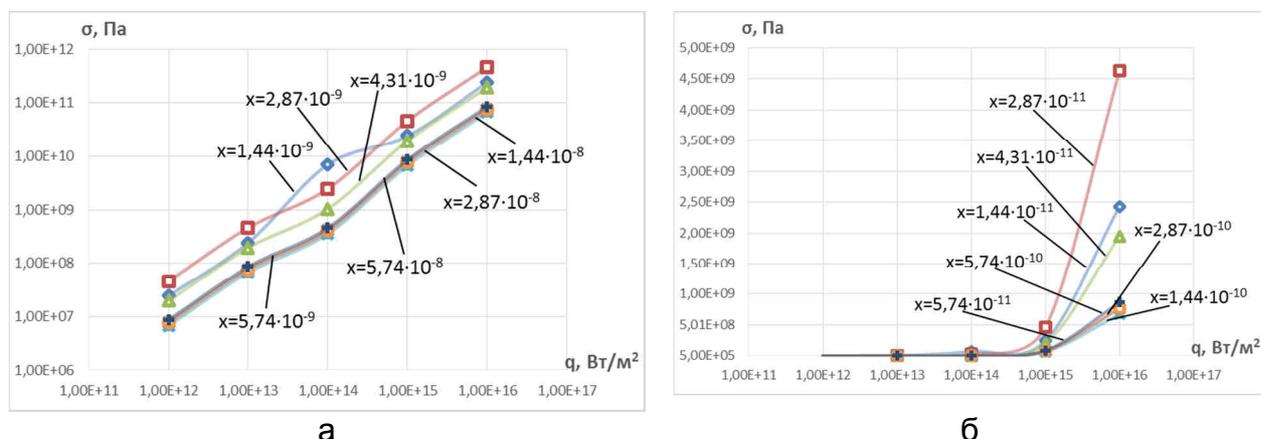


Рис. 3. Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на У12 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а – $t=10^{-12}$ с; б – $t=10^{-16}$ с

Так как важной характеристикой НС является размер зерна, были построены зависимости размера зерна от минимальной и максимальной глубин для радиуса светового пятна, где можно найти размер зерна, необходимый для реализации тех или иных физико-механических характеристик, а также найти зону по глубине $R=10^{-6}$ м (рис. 4) и $R=5 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 5), где этот размер зерна реализуется.

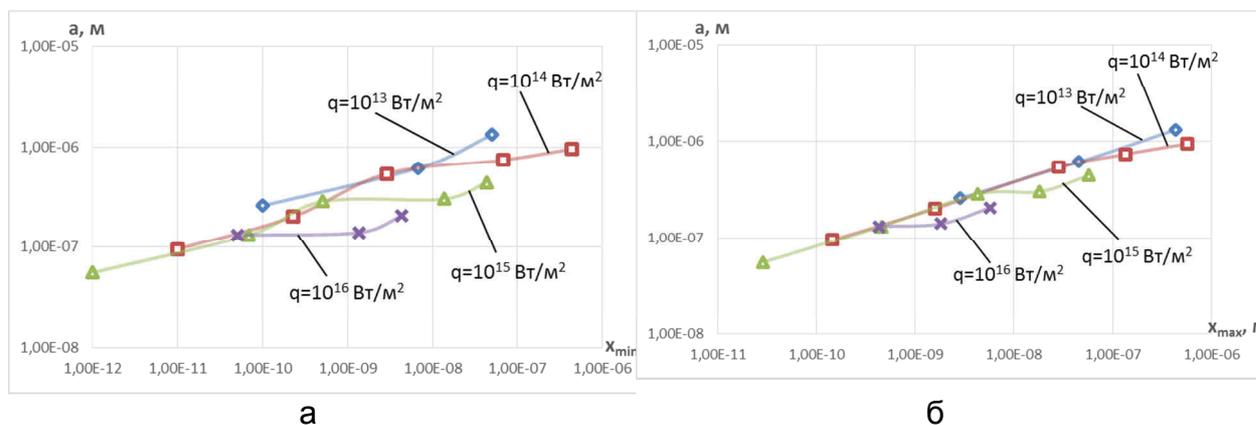


Рис. 4. Зависимость размера зерна нанокластера $R=10^{-6}$ м от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (У12)

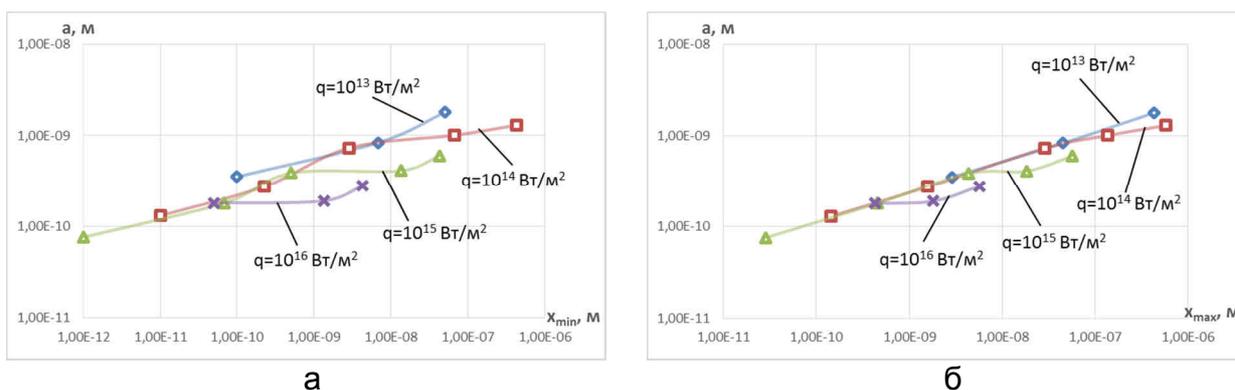


Рис. 5. Зависимость размера зерна нанокластера $R=5 \cdot 10^{-7}$ м от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (У12)

