

doi: 10.32620/oikit.2023.97.07

УДК 538.95

Ю.В. Широкий,
Ю.О. Сисоєв,
О.В. Торосян,
Г.Д. Торосян-Жидеєва

Вибір технологічних параметрів лазера для отримання наноструктур на інструментальній сталі У12А

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна

За вдосконаленою моделлю теплової взаємодії лазерного випромінювання та оброблювального матеріалу було проведено дослідження зміни максимальної температури на різних глибинах поверхневого шару на прикладі інструментальної сталі У12А. Також досліджувались швидкості зміни максимальної температури та температурної напруги від щільності теплового потоку лазерного випромінювання (ЛВ).

Діапазон щільності ЛВ брався у межах $q=10^8 \dots 10^{11}$ Вт/м² за різних часів його дії, що відповідає умовам можливого виникнення НС. Дослідження залежності швидкості зміни максимальної температури на сталі У12А від щільності теплового потоку на різних глибинах показало, що за всіх часів його дії реалізуються швидкості зміни температури більше 10⁷ К/с, що свідчить про те, що за цим критерієм утворення НС можливе на всьому діапазоні щільностей теплового потоку та на всіх досліджених глибинах. Для визначення можливості прискорення утворення НС були розраховані значення температурних напруг у зоні дії на У12А при щільності 10⁸...10¹¹ Вт/м² на різних глибинах при часі дії $t=10^{-4} \dots 10^{-10}$ с. Які показали, що безпосереднє утворення НС від дії температурних напруг практично неможливе, однак, при часі 10⁻⁵...10⁻⁴ з їхнього значення наближаються до необхідних при щільності теплового потоку 10¹¹ Вт/м². Для визначення технологічних параметрів, що забезпечують отримання НС, були побудовані просторові залежності обсягу НС від щільності теплового потоку та часу його дії для радіусу плями R=10⁻⁶ м (рис. 8) та R=5•10⁷ м (рис. 9). Визначено, що отримання НС реальніше для розміру плями 5•10⁷ м, хоча ймовірність їх отримання теж невисока. На рис. 10 та 11 показані аналогічні залежності для розміру зерна від щільності теплового потоку та часу його дії для розміру плями R=10⁻⁶ м та R=5•10⁷ м при дії на інструментальну сталь У12А. Отримані просторові залежності дозволяють, знаючи необхідний розмір зерна, вибрати технологічні параметри, що дозволяють їх реалізувати. Все це буде затребувано при розробці технології отримання зміцнювальних наноструктурованих покриттів на різальному інструменті.

Ключові слова: температура, швидкість зростання температури, температурні напруги, технологічні параметри, лазерне випромінювання, наноструктури.

Введення

Сучасні наукові дослідження наноструктурованих матеріалів [1] та наноструктур [2,3] зумовлені як можливістю появи нових матеріалів [4], так і появою нових властивостей у вже відомих матеріалах після виникнення на їхній поверхні наноструктур [5,6]. Це значно розширює можливості використання цих матеріалів [7], особливо у авіаційній та космічній галузях [8].

За останній час у сучасній науковій виданнях з'явилося досить багато оригінальних робіт та монографій присвячених отриманню наноструктур (НС) плазмовими методами [9,10], хімічними методами та іншими [11,12]. У той же час

досліджень отримання НС при дії лазерного випромінювання (ЛВ) як теоретичних [13,14], так і експериментальних робіт [15] значно менше.

Особливої уваги заслуговують перспективи створення наноструктурних шарів на деталях та різальному інструменті (PI) [16]. Так, наприклад, інструменти зі сталі У12А в даний час практично не використовуються через невисокі експлуатаційні характеристики цих інструментів, а при створенні на їх поверхні наноструктурних шарів існує велика ймовірність підвищення їх працездатності та ефективності за рахунок унікальних властивостей НС [17]. У наноструктурному шарі суттєво підвищується твердість, а отже, підвищиться і зносостійкість PI [18]. Створення наноструктурних шарів з різним розміром зерна по глибині може забезпечити утворення шару зі стискаючими залишковими напруженнями, що призведе до збільшення міцності втомі, а зниження модуля пружності в наноструктурному шарі забезпечить високу опірність ударним навантаженням [19]. Все це свідчить про своєчасність досліджень у цьому напрямі, які, очевидно, матимуть практичне застосування.

1. Теоретична частина

Для вирішення вище зазначеного завдання візьмемо раніше розроблену модель теоретичних процесів у зоні дії лазерного випромінювання [20, 21], де при описі характеру теплового впливу іонізованого випромінювання на матеріал враховуються як теплофізичні, так і термомеханічні процеси [22]. Слід відзначити, що у запропонованій моделі [23] лише частково враховується вплив енергії, що витрачається на кристалізацію при утворенні НС. Так у роботах [19, 23] розглядався вплив енергії кристалізації в окремих температурних площинах, а в [24, 25] при об'ємному розгляді температурних полів тільки для матеріалу з високим коефіцієнтом теплопровідності. Також надалі необхідно розглянути теплофізичні та термомеханічні характеристики різних непрозорих матеріалів при формуванні в їх поверхнях НС за допомогою лазерного випромінювання, причому як розраховані квантово-механічними методами, так і отримані стохастичним методом.

Все вище зазначене дозволить наблизити розрахункові параметри до фізичних, а значить дасть можливість з більшою точністю визначити технологічні параметри лазера для отримання НС, що і свідчить про актуальність та важливість дослідження.

1.1. Теоретична модель та постановка задачі дослідження

В раніше опублікованих нами працях [26, 27] при описі характеру теплового впливу ЛВ на матеріал через рівняння теплового балансу ми вирішували спільне завдання теплопровідності та термопружності, де враховували енергію утворення НС [21, 17]. Використовуючи цю модель, розраховували поля температур в зоні дії випромінювання [26]. Після чого, використовуючи отримані значення температур, визначали температурні напруження, завдяки яким коригували не тільки температуру, а й швидкість її зростання, що є необхідними умовами для формування наноструктур [26,17]. Тому більш точне знаходження області матеріалу деталі або PI, де створюються умови для утворення НС, дозволить виділити об'єм, в якому реалізуються НС, та визначити його залежність від технологічних параметрів ЛВ. Перевірочні розрахунки будемо проводити для сталі У12А.

2. Результати розрахунку та їх обговорення

Використовуючи раніше запропоновану теплову модель [20, 21], з урахуванням впливу енергії кристалізації [24], проведено дослідження зміни максимальної температури на різних глибинах поверхневого шару досліджуваного матеріалу (X_0 - X_7). Також досліджувались швидкості зміни максимальної температури та температурної напруги від щільності теплового потоку ЛВ. Діапазон щільності ЛВ брався у межах $q = 10^8 \dots 10^{11}$ Вт/м² за різних часів його дії, що відповідає умовам можливого виникнення НС.

