

УДК 621.373

Г. И. Костюк, Т. А. Постельник

Экспериментальное исследование полей температур на плоских деталях при движении лазерного луча и образование наноструктур

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

Получены поля температур на плоских деталях из стали 1Х18Н9Т и титанового сплава ВТ-4 при сканировании лазерного луча по спирали Архимеда и при движении луча по окружностям разных радиусов. Измерения проведены термопарами с помощью автоматизированного измерительного комплекса и системы управления лучом. Показано, что получены реальные температуры и скорости их нарастания, достаточные для образования наноструктур то ли во всем объеме детали, то ли в части объема детали, а реализующиеся температурные напряжения существенно интенсифицируют образование наноструктур.

Ключевые слова: наноструктуры, лазерный луч, температура, скорость нарастания температуры.

Введение

При использовании в технике металлов и сплавов, интенсивно окисляющихся при высоких температурах, необходимо иметь защитную среду или вакуум для их нагрева при обработке. Вакуумный нагрев более предпочтителен, как наиболее экономичный.

В то же время выбрать наиболее рациональный закон перемещения луча (лазерного) для получения требуемого распределения температур в плоской детали является важной задачей технологии. Все это свидетельствует о том, что проводимые исследования актуальны и имеют важное значение для решения технических задач.

Теоретическим вопросам исследования температурных полей в зоне действия лазерного и электронного лучей посвящены работы [1 – 5], но в них, несмотря на то, что учтены практически все основные источники и стоки тепла, перемещение луча по различным законам не исследовали, тем более экспериментально.

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.

1. Состояние вопроса

В настоящее время существует большое количество работ по технологическому применению лазерного излучения. Обзоры по такому применению пред-

ставлены в работах А. Г. Григорьянца и В. С. Коваленко, [1, 2], но в них недостаточно освещены вопросы связанные с прогревом плоских деталей и вероятностью получения наноструктур, есть незначительная информация в наших работах [5–7]. Экспериментальные же исследования полей температур в зоне действия перемещающегося лазерного луча по разным законам на плоские детали из титановых сплавов не проведены. Все это свидетельствует об актуальности исследования для промышленности.

Постановка задачи

Постановка задачи состоит из разработки и создания системы управления лучом и измерения температуры.

1. Система управления перемещением пучка. Принципы работы и функциональные блоки

Одним из основных критериев качества лазерных установок является точность и стабильность позиционирования луча на обрабатываемой поверхности. Разработана система управления перемещением лазерного луча на базе микропроцессорного контроллера MC2702, обеспечивающая высокую достоверность реализации заданного температурного поля обрабатываемого объекта.

Система обеспечивает возможность программируемого перемещения пучка в целях получения необходимого распределения его мощности по плоскости детали в зоне термической обработки. Особенностью системы является возможность работы в аналоговом режиме с применением генератора импульсов специальной формы, а также в режиме непосредственного цифрового управления с использованием в качестве программного элемента цифрового контроллера, либо персональной ЭВМ.

2. Автоматизированный измерительный комплекс для исследования температурных полей

Для исследования динамических температурных полей при воздействии точечного движущегося источника тепла разработан измерительный комплекс, позволяющий оценивать распределение температуры изделия во время обработки.

Основой комплекса является цифровой транскриптор промышленного производства Ф5225, выполняющий роль контроллера процесса измерения, оперативного запоминающего устройства и системы вывода информации на печать. Такое решение позволяет использовать комплекс как автономно, что при низкой стоимости, небольших габаритных размерах и массе дает возможность комплектовать подобным устройством каждую лазерную технологическую установку для решения задачи оперативного контроля температур, так и в качестве внешнего интерфейсного устройства для связи с ЭВМ при решении задач автоматизации научных исследований в технологических процессах. В качестве датчиков температуры использованы термодатчики, которые дают возможность получать наиболее достоверную информацию о протекающем процессе по сравнению с другими методами измерения локальной температуры.

