

УДК 621.9.044

*Г.И. КОСТЮК, Е.В. ВОЛЯК, А.В. ЕВСЕЕНКОВА***ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР НА СПЕЦИАЛЬНОМ ЧУГУНЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА**

Показана можливість отримання наноструктур на спеціальному чавуні за рахунок дії фемтосекундного лазера, причому є можливість утворення наноструктур, як в зоні формування зерна, так і в шарах наноструктурної товщини, але більших розмірів зерен, ніж наноструктурні. Дана методика попередньої оцінки технологічних параметрів лазерного випромінювання в фемтосекундному часовому діапазоні, яка дозволяє виявити технологічні параметри для отримання наноструктур. Вона використовується для експрес-оцінки можливості отримання наноструктур.

**Ключевые слова:** фемтосекундний лазер, наноструктури, експрес-оцінка технологічних параметрів, нанозерно, нано шари.

Показана возможность получения наноструктур на специальном чугуна за счёт действия фемтосекундного лазера, причём есть возможность образования наноструктур как в зоне формирования зерна, так и в слоях наноструктурной толщины, но больших размеров зёрен, чем наноструктурные. Дана методика предварительной оценки технологических параметров лазерного излучения в фемтосекундном временном диапазоне, которая позволяет выявить технологические параметры для получения наноструктур. Она используется для экспресс-оценки возможности получения наноструктур.

**Ключові слова:** фемтосекундний лазер, наноструктури, експрес-оцінка технологічних параметрів, нанозерно, нано слої.

Shown possibility obtaining nanostructures especially for cast iron due to the action femtosecond laser, there at those ability education nanostructures, as in the formative zone of grain, as in layers of nanostructured thickness, but larger than nanostructured. The technique of preliminary estimation of technological parameters of laser radiation in the femtosecond time range is given, which allows revealing technological parameters for obtaining nanostructures. It is used for rapid assessment of the possibility of obtaining nanostructures.

**Keywords:** femtosecond laser nanostructures rapid assessment process parameters nanograin nano layers.

**Введение.** Специальный чугун широко используется в гильзах цилиндров внутреннего сгорания, которые должны обеспечивать нужный коэффициент трения, высокую износостойкость (обеспечивается высокой микротвердостью), значительную теплоустойчивость и высокие прочностные характеристики. Всё это может быть достигнуто благодаря получению наноструктур (НС) в поверхностном слое чугуна. Получение НС на внутренней поверхности цилиндра возможно вследствие использования фемтосекундного лазера с подводом луча за счёт волоконной или оптической системы транспортировки луча. Всё выше изложенное говорит о перспективности и актуальности теоретического исследования получения НС в поверхностном слое чугуна вследствие действия лазерного излучения в фемтосекундном диапазоне времени.

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.** Получение наноструктур при действии лазерного излучения посвящено незначительное количество работ, которые представлены в основном в монографии [1] да и то эти работы посвящены упрочнению режущего инструмента. Несмотря на то, что значительное число работ посвящено исследованию наноструктур [2-12] получение НС на чугунах не исследовалось.

Все это говорит о том, что исследование возможности получения НС на чугуна и тем более фемтосекундным лазером не проводилось (фемтосекундный лазер не применяется для получения наноструктур), а значит исследования возможности получения наноструктур фемтосекундным лазером, является важной и актуальной задачей.

Цели и задачи исследования

Для получения теплофизических и термомеханических характеристик специального чугуна проводились исследования химического состава чугуна (Дрон 3-М), оценивалось количественная доля химических элементов, содержащихся в материале, так дефрагтограмма и состав его представлены на рис.1.

Видно, что основными элементами есть железо (как чистое, так и в виде карбидов) 96,01 %, кремний – 2,42 %, марганец – 1,36 %, хром – 0,21 %, а также присутствует не связанный углерод (С) менее 0,01%. Проведенные предварительное исследование состава химических элементов в чугуна позволило уточнить теплофизические и термомеханические характеристики исследуемого материала в таблице 1 даны механические характеристики хромисто-кремневого чугуна, которые использовались в расчётах табл.1.