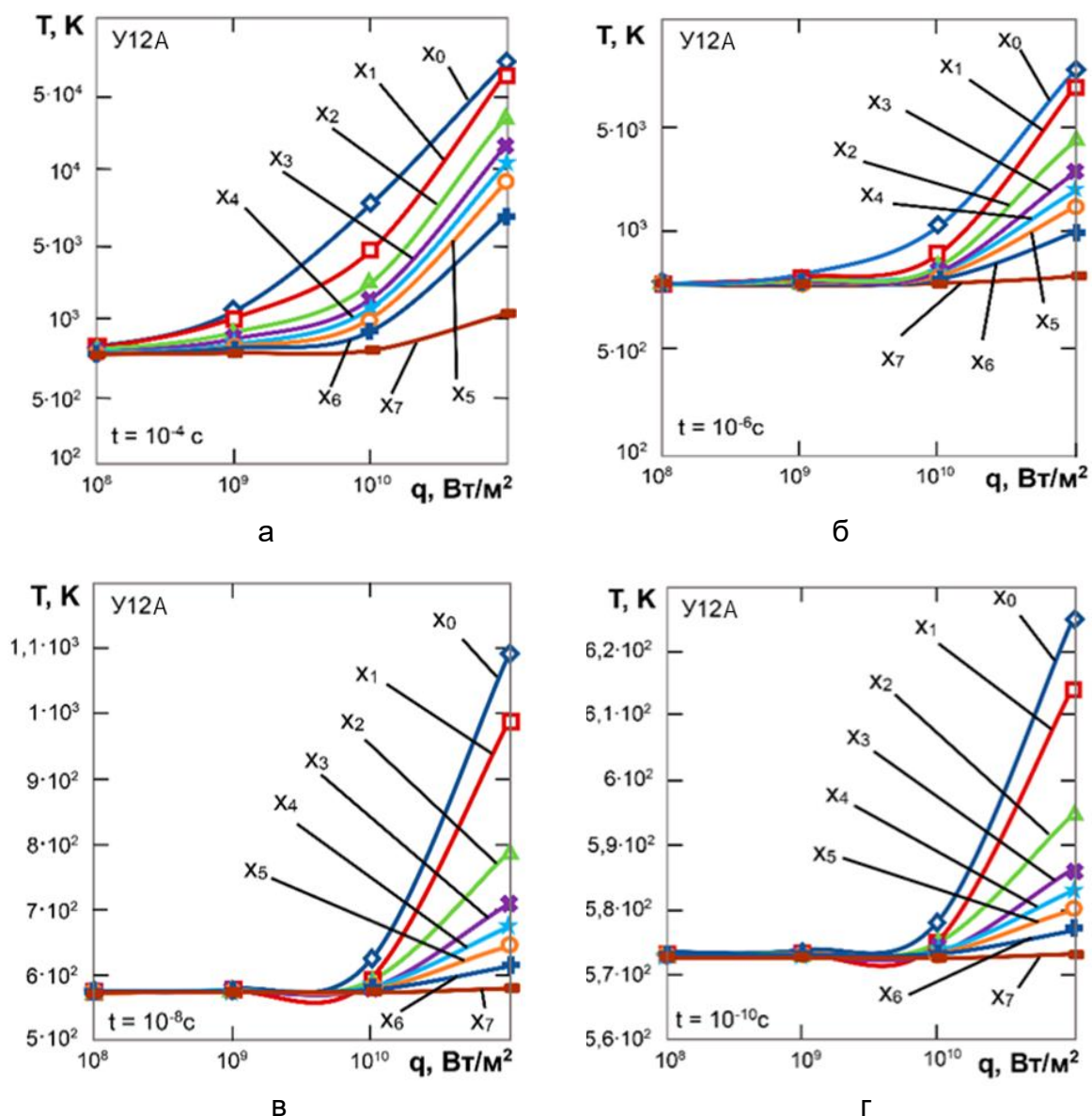


Рис. 1. Залежність максимальної температури у зоні дії ЛВ на У12А від щільності теплового потоку на різних глибинах та з різним часом дії

Так, на рис. 1 показана залежність максимальної температури в зоні дії на сталь У12А від щільності теплового потоку на різних глибинах при часі його дії від $t = 10^{-10}$ с до $t = 10^{-4}$ с. З отриманої залежності (рис. 1) видно, що при великому

часі дії теплового потоку практично для всіх густин теплового потоку є зони, де реалізується діапазон температур ($t = 10^{-6} \dots 10^{-4}$ с), необхідний для отримання НС [23, 17]. При тому, що вже при 10^{-7} с необхідні температури реалізуються тільки за щільністю теплового потоку у діапазоні $q=10^{10} \dots 10^{11}$ Вт/м². З подальшим зменшенням часу дії критерій отримання НС за температурою реалізується в основному при щільності теплового потоку 10^{11} Вт/м², причому зі зменшенням часу зона НС переміщується все ближче до поверхні, і при 10^{10} Вт/м² можлива її реалізація тільки поблизу поверхні матеріалу, що оброблюється (рис. 1).