Существует два способа сбора информации с аналоговых датчиков:

1. Каждый датчик имеет свой аналого-цифровой преобразователь, и подключение датчика к информационной шине осуществляется на цифровом уровне. К достоинствам способа относится высокое быстродействие, так как наибольшие задержки во времени дают АЦП. Недостаток – высокая стоимость;

2. Датчики подключены к аналоговому коммутатору, который поочередно подключает их к одному АЦП. Быстродействие низкое, однако при низкой стоимости можно получить высокую точность измерений за счет применения одного, но высокоточного АЦП.

Учитывая инерционность процессов нагрева (0,1...100 с), приемлемым можно считать второй способ сбора информации, который с достаточной скоростью позволяет проводить опрос 16 термопарных датчиков.

Комплекс обладает следующими характеристиками:

- 1) максимальное количество датчиков – 16;
- 2) максимальная частота опроса – 500 Гц;
- 3) диапазон измеряемых температур (для вольфрам-рениевых термопар) – 273 К...2073 К;
- 4) объем ОЗУ – 5 Кбайт (300 значений температур в виде четырехзначного десятичного числа со знаком и регистрацией времени измерения);
- 5) вид связи с ЭВМ: параллельный интерфейс типа «ИРПР».

Функциональная схема комплекса включает в себя следующие функциональные элементы (рис. 1):

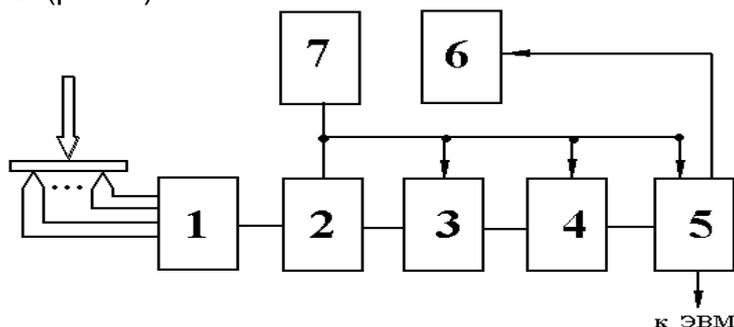


Рис. 1. Принципиальная схема одного канала:

- 1 – блок нормирующих усилителей; 2 – коммутатор аналоговых сигналов;
- 3 – цифровой вольтметр В7-16А; 4 – преобразователь уровней; 5 – принтер;
- 6 – генератор тактовых импульсов; 7 – генератор тактовых импульсов

Блок нормирующих усилителей 1 обеспечивает усиление термоЭДС термопарных датчиков до уровня, обеспечивающего неискаженную передачу сигналов датчика по линии связи, а также через коммутатор. Выходы блока нормирующих усилителей соединены с коммутатором аналоговых сигналов 2, который обеспечивает поочередное подключение выхода каждого из усилителей к цифровому вольтметру 3. Измеренное значение поступает в цифровом виде на преобразователь уровней 4, обеспечивающий преобразование сигнала до уровня ТТЛ-логики, что необходимо для работы с транскриптором 5. С преобразователя кодов информация подается в ОЗУ транскриптора.

Транскриптор обеспечивает хранение поступающей информации, распечатку ее на твердом носителе посредством печатающего устройства 6 и буферизацию перед вводом в ЭВМ. Генератор тактовых импульсов 7 синхронизирует работу всех устройств комплекса и обеспечивает сбор информации датчиков с необходимой частотой опроса.

3. Пакет прикладных программ

Пакет прикладных программ предназначен для обработки и хранения данных, поступающих от автоматизированного измерительного комплекса. Пакет включает в себя следующие программы: FUN, TART и 2DGRAF. Все программы написаны на языке Паскаль и отлажены в вычислительном комплексе IBM586.

Программа TART предназначена для занесения на диск тарифовочной таблицы применяемых термопар. В диалоговом режиме осуществляется ввод таблицы соответствия ЭДС термопары и температуры спаия. В результате создается файл TAB, DAT, используемый программой FUN с клавиатуры.

Программа FUN позволяет вводить исходные данные измерений, полученных с помощью автоматизированной измерительной системы, проводить их обработку и записывать в выходной файл.