Теоретическое исследование позволяет получить поля температур и температурных напряжений, скоростей роста температурных напряжений от технологических параметров лазерной обработки.

© Г.И. Костюк, Е.В. Воляк, А.В. Евсеенкова, 2017

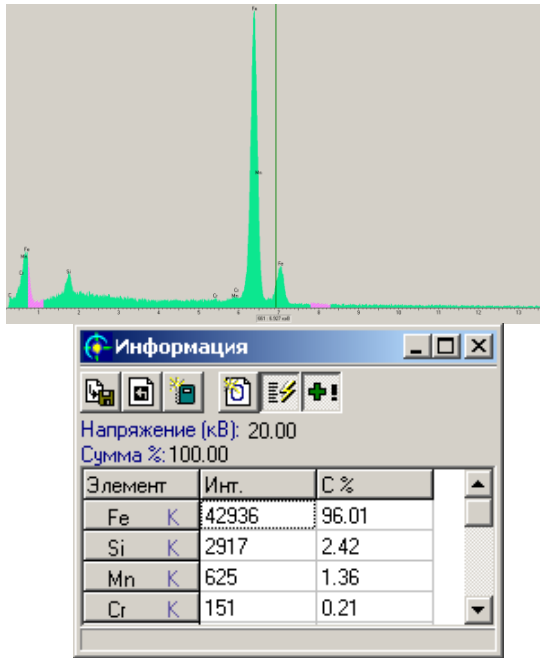


Рис.1 – Дифрактограмма и количественный состав основных элементов специального чугуна, полученная с использованием анализатора «Дрон 3-М»

Таблица 1

Физико-механические характеристики хромистокремнистого чугуна (предел прочности и текучести, относительное удлинение, твердость HB, модуль упругости E, модуль сдвига G, коэффициент Пуассона μ)

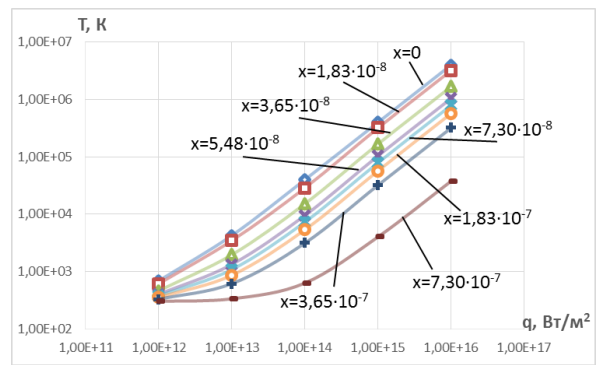
Химический состав	$\sigma_{в.р}$ Н/м <sup>2</sup> ·10 <sup>-7</sup>	$\sigma_{т.расг}$ Н/м <sup>2</sup> ·10 <sup>-7</sup>	$\delta$ , %	HB, кг/мм <sup>2</sup>	E·10 <sup>-11</sup> , Па	G·10 <sup>-11</sup> , Па	μ
Cr (0,2-1%) Si (1,2-2%) C (~2,3%)	49-56	28-36	9-2.5	180-200	1.75	0.85	0.17

Применяя в качестве критериев получения НС: диапазон температур (500-1500 К), превышение 10<sup>7</sup> К/с скорости роста температуры, а также учитывается вероятность ускорения образования НС за счёт действия температурных напряжений  $\sigma = 6 \cdot 10^7 \dots 10^9$  Па и даже их образование при  $\sigma > 10^{10}$  Па.

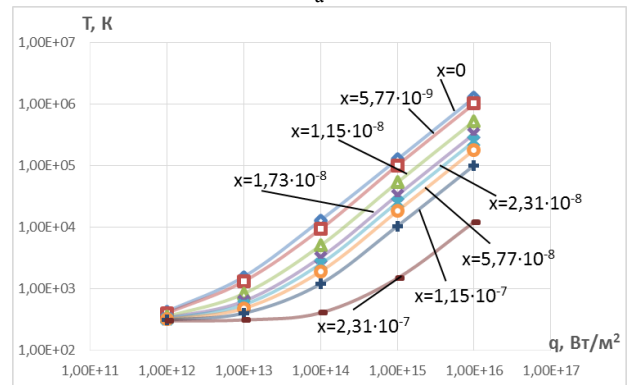
**Результаты расчётов и их обсуждение.**

Проводилось исследование зависимостей максимальных температур, скоростей роста температур и температурных напряжений на различных глубинах от плотности теплового потока лазерного излучения (ЛИ) в фемтосекундном диапазоне для различных времён его 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 (рис.2 - 5) и от времени действия ЛИ (рис.6 - 8) при разных плотностях 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>.