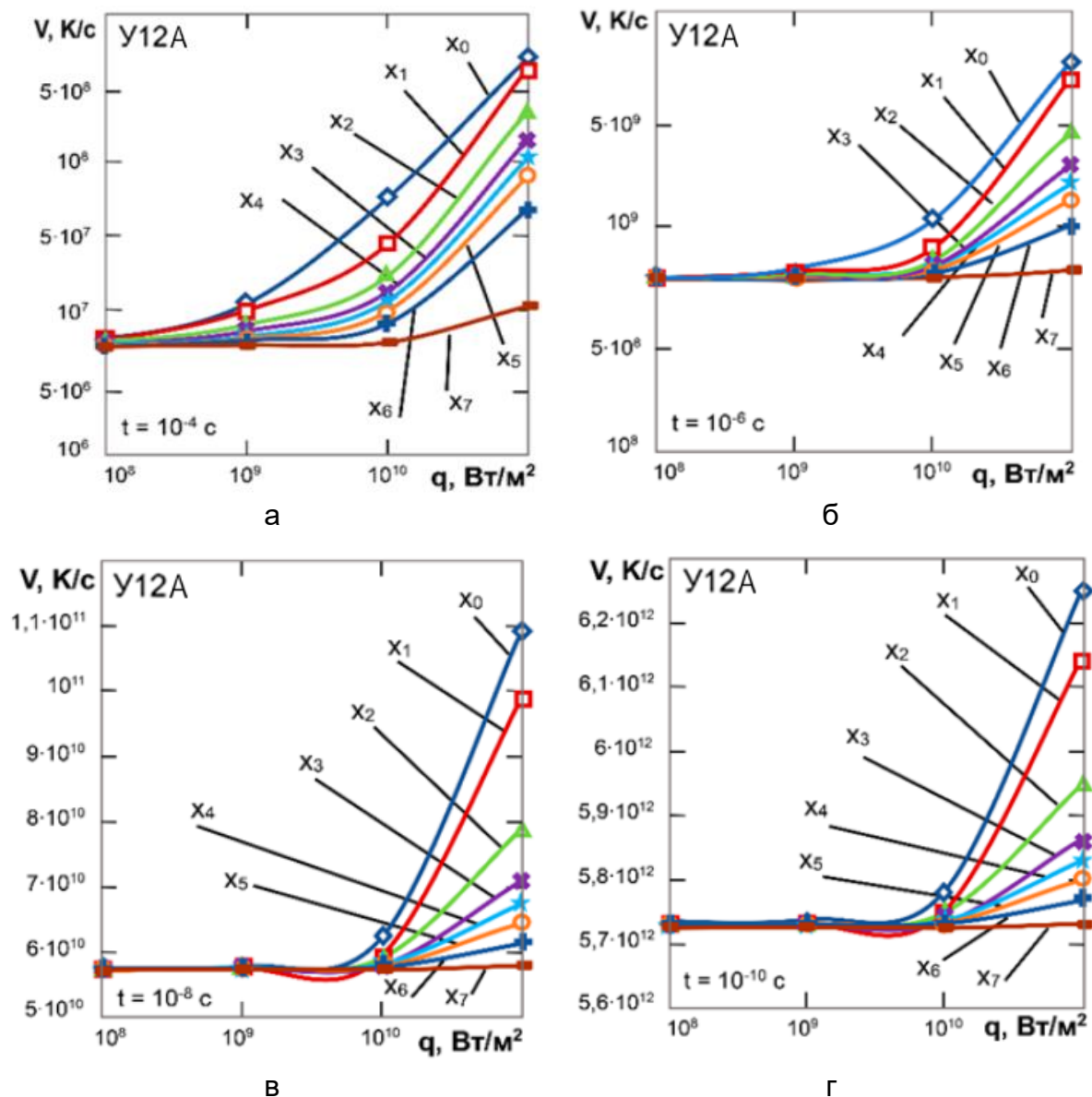


Рис. 2. Залежність швидкості зміни температури у зоні дії ЛВ на У12А від щільності теплового потоку на різних глибинах та з різним часом дії

Дослідження залежності швидкості зміни максимальної температури на сталі У12А від щільності теплового потоку на різних глибинах показало, що за всіх часів його дії реалізуються швидкості зміни температури більше 10^7 К/с. Це

свідчить про те, що за цим критерієм утворення НС можливе на всьому діапазоні щільностей теплового потоку упродовж всього часу його дії та на всіх досліджених глибинах (рис. 2).

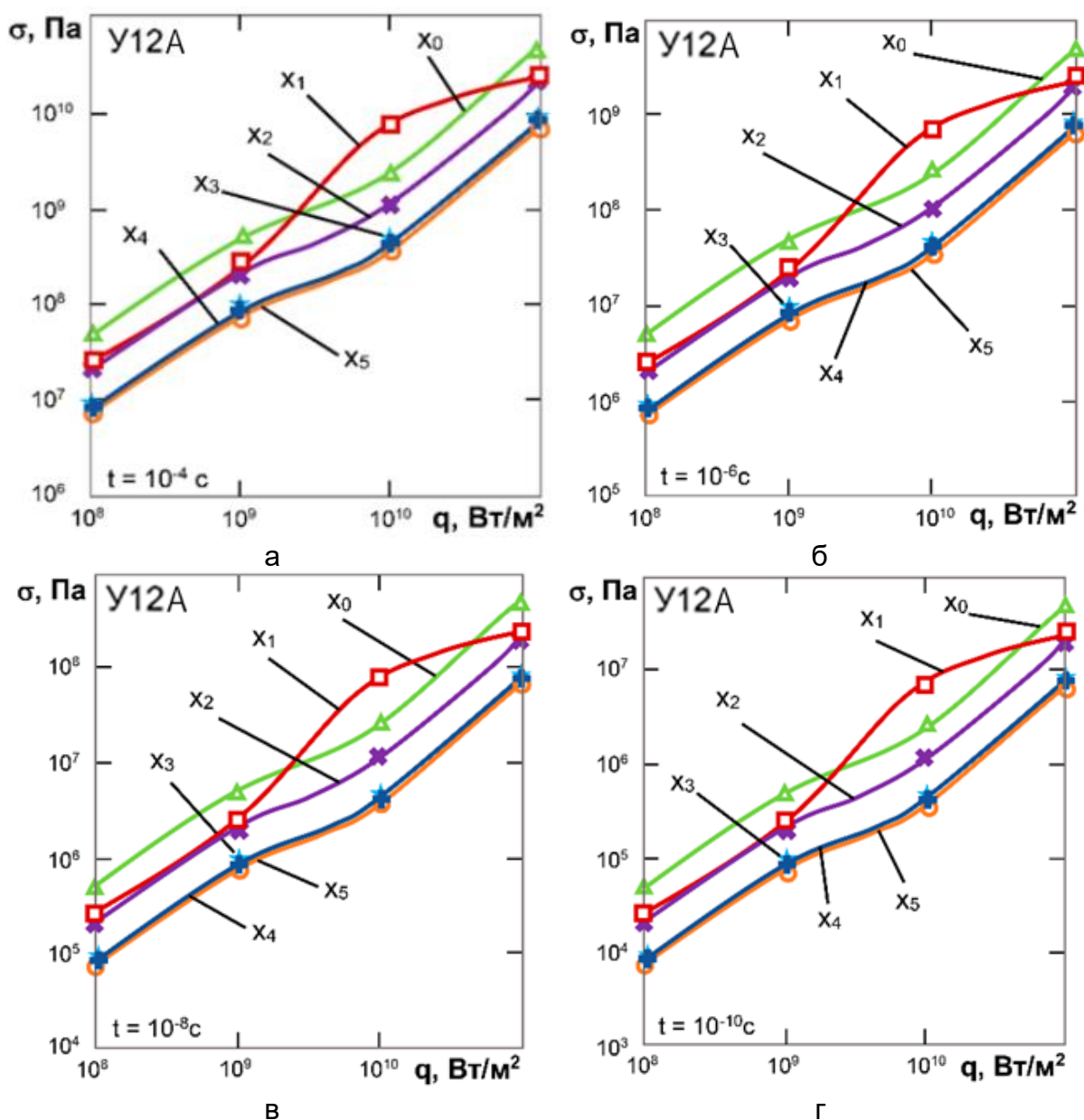
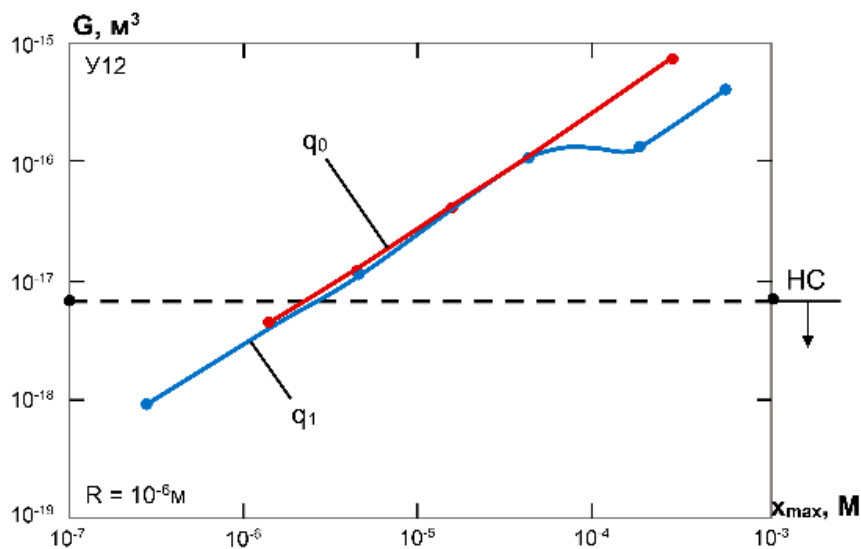