Данные, полученные с транскриптора, представляют собой одномерный массив значений ЭДС измерительных термопар. Программа FUN преобразует значения ЭДС в значения измеренных температур, причем для получения точных значений температур использован метод сплайн-интерполяции с учетом инерционности термопар. При этом применяют следующие соотношения: функция $y(x)$

одной переменной X задана $(n + 1)$ узлами $y_i(x_i)$, где $i = 0, 1, 2, \dots, n$. Задача заключается в нахождении значений y по значениям X , находящимся в промежутках между узлами x_i . При интерполяции функция $y(x)$ заменяется интерполяционным полиномом $P(x)$, значения которого $P(x_i)$ в узлах точно совпадают с $Y(x_i)$. Значение n задает степень полинома $P(x)$. При сплайн-интерполяции

интерполирующий полином обеспечивает не только равенство $Y(x)$ значениям Y_i в узлах, но и непрерывность заданного числа первых производных на границах

частичных интервалов. В общем случае сплайн задается глобальным способом, т.е. с использованием всех узлов при любом их расположении. В программе применяется кубический сплайн, заданный локально, т.е. интерполирующая функция в виде полинома третьей степени, вычисляемая по формулам:

$$i = \text{int} \left(\frac{x - a}{h} \right);$$

$$y(x) = \frac{[(x_{i+1}-x)^2(2(x-x_i)+h)]}{h^2} \cdot y_i + \frac{[(x-x_i)^2(2(x_{i+1}-x)+h)]}{h^2} \cdot y_{i+1} +$$

$$+ \frac{[(x_{i+1}-x)^2(x-x_i)]}{h^2} \cdot m_i \pm \frac{[(x-x_i)^2(x_{i+1}-x)+h]}{h^2} \cdot m_{i+1},$$

где m_i и m_{i+1} – первые производные $y(x)$. Производные вычисляют с помощью формул численного дифференцирования по трем точкам:

$$m_i = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h} \text{ для } i = 1, 2, \dots, n-1;$$

$$m_0 = \frac{4y_1 - y_2 - 3y_0}{2h} \text{ для } i = 0;$$

$$m_n = \frac{3y_n - y_{n-2} - 4y_{n-1}}{2h} \text{ для } i = n.$$

Так как отрицательные значения напряжения представлены в вольтметре В7-16А в дополнительном коде, в программу введен блок, распознающий отрицательные значения и преобразующий их в число со знаком. Введена также программа установки нуля, если ЭДС термопары при температуре 20°C отлична от табличного значения. В этом случае вычисляют разницу между табличным значением и полученным и все значения для данной термопары корректируют с учетом этой разницы. Сформированный массив значений температур заносится в файл.

Программа 2DGRAF предназначена для получения распределений температур по поверхности обрабатываемой заготовки в виде двумерного графика. Исходными данными служит массив, сформированный программой FUN. Программа рисует координатную сетку, определяет размерность по осям, прорисовывает на экране дисплея одну или несколько зависимостей. В случае необходимости прорисовки графика на бумаге может быть сделана копия графического экрана с помощью стандартной программы PRSC.

4. Результаты экспериментального исследования полей температур при движении лазерного луча по разным законам

Рассмотрены различные закономерности движения лазерного луча: движение по спирали Архимеда и по окружностям различных радиусов по заготовкам из стали 1X18H9Т толщиной 1 мм и титанового сплава ВТ-4 толщиной 0,8 мм и диаметром 180 мм. Температуру измеряли со стороны, противоположной подвергающейся облучению.

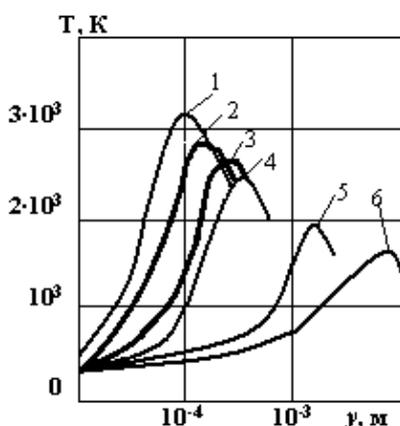


Рис. 2. Изменение температуры на стали 1X18H9Т по координате y при различных скоростях перемещения пятна ($\tau=10^{-4}$ с, $R_{\text{п}}=10^{-4}$ м, $q=1,8 \cdot 10^{10}$ Вт/м²):
 1 – $V_{\text{п}}=0$ м/с; 2 – $V_{\text{п}}=1$ м/с;
 3 – $V_{\text{п}}=5$ м/с; 4 – $V_{\text{п}}=10$ м/с;
 5 – $V_{\text{п}}=50$ м/с; 6 – $V_{\text{п}}=100$ м/с