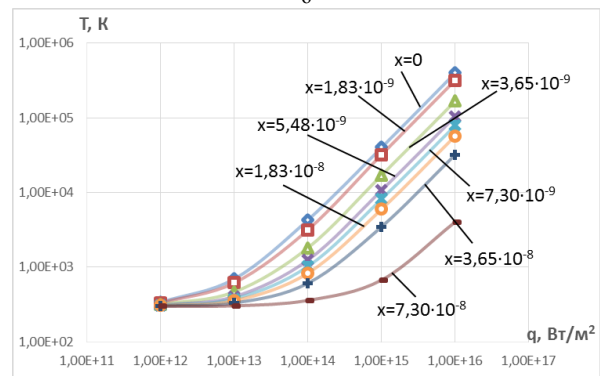
Видно, что максимальная температура растёт с увеличением плотности теплового потока. Для больших времён (10<sup>-10</sup> с) НС образуется при плотностях теплового потока  $q=10^{12} - 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>, с уменьшением времени до 10<sup>-12</sup> с и 10<sup>-13</sup> с область образования НС перемещается в диапазон  $q=10^{13} - 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>, а для минимальных времён 10<sup>-14</sup> с, 10<sup>-15</sup> с и 10<sup>-16</sup> с НС реализуется в основном в области тепловых потоков  $q=10^{15} - 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> (рис.2).



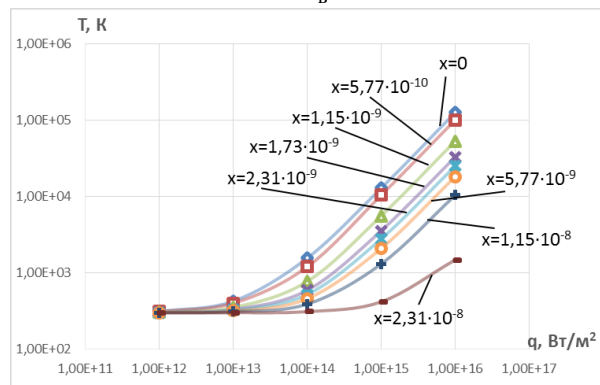
а



б



в



г

Рис. 2 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на СМЧ28.48 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