Приняв, что размер нанокластера должен быть менее 100 нм, мы можем оценить технологические параметры, для которых могут быть реализованы НС. Так, в зависимости размеров зерна от плотности теплового потока ЛИ (q) и времени его действия (t) получены области, где образуются НС при радиусе пятна ЛИ $R=10^{-6}$ м (рис. 6) и при $R=5 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 7).

Рис. 6. 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) для стали У12

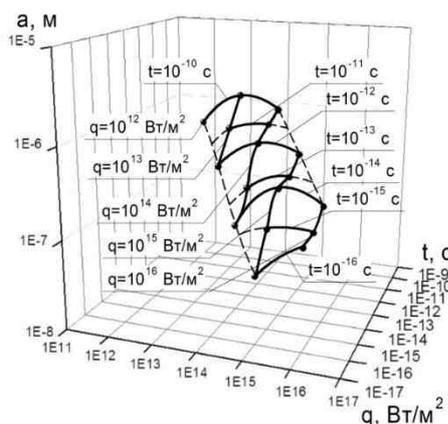
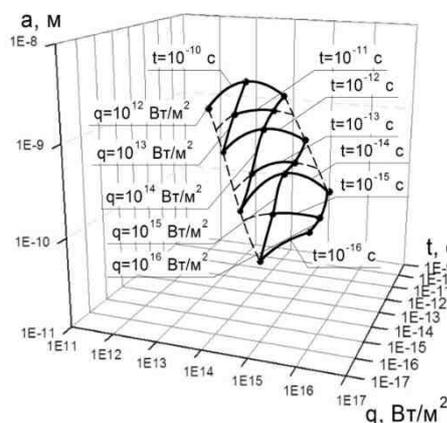


Рис. 7. Зависимость размера зерна нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=5 \cdot 10^{-7}$ м) для стали У12



Такие зависимости позволяют выбирать технологические параметры обработки фемтосекундным лазером инструментальную сталь У12 в целях получения НС. Эти расчётные зависимости дают возможность провести экспресс-оценку тех-

нологических параметров лазера для эффективной обработки инструментальной стали У12 в целях получения НС.

Выводы

1. На основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости получены поля температур, температурных напряжений и скоростей роста температуры, что позволяет по критериям диапазона температур, скорости роста температур и величины температурных напряжений определить области в инструментальном материале У12, где могут быть получены НС.

2. Показано, что на основе применения фемтосекундного лазера есть возможность расширения технологических параметров лазера, при которых есть высокая вероятность получения НС.

3. Зависимости объёма зерна и его размера от технологических параметров (плотность теплового потока и время его действия) позволяют провести экспресс-оценку необходимых технологических параметров для создания НС, что имеет большое практическое значение.

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 АІНУ, 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

Ефективні різальні інструменти з інструментальних сталей після оброблення фемтосекундним лазером

Показано можливість отримання наноструктур на інструментальній сталі У12 шляхом застосування оброблення фемтосекундним лазером. На основі теоретичного дослідження полів температур, температурних напружень і швидкостей зростання температур доведено можливість отримання наноструктур при дії лазера при щільності теплового потоку $10^{12} \dots 10^{16}$ Вт / м² і за часів його дії $10^{-12} \dots 10^{-16}$ с.

З урахуванням критеріїв утворення наноструктур отримано обсяги матеріалу, де виконуються умови за критеріями: необхідним діапазоном температур, температурних напружень. За залежностями отриманого обсягу матеріалу від щільності теп-

лового потоку і часу його дії оцінено технологічні параметри отримання наноструктур, чим більше така область, тим ефективніше утворюються наноструктури.

Ключові слова: інструментальні сталі, наноструктури, критерії отримання наноструктур, обсяги нанокластера, поля температур, температурні напруження, ефективність отримання наноструктур.

Effective Cutting Tools Made of Tool Steel after Treatment with Femtosecond Laser

The possibility of producing nanostructures on tool steel Y12 through the use of femtosecond laser processing. Based on the theoretical study of the temperature field, thermal stress and temperature rise rate of the possibility of obtaining nanostructures by laser action at densities of heat flow in $10^{12} \dots 10^{16} \text{ W / m}^2$, and at times his actions $10^{-12} \dots 10^{-16}$ seconds. Taking into account the criteria of the formation of nanostructures produced volumes of material, where the conditions of the following criteria: the desired temperature range, thermal stress. In dependence of the obtained volume of material from the heat flux density and the time of its action, the process parameters evaluated for fabricating nanostructures, the more such a region, the more effective form nanostructures.

Keywords: tool steel, nanostructures, the criteria for the formation of nanostructures, nanocluster volume, temperature field, thermal stress, the efficiency of producing 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.