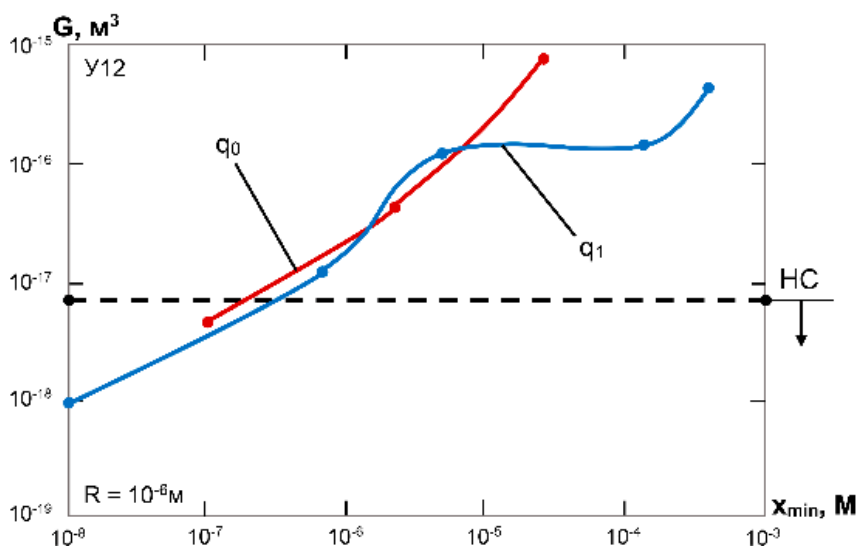
Рис.3. Залежність температурної напруги в зоні дії ЛВ на У12А від щільності теплового потоку на різних глибинах X_1 - X_5 з часом дії $t=10^{-4} \dots 10^{-10}$ с

Для остаточної перевірки умов отримання НС необхідна оцінка температурних напруг, які повинні бути більше 10^{10} Па. Для визначення можливості прискорення утворення НС температурні напруги повинні бути в діапазоні $10^7 \dots 10^9$ Па [17, 19]. Тому для вищезазначених режимів були розраховані значення температурних напруг у зоні дії ЛВ на У12А при щільності $10^8 \dots 10^{11}$ Вт/м² на різних глибинах при часі дії $t=10^{-4} \dots 10^{-10}$ с (рис. 3). Видно, що безпосереднє утворення НС від дії температурних напруг практично

неможливе, однак, при часі $10^{-5} \dots 10^{-4}$ с з їхнього значення наближаються до необхідних при щільності теплового потоку 10^{11} Вт/м². У всіх інших випадках температурні напруги лежать у межах $10^4 \dots 10^5$ Па, причому необхідні мінімальні значення температурних напруг реалізуються далеко не у всьому діапазоні щільностей теплового потоку, і при часі 10^{-10} і 10^{-9} с вони реалізуються тільки при щільності теплового потоку $10^{10} \dots 10^{11}$ Вт/м².