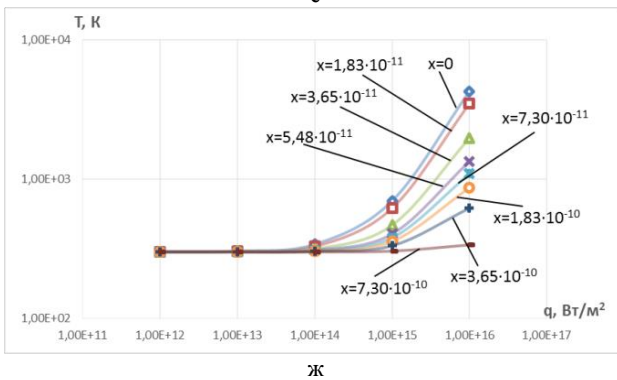
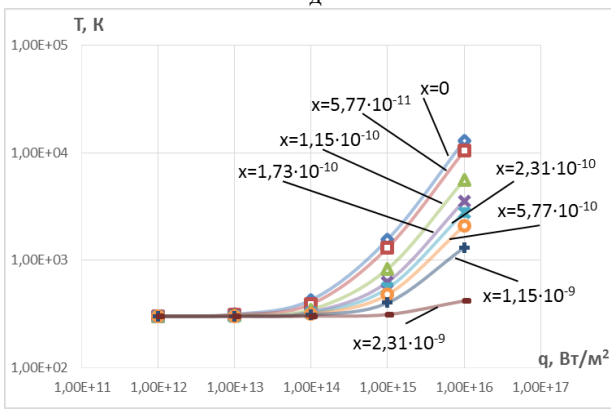
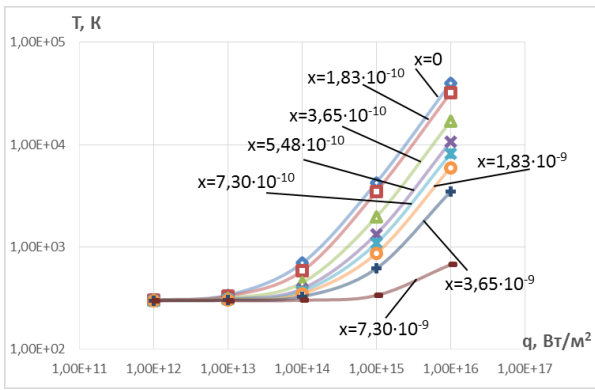
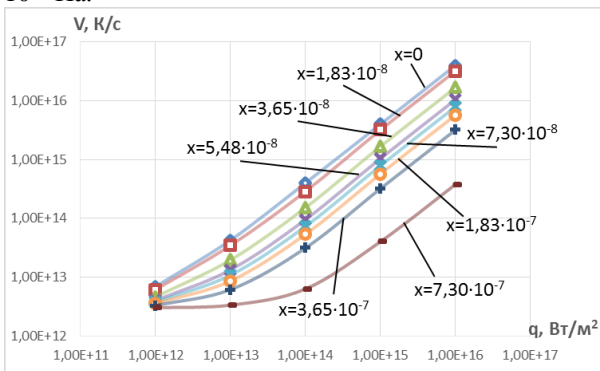


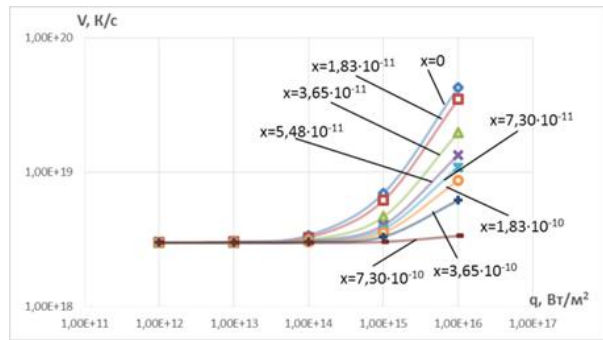
Рис.2 – Окончание

Скорость изменения максимальной температуры превышает  $10^7$  K/c, а значит по этому критерию всегда могут образовываться НС (рис.3).

Температурные напряжения определяют, как возможность ускорения образования НС ( $10^7$  Па), так и позволяют непосредственно образовывать НС при превышении значений температурных напряжений  $10^{10}$  Па.