Для определения необходимой скорости перемещения для образования НС по нашей модели [1] рассчитывали зависимость температуры на поверхности от координаты y (в направлении которой осуществляется перемещение) для различ-

ных скоростей перемещения, такая зависимость показана на рис. 2. Тогда принимаем в качестве критерия образования температуры 500...1000 К и скорости ее нарастания более 10^7 К/с, приемлемым будет режим со скоростью перемещения луча 100 м/с, когда температура составляет 1500 К, а скорость ее нарастания – $2,5 \cdot 10^7$ К/с.

С учетом проведенных расчетов выбирали скорость перемещения лазерного луча 100 м/с, которая была в экспериментах.

Так, распределение температур по радиусу заготовки из стали 1X18H9T (толщина 1 мм) показано на рис. 3 и 4 по спирали Архимеда и по окружности радиусом 70 мм.

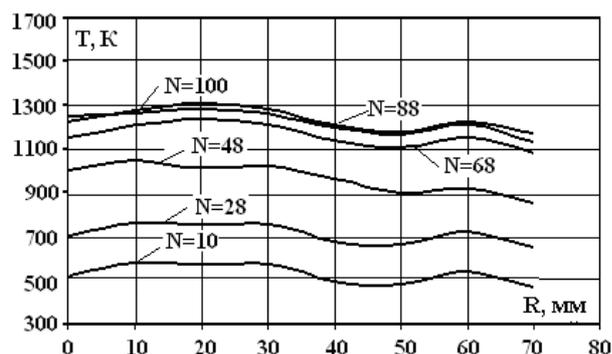


Рис. 3. Распределение температуры по радиусу заготовки (сталь 1X18H9T, $q = 2,54 \cdot 10^9$ Вт/м²), движение лазерного луча по спирали Архимеда ($R_{\max} = 70$ мм, толщина 1 мм) при разных количествах проходов N

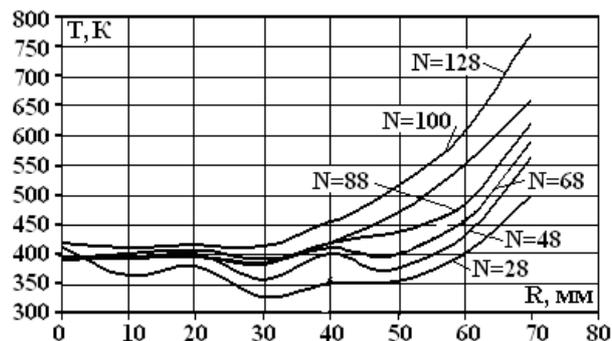
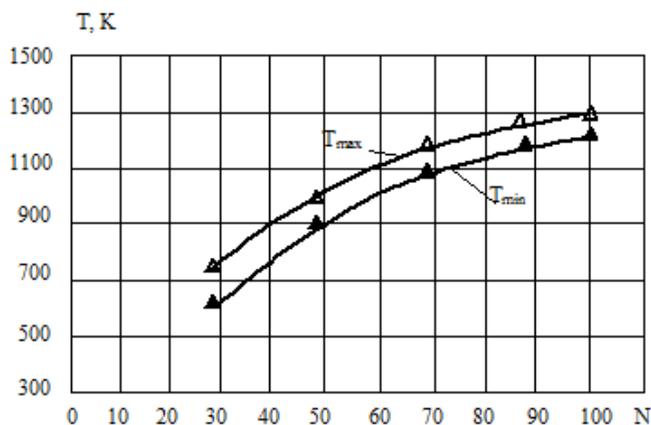