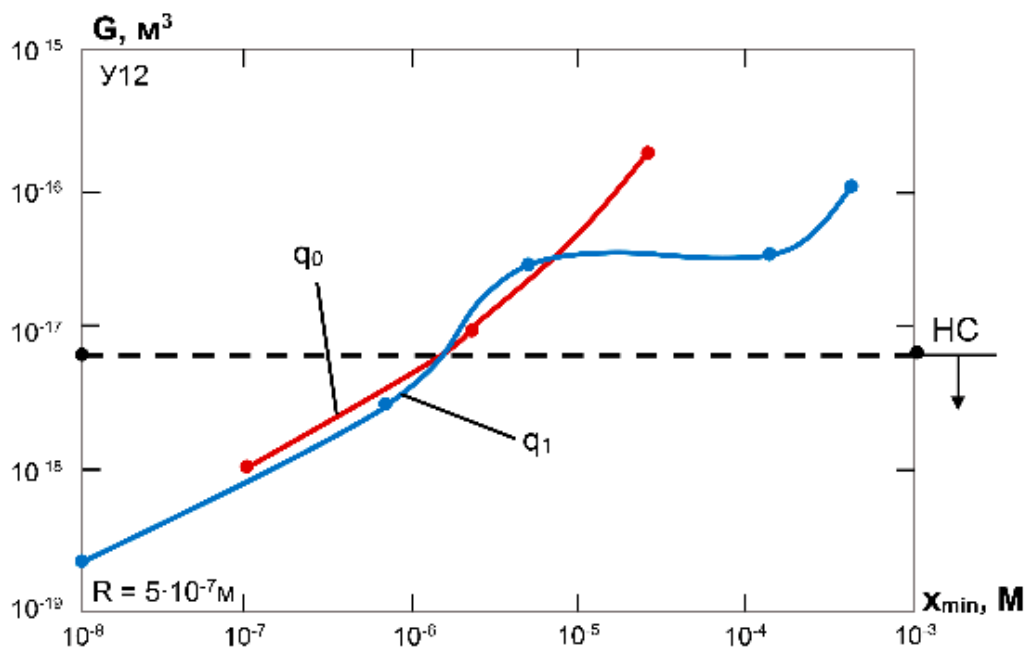


а

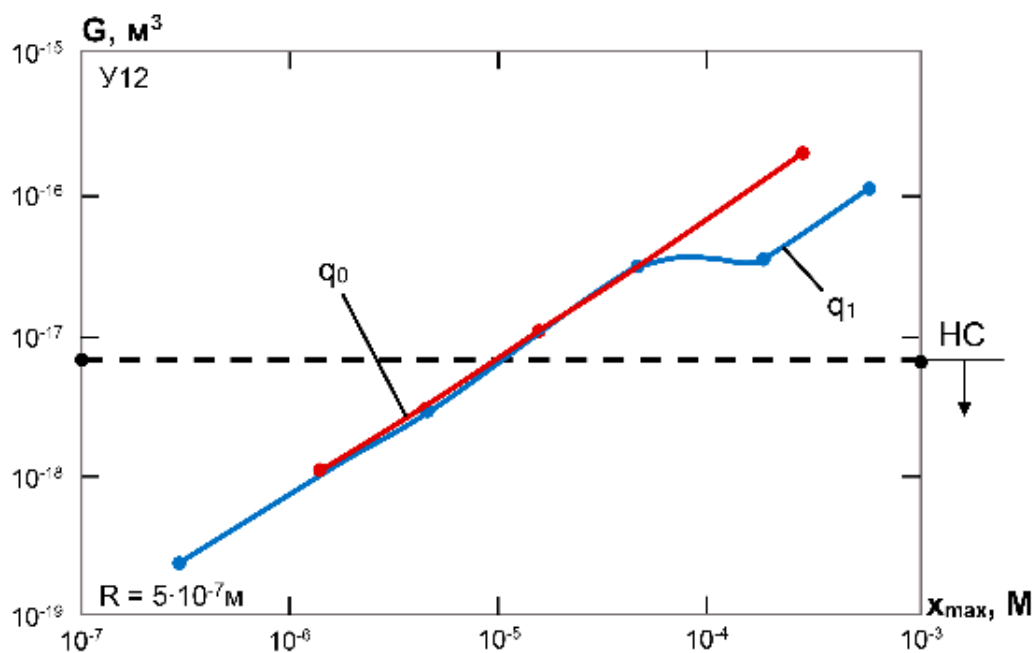


б

Рис. 4. Залежність об'єму нанокластера від мінімальної (а) та максимальної (б) глибини його залягання при дії ЛВ $R=10^{-6}$ м з різною щільністю теплового потоку q_0 та q_1



а



б

Рис. 5. Залежність об'єму нанокластера від мінімальної (а) та максимальної (б) глибини його залягання при дії ЛВ $R=5 \cdot 10^{-7}$ м з різною щільністю теплового потоку q_0 та q_1

Зі зростанням часу дії теплового потоку цей діапазон розширюється, а з часом дії 10^{-7} с в нього вже входить тепловий потік зі щільністю 10^{10} Вт/м², а з часом дії 10^{-6} с збільшується глибина, на якій можлива реалізація необхідного діапазону температурних напруг для прискорення утворення НС (рис. 3).

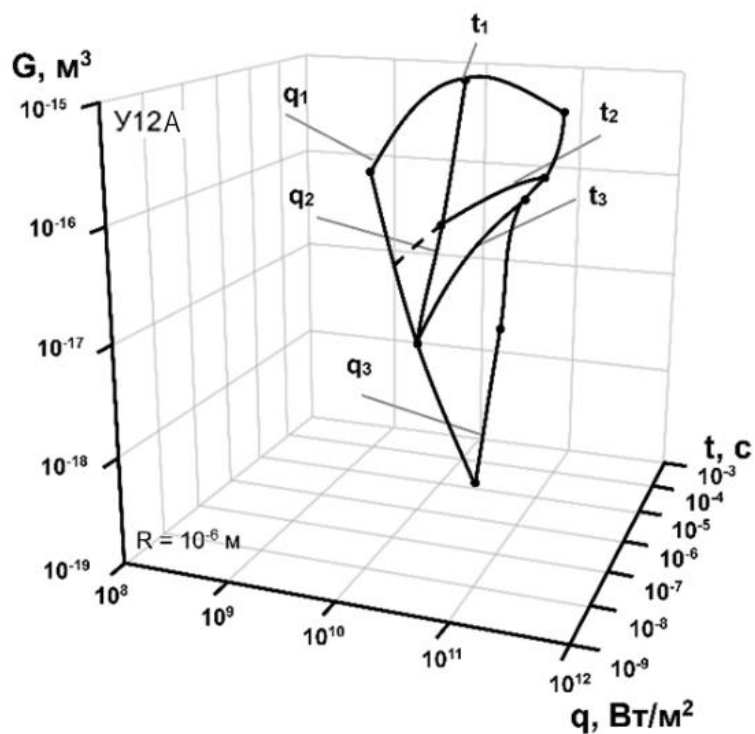


Рис. 6. Залежність об'єму нанокластера від щільності теплового потоку ЛВ q та часу його дії t у зоні де утворюються наноструктури

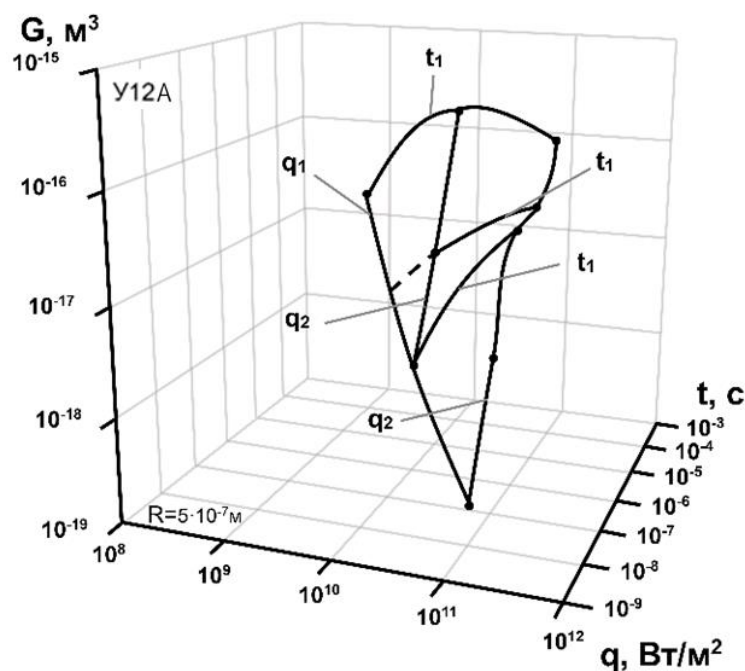


Рис. 7. Залежність об'єму нанокластера від щільності теплового потоку ЛВ q та часу його дії t в зоні, де утворюються наноструктури

Важливою характеристикою є розмір зерна, який, зрештою, визначає можливість реалізації утворення всього об'єму наноструктур. Тож на рис. 4 та рис. 5 надано об'єми нанокластера при радіусі плями $R=10^{-6}$ м і $R=5 \cdot 10^{-7}$ м залежно

від мінімальної (а) та максимальної (б) глибини при дії ЛВ з різною щільністю теплового потоку на сталь У12А. Бачимо, що розмір зерна, який забезпечує отримання наноструктур, лежить нижче пунктирної лінії для радіусу плями $R=5 \cdot 10^7$ м, а значить маємо значно більший діапазон технологічних параметрів, де можна реалізувати наноструктури. Аналогічні залежності для розміру зерна нанокластера від мінімальної та максимальної глибини його залягання показано на рис. 6 і рис. 7 при радіусі плями $R=10^{-6}$ м та $R=5 \cdot 10^{-7}$ м. Для визначення технологічних параметрів, що забезпечують отримання НС, були побудовані просторові залежності об'єму НС від щільності теплового потоку та з різним часом його дії для радіусу плями $R=10^{-6}$ м (рис. 6) та $R=5 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 7). Очевидно, що отримання НС ймовірніше для розміру плями з радіусом $R=5 \cdot 10^{-7}$ м, хоча вірогідність їх отримання теж невисока. Отримані результати дозволяють, знаючи необхідний розмір зерна, вибрати технологічні параметри необхідні для утворення НС.