а

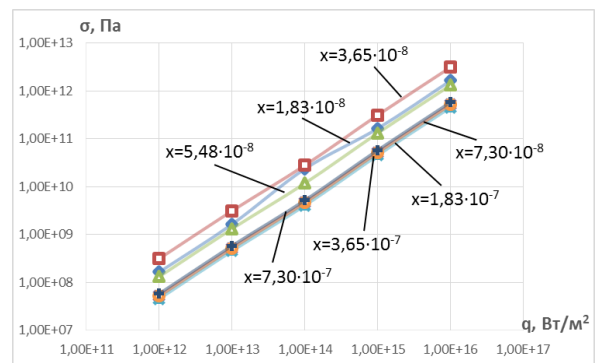


б

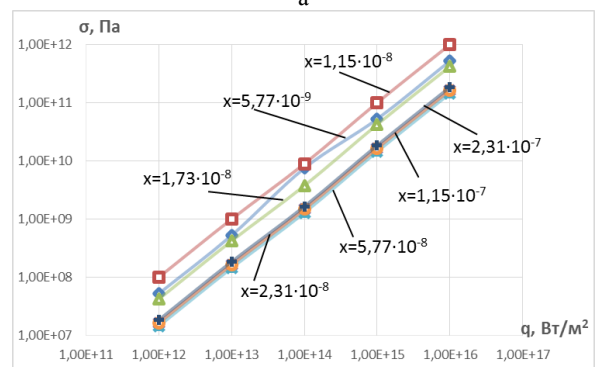
Рис.3 Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на СМЧ28.48 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а -  $t=10^{-10}$  с; б -  $t=10^{-11}$  с; в -  $t=10^{-12}$  с; г -  $t=10^{-13}$  с; д -  $t=10^{-14}$  с; е -  $t=10^{-15}$  с; ж -  $t=10^{-16}$  с

Анализ зависимостей температурных напряжений от плотности теплового потока показывает, что существуют режимы при временах  $10^{-10}$  с,  $10^{-11}$  с и  $10^{-12}$  с, при которых есть реальная возможность получения НС за счёт действия температурных напряжений, при дальнейшем уменьшении времён вероятность этого механизма образования НС снижается и реализуется только на ряде глубин порядка  $10^{-9}$  м, а при временах  $10^{-15}$  с и  $10^{-16}$  с температурные напряжения могут только ускорить образование НС (рис.4).

Технологу необходимо знать на каких глубинах есть вероятность образования НС, и какой объём зерна получится, поэтому были построены зависимости объёма зерна от максимальной и минимальной глубины залегания НК при действии ЛИ с различной плотностью теплового потока ( $q$ ) для радиуса пятна контакта  $R=10^{-6}$  м (рис.5) и  $R=5 \cdot 10^{-7}$  м (рис.6).



а



б

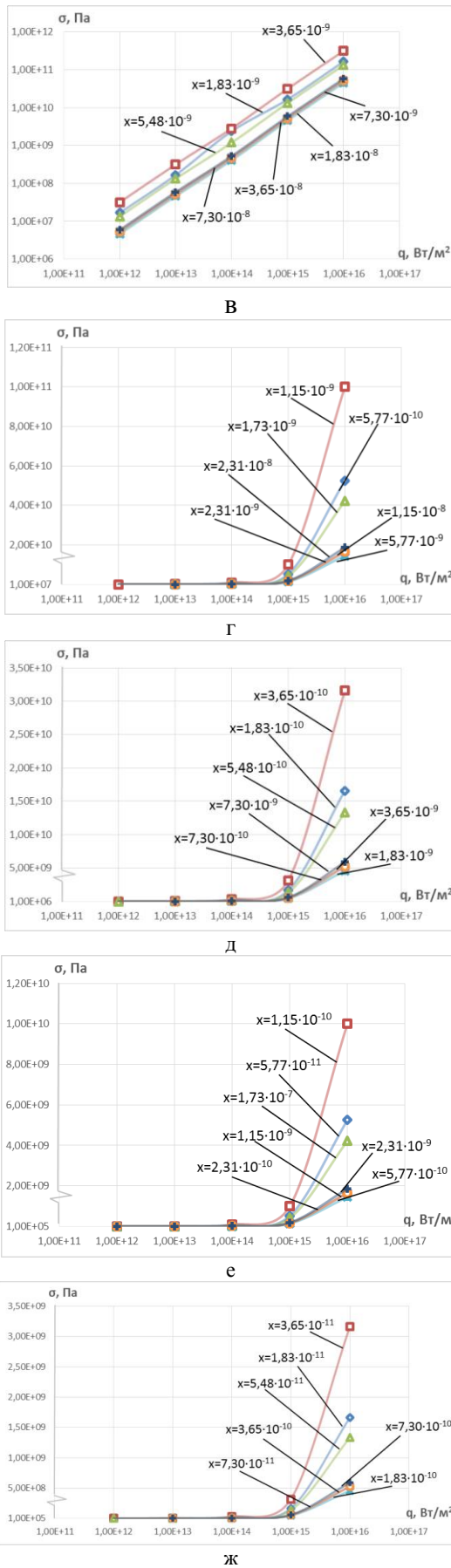


Рис. 4 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на СМЧ28.48 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а -  $t=10^{-10}$  с; б -  $t=10^{-11}$  с; в -  $t=10^{-12}$  с; г -  $t=10^{-13}$  с; д -  $t=10^{-14}$  с; е -  $t=10^{-15}$  с; ж -  $t=10^{-16}$  с

На этих рисунках пунктиром обозначена зона, ниже которой образуются НС, а выше – нет. Видно, что при радиусе пятна  $R=5 \cdot 10^{-7}$  м технологических параметров, при которых объём зерна соответствует образованию НС гораздо больше, то есть надо стремиться к гораздо меньшим размерам пятна контакта ЛИ с деталью.