Рис. 4. Распределение температуры по радиусу заготовки (сталь 1X18H9T, $q = 2,54 \cdot 10^9$ Вт/м²) толщиной 1 мм при сканировании лазерного луча по окружности радиусом $R = 70$ мм при разных количествах проходов N

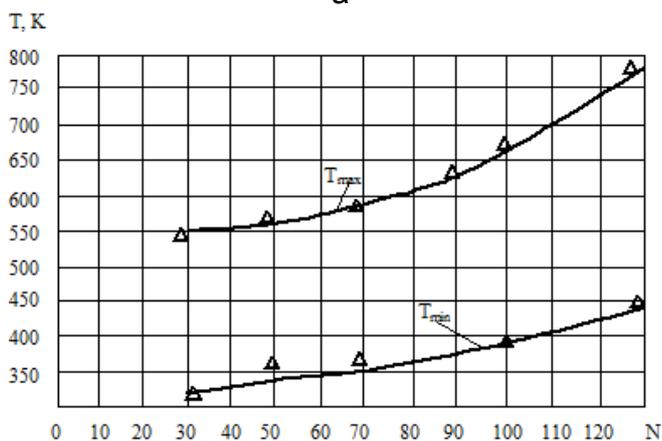
Видно, что при движении по спирали Архимеда получается практически равномерное распределение температуры по радиусу на обратной стороне заготовки. Учитывая расчетные значения мгновенной температуры на поверхности (см. рис. 1, расчеты), можно заключить, что практически во всем объеме заготовки, начиная с 10 проходов луча по заготовке есть вероятность получения наноструктур в стали 1X18H9T. В то же время при движении луча по окружности радиусом 70 мм наноструктуры будут получаться наноструктуры на поверхности, а на всей толщине следует ожидать только от радиуса 67 мм при 48 проходах, от 63 мм – при 68 проходах, от 61 мм – при 88 проходах, от 53 мм – при 100 проходах и от 47 мм при 128 проходах луча.

Все это свидетельствует о том, что если наноструктуры необходимо получить во всем объеме детали, то используем режим с законом перемещения луча по спирали Архимеда при плотности теплового потока $q = 2,54 \cdot 10^9$ Вт/м². Если же наноструктуры надо получить только на периферии детали, то можно применять режим при движении луча по окружности радиусом 70 мм.

Для удобства использования в технологических процессах приведены зависимости максимальной и минимальной температуры заготовки в зависимости от числа проходов при движении по спирали Архимеда (рис.5, а) и по окружности радиуса 70 мм (рис.5, б). Эти зависимости более удобны для определения числа проходов при лазерном нагреве детали и важны при выполнении условий получения наноструктур во всем объеме или его части.

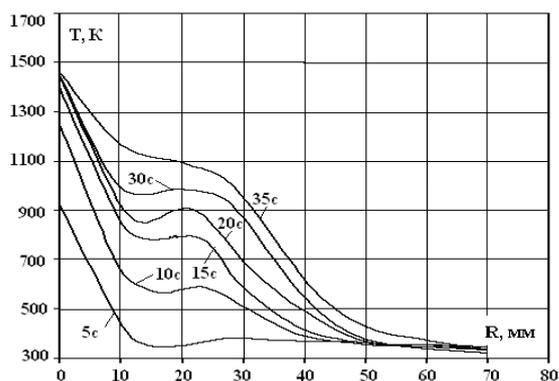


а

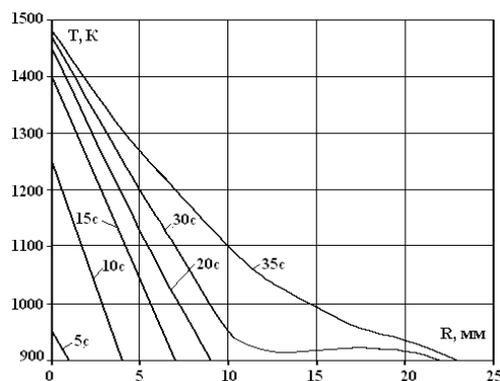


б

Рис. 5. Изменение минимальной и максимальной температуры обратной стороны заготовки (сталь 1X18H9T, толщина 1 мм) в зависимости от числа проходов лазерного луча ($q = 2,54 \cdot 10^9$ Вт/м²) по спирали Архимеда (а) и по окружности радиусом 70 мм (б)