Висновки

За вдосконаленою моделлю теплової взаємодії ЛВ та оброблювального матеріалу було проведено дослідження зміни максимальної температури на різних глибинах поверхневого шару на прикладі інструментальної сталі У12А. Також досліджувались швидкості зміни максимальної температури та температурної напруги від щільності теплового потоку ЛВ. Діапазон щільності ЛВ брався у межах $q=10^8 \dots 10^{11}$ Вт/м² з різним часом його дії, що відповідав умовам можливого виникнення НС.

Дослідження залежності швидкості зміни максимальної температури на сталі У12А від щільності теплового потоку на різних глибинах показало, що за всіх часів його дії реалізуються швидкості зміни температури більше 10^7 К/с, це свідчить про те, що за цим критерієм утворення НС можливе на всьому діапазоні щільностей теплового потоку та на всіх досліджених глибинах.

За критерієм безпосереднього утворення НС за рахунок дії температурних напруг цей критерій виконується в дуже вузькому діапазоні технологічних параметрів, але величини температурних напруг достатні для прискорення утворення НС ($10^7 \dots 10^9$ Па). В такому випадку діапазон технологічних параметрів досить значний.

Отримані залежності об'єму НС і розміру зерна від технологічних параметрів (щільності теплового потоку та часу його дії) показали, що є незначні діапазони технологічних параметрів, де критерії утворення НС виконуються.

Все це можна використовувати при розробці технології отримання зміцнювальних наноструктурованих покриттів на різальному інструменті.

Подяки

Автори висловлюють подяку Національному фонду досліджень України за підтримку (конкурс «Підтримка досліджень провідних та молодих учених», номер проекту 2020.02/0119).

Список літератури

1. Stojanovic, B. Application of aluminum and aluminum alloys in engineering. [Text] / B. Stojanovic, M. Bukvic, I. Epler // Applied Engineering Letters. – 2018. – Vol. 36, No. 2. – P. 52-63. DOI: 10.18485/aeletters.2018.3.2.2

2. Starke, E. A. Application of modern aluminum alloys to aircraft [Text] / E. A. Starke, J. T. Staley // *Progress in Aerospace Sciences*. – 1996. – Vol. 32, No. 2-3. – P. 131-172. [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(95\)00004-6](https://doi.org/10.1016/0376-0421(95)00004-6)
3. Plasma under control: Advanced solutions and perspectives for plasma flux management in material treatment and nanosynthesis [Text] / O. Baranov, K. Bazaka, H. Kersten, M. Keida, U. Cvelbar, S. Xu, I. Levchenko // *Applied Physics Reviews*. – 2017. – Vol. 4, No. 4. – P. 041302-1-041302-33. <https://doi.org/10.1063/1.5007869>
4. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry [Text] / W.S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vieregge // *Materials Science and Engineering*. – 2000. – Vol. 280, No. 1. – P. 37-49, ISSN 0921-5093. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00653-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00653-X).
5. Use of the ABI technique to measure the mechanical properties of aluminium alloys: Effect of heat-treatment conditions on the mechanical properties of alloys [Text] / Trudonoshyn, Oleksandr & Puchnin, Maxim & Prach, Olena // *Materiali in tehnologije*. – 2016. – Vol. 50, – P. 427-431. DOI: 10.17222/mit.2014.295.
6. Разработка комбинированной технологии для формирования поверхностного слоя авиационных конструкционных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.04 - технология производства летательных аппаратов / О. О. Баранов ; Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е.Жуковского "ХАИ" ; рук. Костюк Г. И. – Х., 2000. - 207 с.
7. Chromate-free chemical conversion coatings for aluminum alloys [Text] / Becker, Markus // *Corrosion Reviews*. – 2019. – Vol. 37, No. 4, – P. 321-342. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2019-0032>
8. Levchenko, I., Xu, S., Teel, G. *et al.* Recent progress and perspectives of space electric propulsion systems based on smart nanomaterials. *Nat Commun* 9, 879 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02269-7>
9. 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.
10. Физико-технические принципы нанесения традиционных и нанопокровов, комбинированного упрочнения для повышения эксплуатационных характеристик деталей и РИ: дис. канд. техн. наук. / О. О. Бруняка / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "ХАИ". - Х., 2010. - 261 с
11. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
12. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
13. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский // *Физика металлов и металловедение*. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.
14. 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.
15. 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.

16. Efficiency and Performance of Milling Using Cutting Tools with Plates of a New Class. / Kostyuk G., Popov V., Shyrokyi Y., Yevsieienkova H./ In: Tonkonogyi V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. (2021) https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_58

17. Перспективы применения лазерной обработки для создания наноструктур на РИ из «ВолКар» [Текст] / Г. И. Костюк, Ю. В. Широкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 26(1248). – С. 60-65. http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2017_26.pdf

18. Удосконалення комбінованої плазмово-іонної технології для отримання наноструктур на поверхні ріжучого інструменту : дис. канд. техн. наук : / А. О. Бреус // Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т", М-во освіти і науки України ; Харків, 2018. - 143 с

19. Концепція та принципи конструювання деталей агрегатобудування, їх ефективного формоутворення різальним інструментом з наноструктурами : дис. д-ра техн. наук. / В. В. Попов // М-во освіти і науки України, Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т". - Харків, 2020. - 505 с.

20. Исследование влияния технологических параметров лазерной обработки на поля температур и напряжений /Костюк Г. И., Широкий Ю. В., Исяк К. П. и др./ Вісті АІНУ. – 2009.– №1(38).-С.39 – 43.

21. Моделирование умов отримання наноструктур в алюмінієвих сплавах при дії іонізуючого випромінювання [Текст] / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоев, Т. В. Постельник //Авіаційно-космічно техніка та технологія: сб. науч. тр. Нац. аерокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2.- Х.-2022. – С.55-63 DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.2.07>

22. Оценка режимов лазерной обработки, при которых необходимо учитывать конечную скорость распространения тепла при решении совместной задачи теплопроводности и термоупругости / Ю.В. Широкий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». - Вып. 58.- Х.-2015. – С.33-40.