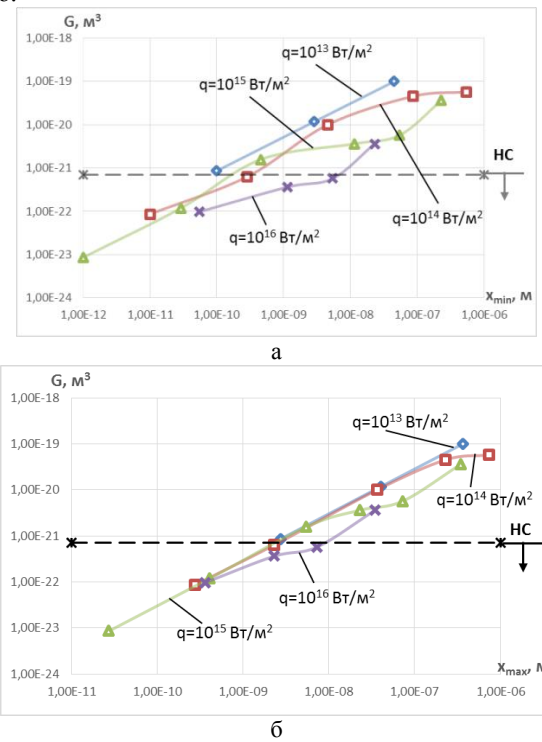


Рис. 5 – Зависимость объёма нанокластера  $R=10^{-6}$  м от минимальной (а) и максимальной (б) глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока  $q$  (СМЧ28.48)

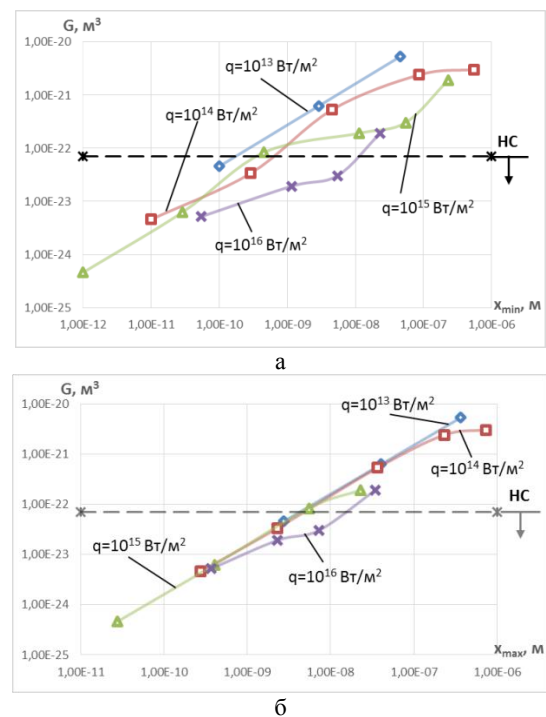


Рис. 6 – Зависимость объёма нанокластера ( $R=5 \cdot 10^{-7}$  м) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока  $q$  (СМЧ28.48)

Проводились исследования как общего объёма зерна, по которому определялся размер зерна (предположение о сферической форме зерна) а также оценивалась толщина слоя, где развивается зерно.