а



б

Рис. 6. Распределение температуры по радиусу заготовки для титанового сплава BT-4 толщиной 0,8 мм: а – $q = 3,88 \cdot 10^9$ Вт/м² при сканировании лазерного луча по окружности $R = 3$ мм ; б – $q = 2,54 \cdot 10^9$ Вт/м² при сканировании лазерного луча по окружности $R = 2,5$ мм за разное время действия (5, 10, 15, 20, 30, 35 с)

Результаты эксперимента по нагреву диска радиусом 90 мм и толщиной 0,8 мм из титанового сплава BT4 при сканировании лазерного луча по окружности

$R = 3$ мм и $q = 8,88 \cdot 10^9$ Вт/м² (рис. 6, а) и по окружности 2,5 мм и $q = 2,54 \cdot 10^{10}$ Вт/м² (рис. 6, б) за разное время действия (5, 10, 15, 20, 30, 35 с). Видно, что при большой плотности теплового потока (рис. 6, а) с ростом времени температура существенно повышается даже до радиусов 30...40 мм, тогда как при меньших плотностях теплового потока температура повышается только до радиусов 12...23 мм, да и то последняя – при времени действия 35 с. В первом случае образование наноструктур возможно от радиуса 9 (5 с) до 45 мм (35 с), где температура от 500 до 1500 К, а скорость роста температуры составляет $\sim 4 \cdot 10^6$ К/с, несмотря на то, что скорость несколько недостаточна, но температурные напряжения составляют величины порядка 10^9 Н/м², что интенсифицирует образования НС.

Интересные результаты порядка получены при сканировании лазерного луча на детали из ВТ-4 по радиусам 10 мм (рис. 7, а) и 5 мм (рис. 7, б) при тех же временах действия (5...35 с). Температурные поля могут обеспечить получение наноструктур: в первом случае на радиусах от 16 до 38 мм, а во втором – до 18 мм. Во втором случае температурные напряжения достигают 10^{10} Н/м², а в первом порядке – 10^9 Н/м², что в первом случае несколько интенсифицирует образование НС, а во втором – может быть определяющим в их образовании [1].