23. Удосконалення процесів створення наноструктур у плазмово-іонних та лазерних технологіях для підвищення ефективності різального інструменту : дис. канд. техн. наук : 05.03.07 - процеси фізико - техн. оброб. : 13 - мех. інженерія : захищ. 12.04.19 / І. В. Кантемир ; Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т. - Харків, 2018. - 190 с.

24. Shyrokyi Y., Kostyuk G. (2022) Investigation of the Influence of Crystallization Energy on the Size of Nanostructures During Copper Ion-Plasma Treatment. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 367. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_6

25. Теоретичне дослідження температурних полів міді при формуванні наноструктурних шарів у плазмовому середовищі [Текст]/ Ю.В. Широкий, А.Ю. Сисоев, Ю.С. Панченко //Авіаційно-космічно техніка та технологія: сб. науч. тр. Нац. аерокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 5.– Х.–2022. – С.51-60 DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.5.04>

26. Перспективы получения наноструктур при действии импульсного лазерного излучения на стали [Текст] / Г. И. Костюк, В. Н. Павленко, Ю. В. Широкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.:

НТУ «ХПІ», 2015. – № 40(1149). – С. 47-52. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.
<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/19994>

27. Теоретическое исследование действия ионизирующего излучения на конструкционные материалы и образование наноструктур в алюминиевом сплаве Д16Т [Текст] / Г. И. Костюк, Бехзад Размджуи, Ю. В. Широкий, Ю. С. Панченко / Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». - Вып. 68. – Х. –2015. – С.20-25.

References

1. Stojanovic, B., Application of aluminum and aluminum alloys in engineering. [Text] / B. Stojanovic, M. Bukvic, I. Epler // Applied Engineering Letters. – 2018. – Vol. 36, No. 2. – P. 52-63. DOI: 10.18485/aeletters.2018.3.2.2

2. Starke, E. A. Application of modern aluminum alloys to aircraft [Text] / E. A. Starke, J. T. Staley // Progress in Aerospace Sciences. – 1996. – Vol. 32, No. 2-3. – P. 131-172. [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(95\)00004-6](https://doi.org/10.1016/0376-0421(95)00004-6)

3. Plasma under control: Advanced solutions and perspectives for plasma flux management in material treatment and nanosynthesis [Text] / O. Baranov, K. Bazaka, H. Kersten, M. Keida, U. Cvelbar, S. Xu, I. Levchenko // Applied Physics Reviews. – 2017. – Vol. 4, No. 4. – P. 041302-1-041302-33. <https://doi.org/10.1063/1.5007869>

4. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry [Text] / W.S Miller, L Zhuang, J Bottema, A.J Wittebrood, P De Smet, A Haszler, A Vieregge // Materials Science and Engineering. – 2000. – Vol. 280, No. 1. – P. 37-49, ISSN 0921-5093. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00653-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00653-X).

5. Use of the ABI technique to measure the mechanical properties of aluminium alloys: Effect of heat-treatment conditions on the mechanical properties of alloys [Text] / Trudonoshyn, Oleksandr & Puchnin, Maxim & Prach, Olena // Materiali in tehnologije. – 2016. – Vol. 50, – P. 427-431. DOI: 10.17222/mit.2014.295.

6. Razrabotka kombinirovannoy tekhnologii dlya formirovaniya poverkhnostnogo sloya aviatsionnykh konstruksionnykh materialov : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.07.04 - tekhnologiya proizvodstva letatel'nykh apparatov / O. O. Baranov ; Nats. aerokosm. un-t im. N.Ye.Zhukovskogo "KHAI" ; ruk. Kostyuk G.I. - KH., 2000. - 207 p. (In Russian)

7. Chromate-free chemical conversion coatings for aluminum alloys [Text] / Becker, Markus // Corrosion Reviews. – 2019. – Vol. 37, No. 4, – P. 321-342. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2019-0032>

8. Levchenko, I., Xu, S., Teel, G. et al. Recent progress and perspectives of space electric propulsion systems based on smart nanomaterials. Nat Commun 9, 879 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02269-7>

9. Kostyuk, G. I. Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur [Tekst]: monogr. / G. I. Kostyuk. – K.: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. – 472 p. (In Russian)

10. Fiziko-tekhnicheskiye printsipy naneseniya traditsionnykh i nanopokrytiy, kombinirovannogo uprochneniya dlya povysheniya ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley i RI : dis. kand. tekhn. nauk. / O. O. Bruyaka / Nats. aerokosm. un-t im. N.Ye. Zhukovskogo "KHAI". - KH., 2010. - 261 p. (In Russian)

11. Grechikhin, L. I. Fizika nanochastits i nanotekhnologiy [Tekst] / L. I. Grechikhin. – M.: UP «Tekhnoprint», 2004. – 397 p. (In Russian)
12. Gusev, A. I. Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii [Tekst] / A. I. Gusev. – M.: Fizmatlit, 2005. – 416 p. (In Russian)
13. Andriyevskiy, R. A. Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy [Tekst] / R. A. Andriyevskiy// Fizika metallov i metallovedeniye. – 2003. – T. 91, № 1. – P. 50 – 56. (In Russian)
14. Kostyuk, G. I. Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy [Tekst]: monogr. / G. I. Kostyuk. – K.: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i inno-vats. tekhnologiy, 2012. – 648 p. (In Russian)
15. Kostyuk, G. I. Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Tekst]: monogr.-sprav. / G. I. Kostyuk. – KH.: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. – 633 p. (In Russian)
16. Efficiency and Performance of Milling Using Cutting Tools with Plates of a New Class. / Kostyuk G., Popov V., Shyrokyi Y., Yevsieienkova H./ In: Tonkonoyi V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. (2021) https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_58
17. Perspektyvy prymenenyya lazernoy obrabotky dlya sozdannya nanostruktur na RY yz «VolKar» [Tekst] / H.Y. Kostyuk, YU.V. Shyrokyy // Visnyk NTU «KHPI». Seriya: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. – KH.: NTU «KHPI», 2017. – № 26(1248). – P. 60-65 http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2017_26.pdf (In Russian)
18. Udoskonalennya kombinovanoyi plazmovo-ionnoyi tekhnolohiyi dlya otrymannya nanostruktur na poverkhni rizhuchoho instrumentu : dys. kand. tekhn. nauk : / A. O. Breus // Nats. aerokosm. un-t im. M. YE. Zhukovs'koho "Kharkiv. aviats. in-t", M-vo osvity i nauky Ukrayiny ; Kharkiv, 2018. – 143 p. (in Ukrainian)
19. Kontseptsiya ta pryntsypy konstruyuvannya detaley ahrehatobuduvannya, yikh efektyvnoho formoutvorenniya rizal'nym instrumentom z nanostrukturamy : dys. d-ra tekhn. nauk. / V. V. Popov // M-vo osvity i nauky Ukrayiny, Nats. aerokosm. un-t im. M. YE. Zhukovs'koho "Kharkiv. aviats. in-t". - Kharkiv, 2020. – 505 p. (in Ukrainian)
20. Issledovaniye vliyaniya tekhnologicheskikh parametrov lazernoy obrabotki na polya temperatur i napryazheniy / Kostyuk G.I., Shirokiy YU.V., Isyak K.P. i dr./ Vístí AÍNU. – 2009. - №1(38).-S.39 – 43. (In Russian)
21. Modelyuvannya umov otrymannya nanostruktur v alyuminiyevykh splavakh pry diyi ionizuyuchoho vprominyuvannya [Tekst] / YU.V. Shyrokyy, YU.O. Sysoyev, T.V. Postel'nyk //Aviatsiyno-kosmichno tekhnika ta tekhnolohiya: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta ym. N.E. Zhukovskoho «KHAY».- Vyp. 2.- KH.-2022. – P. 55-63 DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.2.07> (in Ukrainian)
22. Otsenka rezhimov lazernoy obrabotki, pri kotorykh neobkhodimo uchityvat' konechnuyu skorost' rasprostraneniya tepla pri reshenii sovместnoy zadachi teploprovodnosti i termouprugosti / YU.V. Shirokiy // Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta im. N.Ye. Zhukovskogo «KHA». - Vyp. 58.- KH. - 2015. – P. 33-40 (In Russian)
23. Udoskonalennya protsesiv stvorenniya nanostruktur u plazmovo-ionnykh ta lazernykh tekhnolohiyakh dlya pidvyshchennya efektyvnosti rizal'noho instrumentu : dys. kand. tekhn. nauk : 05.03.07 - protsesy fizyko - tekhn. obrob. : 13 - mekh.