В случае получения размера зерна по величине его объёма для радиуса пятна лазерного луча в  $10^{-6}$  м реализуется только в режиме для получения наноструктур с плотностью теплового потока  $q=10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup> и времени его действия  $10^{-16}$  с, тогда как при радиусе лазерного луча  $R=5 \cdot 10^{-6}$  м режимами с образованием НС реализуются: 1.  $q=10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $t=10^{-12}$  с; 2.  $q=10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup> и  $t=10^{-14}$  и  $10^{-13}$  с; 3.  $q=10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup> и  $t=10^{-16}$  и  $10^{-15}$  с; 4.  $q=10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> и  $t=10^{-14}$ ,  $10^{-15}$ ,  $10^{-16}$  с.

Для экспресс-оценки необходимо иметь зависимости объёма нанокластера от плотности теплового потока ЛИ и времени его действия, что позволит быстро оценить технологические параметры получения НС. Так на рисунках 7 и 8 представлены зависимости объёма нанокластера от плотности теплового потока ЛИ и времени его действия для пятна контакта  $R=10^{-6}$  м (рис.7) и  $R=5 \cdot 10^{-7}$  м (рис.8). Эти графики подтверждают тот тезис, что уменьшение размера зоны контакта ЛИ с деталью приводит к увеличению вероятности образования НС.

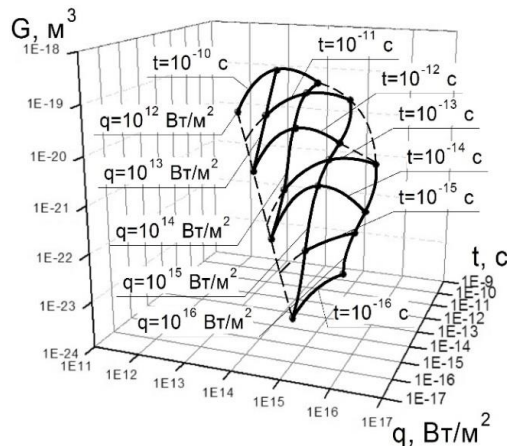


Рис. 7 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения –  $q$  и времени его действия  $t$  в зоне, где образуются наноструктуры ( $R=10^{-6}$  м) (СМЧ28.48)

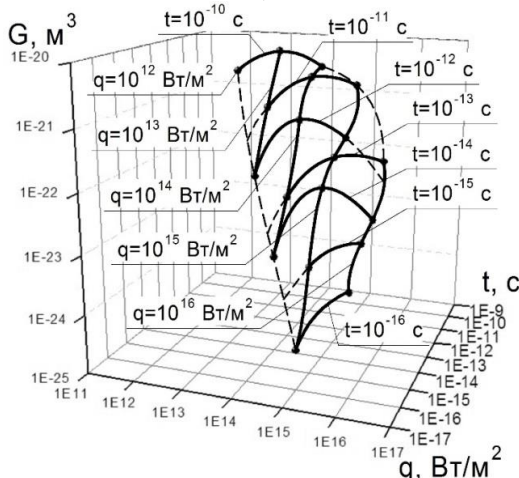


Рис. 8 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения –  $q$  и времени его действия  $t$  в зоне, где образуются наноструктуры ( $R=5 \cdot 10^{-7}$  м) (СМЧ28.48)

Слои наноструктурной толщины реализуются практически при всех режимах. Это говорит о том, что кроме тех режимов, при которых гарантировано, получают НС (по объёму зерна) есть вероятность в режимах близких к необходимым для получения НС по объёму зерна будет расширена область технологических параметров, при которых реализуются наноструктуры, поэтому при оценке технологических параметров образования НС будет учитывать и близкие к ним режимы.

#### Выводы.

1 Показана возможность с помощью фемтосекундного лазера получать НС на специальном чугуна (хромисто-кремниевом), как за счёт основных критериев получения НС (диапазон температур и превышения скорости роста температур  $10^7$  К/с), так и за счёт действия температурных напряжений.

2 Впервые показано, что есть реальная возможность получения наноструктурных слоёв на определённых глубинах, где зерно имеет вытянутую форму, но толщина его меньше предельной для наноструктуры (100 нм). 3 Показана возможность предварительной оценки технологических параметров ЛИ фемтосекундного лазера необходимых для получения НС.