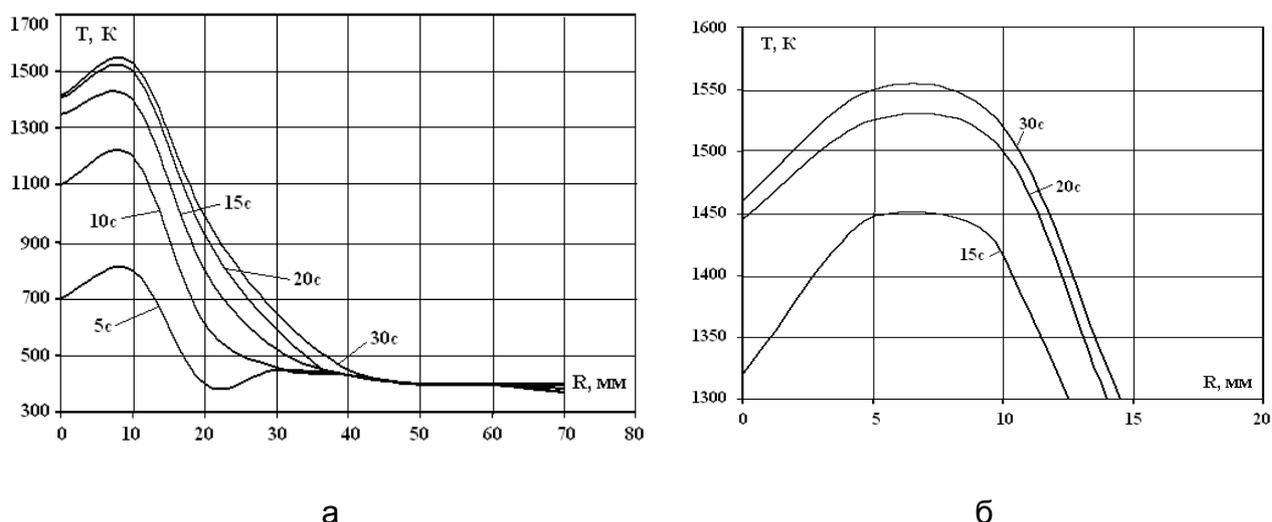


Рис. 7. Распределение температуры по радиусу заготовки для титанового сплава ВТ-4 (толщина 0,8 мм) при сканировании лазерного луча по окружности $R = 10$ мм ($q = 2,54 \cdot 10^9$ Вт/м²) (а) и $R = 5$ мм ($q = 3,88 \cdot 10^9$ Вт/м²) (б) при разном времени действия (5, 10, 15, 20, 30, 35 с)

Показана возможность получения НС как в отдельных зонах плоского диска, так и практически во всем объеме в зависимости от выбора закона сканирования лазерного луча.

Выводы

1. Показана возможность образования наноструктур во всем объеме заготовки из стали 1Х18Н9Т при движении лазерного луча по спирали Архимеда, начиная от 10 проходов.
2. Доказана возможность получения наноструктур на периферии заготовки из 1Х18Н9Т за счет движения лазерного луча по окружности радиусом 70 мм, что подтверждает возможность создания наноструктур в требуемом месте.

3. Для заготовки из титанового сплава ВТ-4 можно получить наноструктуры в различных местах, варьируя радиус окружности (по которой движется лазерный луч), плотность теплового потока, скорость перемещения луча по окружности и число проходов луча по окружности.

4. Показана возможность выбора технологических параметров лазерной обработки для получения наноструктур по следующим критериям: достижение температур 500...1500 К, скорости нарастания температур, больших или близких к 10^7 К/с, и температурных напряжений порядка $10^8...10^{10}$ Н/м² (повышают вероятность образования наноструктур).

Список литературы

1. 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.

2. 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.

3. Коваленко, В. С. Упрочнение деталей лучом лазера [Текст] / В. С. Коваленко, Г. В. Меркулов, А. И. Стрижак. – К.: Техніка, 1981. – 157 с.

4. Григорьянц, А. Г. Основы лазерного термоупрочнения [Текст] / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. – м.: Высш. шк., 1988. – 159 с.

5. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст]: в 2 кн. / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 1.: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 1030 с.

6. Костюк, Г. И. Наноструктуры и нанопокрyтия: 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. 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.

8. Костюк, Г. И. Эффективные покрытия и модифицированные упрочненные слои на режущих инструментах [Текст]: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 728 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.

Поступила в редакцию 10.09.2015

Експериментальне дослідження полів температур на плоских деталях при русі лазерного променя і створення наноструктур

Отримано поля температур на плоских деталях зі сталі 1Х18Н9Т і титанового сплаву VT-4 при скануванні лазерного променя по спіралі Архімеда і при русі променя по колах різних радіусів. Вимірювання проведено термомпарами за допомогою автоматизованого вимірювального комплексу і системи керування променем. Показано, що отримані реальні температури і швидкості їх наростання достатні для утворення наноструктур, чи то у всьому об'ємі деталі чи то в частині об'єму деталі, а температурні напруги, що реалізуються, істотно інтенсифікують утворення наноструктур.

Ключові слова: наноструктури, лазерний промінь, температура, швидкість наростання температури.

Experimental study of temperature fields on flat parts during movement of the laser beam and the creation of nanostructures

An in temperature on flat parts 1H18N9T steel and titanium alloy VT-4 by scanning the laser beam in a spiral of Archimedes and beam when driving in circles of different radii. Measured using thermocouples measuring complex automated control systems and beam. It is shown that the resulting actual temperature and the speed of their growth sufficient to form nanostructures, or in the whole volume parts or in part volume parts, and thermal stresses implemented, significantly intensify the formation of nanostructures.

Keywords: nanostructures, laser light, temperature, rate of rise in temperature.