inzheneriya : zakhysch. 12.04.19 / I. V. Kantemyr ; Nats. aerokosm. un-t im. M. YE. Zhukovskoho "Kharkiv. aviats. in-t. - Kharkiv, 2018. – 190 p. (in Ukrainian)

24. Shyrokyi Y., Kostyuk G. (2022) Investigation of the Influence of Crystallization Energy on the Size of Nanostructures During Copper Ion-Plasma Treatment. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 367. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_6

25. Teoretychne doslidzhennya temperaturnykh poliv midi pry formuvanni nanostrukturnykh shariv u plazmovomu seredovyschi [Tekst] / YU.V. Shyrokyi, A.YU. Sysoyev, YU.S. Panchenko //Aviatsiyno-kosmichno tekhnika ta tekhnolohiya: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta ym. N.E. Zhukovskoho «KHAY».- Vyp. 5.- KH.- 2022. – P. 51-60 DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2022.5.04> (in Ukrainian)

26. Perspektivy poluchenyya nanostruktur pry deystvy ymпульсноho lazernoho yzluchennya na staly [Tekst] / H.Y. Kostyuk, V.N. Pavlenko, YU.V. Shyrokyi // Visnyk NTU «KHPI». Seriya: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. – KH.: NTU «KHPI», 2015. – № 40(1149). – S. 47-52. – Bibliohr.: 9 nazv. – ISSN 2079-004X <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/19994> (In Russian)

27. Teoreticheskoye issledovaniye deystviya ioniziruyushchego izlucheniya na konstruktsionnyye materialy i obrazovaniye nanostruktur v alyuminiyevom splave D16T [Tekst] / G. I. Kostyuk, Bekhzad Razmdzhui, YU.V. Shirokiy, YU.S. Panchenko / Otkrytye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta im. N.Ye. Zhukovskogo «KHA». - Vyp. 68.- KH. - 2015. – P. 20-25 (In Russian)

Надійшла до редакції 20.04.2023, розглянута на редколегії 20.04.2023.

Selection of laser technological parameters for obtaining nanostructures on U12A tool steel

According to the improved model of the thermal interaction of laser radiation and the processing material, a study of the change in the maximum temperature at different depths of the surface layer was carried out on the example of tool steel U12A. The rate of change of the maximum temperature and temperature stress as a function of the heat flux density of laser radiation (LV) was also studied. The range of LV density was taken within $q=108...1011$ W/m² for different times of its action, which corresponds to the conditions for the possible occurrence of NS. The study of the dependence of the rate of change of the maximum temperature on U12A steel on the density of the heat flow at different depths showed that during all times of its action, rates of temperature change of more than 107 K/s are realized, which indicates that, according to this criterion, the formation of NS is possible over the entire range of densities heat flow and at all investigated depths. To determine the possibility of accelerating the formation of NS, the values of temperature stresses in the zone of action on U12A were calculated at a density of 108...1011 W/m² at different depths with an action time of $t=10^{-4} ...10^{-10}$ с. Which showed that the direct formation of NS from the action of temperature stresses is practically impossible, however, at a time of $10^{-5}...10^{-4}$ of their values, they approach those required at a heat flux density of 1011 W/m². In order to determine the technological parameters that ensure the production of NS, spatial dependences of the volume of NS on the heat flux density and the time of its action

were constructed for the radius of the spot $R=10\text{-}6$ m (Fig. 8) and $R=5\cdot 107$ m (Fig. 9). It was determined that obtaining NS is more realistic for the size of the spot $5\cdot 107$ m, although the probability of obtaining them is also low. In fig. 10 and 11 show similar dependences for the grain size on the heat flux density and the time of its action for the spot size $R=10\text{-}6$ m and $R=5\cdot 107$ m when acting on U12A tool steel. The obtained spatial pictures allow, knowing the required grain size, to choose the technological parameters that allow them to be implemented. All this will be required during the development of the technology for obtaining strengthening nanostructured coatings on the cutting tool.

Key words: temperatures, temperature growth rate, temperature stresses, technological parameters, laser radiation, nanostructures.

Відомості про авторів:

Широкий Юрій Вячеславович – кандидат технічних наук, доцент, кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна; i.shyrokyi@khai.edu; ORCID: 0000-0002-4713-0334

Сисоєв Юрій Олександрович – д-р техн. наук, старш. наук. співроб, проф. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Торосян Олена Василівна – асист. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Торосян-Жидєєва Гоар Давидівна – аспірант каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

About the Author:

Shyrokyi Yurii Vyacheslavovich – Doctor of Philosophy, Assistant-Professor, Head of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine; i.shyrokyi@khai.edu; ORCID: 0000-0002-4713-0334

Sysoiev Iurii – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.sysoiev@khai.edu, ORCID: 0000-0001-5006-8546, Scopus Author ID: 55886163000.

Torosian Olena Vasilivna – Assistant of Dept. of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.tarasyan@khai.edu, ORCID: 0000-0002-7389-6093.

Torosian-Zhydieieva Hoar Davidovna – Graduate student of Dept. of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: h.d.torosian@khai.edu