#### Список литературы

1. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наноструктурными модифицированными слоями: Монография-справочник: в 2 кн./Г.И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2017. – Кн.2. Лазерные технологии. – 507 с.
2. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наноструктурными модифицированными слоями: Моногр.-справ.: в 2 кн. / Г. И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
3. 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.
4. 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.
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.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий.–596 с.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
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.

**Bibliography (transliterated)**

1. *Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem* [Tekst]: sprav. G.I. Kostyuk. Kiev. Vid-vo «Planeta print», 2017. - 507 p.
2. *Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem* [Tekst]: sprav. G.I. Kostyuk. Kiev. Vid-vo «Planeta print», 2016. - 735 p.
3. *Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur* [Tekst]: monogr. G.I. Kostyuk. Kiev. Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. - 472 p.
4. *Kostyuk, G.I. Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy* [Tekst]: monogr. G.I. Kostyuk. Kiev.: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. - 648 p.
5. *Kostyuk, G. I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy nanoseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 1: *Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionnoluchevykh, plazmennyykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and combined technologies]. 596 p.
6. *Kostyuk, G. I. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy nanoseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 2: *Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya* [Reference for calculation of the main physical and technological parameters, assessing opportunities, selecting the type of technologies and equipment]. 482 p.
7. *Kostyuk, G.I. Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost'* [Tekst]: ucheb.posobiye. G.I. Kostyuk. Kharkov. Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2009. 406 p.
8. *Kostyuk, G.I. Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy* [Tekst]: ucheb.posobiye G.I. Kostyuk. Kharkov. Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2008. - 552 p.
9. *Kostyuk, G.I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem* [Tekst]: monogr.-sprav. G.I. Kostyuk. Kharkov. Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2007. - 633 p.
10. *Aksenov, I.I. Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy* [Tekst] / I.I. Aksenov. Kharkov: Izd-vo NII «KHFTI», 2005. 211 p.
11. *Gusev, A.I. Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Tekst] / A.I. Gusev. - Moscow. Fizmatlit, 2005. 416 p.
11. *Andriyevskiy, R.A. Nanomaterialy: kontsepsiya i sovremnyye problemy* [Tekst] R.A. Andriyevskiy. Fizika metallov i metallovedeniye. 2003. Vol. 91, No 1. pp.50 - 56.

Поступила (received) 15.03.17

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Перспективы получения наноструктур на специальном чугуна при действии фемтосекундного лазера / Г. И. Костюк, С.А. Воляк, А.В. Евсеенко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 75–80. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

**Перспективы получения наноструктур на специальном чугуна при действии фемтосекундного лазера / Г. И. Костюк, Е.А. Воляк, А.В. Евсеенко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 75–80. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

**Prospects for obtaining nanostructures on special cast iron under the action of a femtosecond laser / G.Kostiuk, E. Volyak, A. Eseenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P.78–80. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-004X.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Костюк Геннадій Ігорович** – доктор технічних наук, професор Національного аерокосмічного університету ім. Жуковського М.С. «ХАІ», тел. : (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Костюк Геннадий Игоревич** – доктор технических наук, профессор Национального аэрокосмического университета им. Жуковского Н.Е. «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Kostyuk Gennady Igorevich** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the National Aerospace University. Zhukovsky N.E. "KhAI", tel.: (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Воляк Олена Олександрівна** - кандидат технічних наук Національного аерокосмічного університету ім. Жуковського М.С. «ХАІ», тел. : (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Воляк Елена Александровна** – кандидат технических наук Национального аэрокосмического университета им. Жуковского Н.Е. «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Volyak Elena Aleksandrovna** - Candidate of Technical Sciences of the National Aerospace University. Zhukovsky N.E. "KhAI", tel. : (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Евсеенкова Ганна Володимирівна** - студентка кафедри теоретичної механіки, машинознавства і робото-механічних систем, Національного аерокосмічного університету ім. Жуковського М.С. «ХАІ», тел. : (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Евсеенкова Анна Владимировна** – студентка кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национального аэрокосмического университета им. Жуковского Н.Е. «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Yevseenkova Anna Vladimirovna** - student of the Department of Theoretical Mechanics, Machine Science and Robot Mechanics, National Aerospace University. Zhukovsky N.E. "KhAI", tel. : (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.