

**РЕАЛИЗИРАНЕ НА СИСТЕМА И ПРОГРАМНО ОБЕЗПЕЧАВАНЕ
ЗА ЛАЗЕРНО ЗАКАЛЯВАНЕ НА ПОВЪРХНИНИ****Продан Проданов*, Борислав Стоянов, Ивайло Радев***Технически Университет - Габрово, ул. Хаджи Димитър № 4, Габрово, Р. България***кореспондиращ автор: pprodanov@tugab.bg***SYSTEM AND SOFTWARE IMPLEMENTATION FOR LASER
SURFACE HARDENING****Prodan Prodanov*, Borislav Stoyanov, Ivajlo Radev***Technical University of Gabrovo, Hadji Dimiter str. 4, Gabrovo, Republic of Bulgaria***corresponding author: pprodanov@tugab.bg***Abstract**

The implementation of surface treatment systems involves the use of a precision positioning system, most often multi-axis, based on an industrial robot or coordinate machine. A laser head with a certain power for the needs of the technological process is used as a processing tool, and very often these two systems are combined with a third one – measuring system for feedback and control. Very often a pyrometer suitable for non-contact measurement of surface temperature is used as a measuring system. This paper presents a solution combining positioning, processing and measurement systems based on the above mentioned modules.

Keywords: industrial robot; laser hardening, laser scanner head, pyrometer, robot programming.

ВЪВЕДЕНИЕ

За реализация на технологичния процес на лазерно закаляване е необходимо съгласуване работата на три основни модула, които го осигуряват – система за позициониране; система за лазерно генериране (лазерен източник); както и система за измерване и регулиране на температурата на процеса – индустриален пирометър. Обединяването им в една структура, триъгълник на управление, обхваща взаимните връзки и предаване на информация между всеки един от тях. За осъществяване на това е необходимо съгласуване на сигнали, съставяне на алгоритми за работа, както и създаване на потребителски програми с цел задаване

на движение, на изпълнителните звена, така че да се постигне точно съгласуване с формата на обработвания детайл. Цел на настоящото изследване е разработването на управляващи програми и съгласуване на функционални блокове в трите модула, участващи в индустриална система за повърхностна термична обработка на повърхнини.

ИЗЛОЖЕНИЕ

При изграждането на такъв тип система са заложили следните модули:

- индустриален робот тип FANUC M20iD [1] с шест степени на свобода, съответно шест задвижващи оси със сер-

водвигатели, с допълнение към него – ротационен едноосен модул [2];

- лазерен захранващ източник, тип LDM4000-100 с номинална изходяща мощност 4kW [3], в комбинация с лазерната обработваща глава тип OTZ-5 VR [4], снабдена с варио-оптика с възможност за регулиране на размерите на лазерното петно в диапазона от (5,5x8) mm до (22x44) mm;

- оптичен пирометър, тип LDC01 Mergenthaler [5], двуцветен, интегриран в лазерната глава.

Съгласуването на работата на тези три модула се извършва в няколко стъпки, като могат да бъдат обобщени до следното: създаване на потребителски програми за движение на индустриалния робот; съгласуване на входно-изходните сигнали между индустриалния робот, модула за управление на лазерния захранващ източник (управление на изходящата мощност); съгласуване на управляващите сигнали свързани с ширината на петното на лазерния източник.

Първата стъпка е синтезирането на управляващи програми за индустриалния робот, които да включват пълната функционалност по отношение на управлението и конкретизиране според формата на закалявания детайл. На фиг. 1 и фиг. 2 са показани синтезираните програми, които се използват за работа при закаляване на области от детайли с равнинна или цилиндрична повърхнина. Програмата съдържа подпрограми за контрол на движението на робота, по зададени координати, линейна скорост, а на лазерния източник – неговото пускане, спиране, проверка на блокировките, задаване на ширината на лазерното петно.

```
/PROG AAA_TABLE_PARTS
LINE_COUNT = 36;
MEMORY_SIZE= 1392;
PROTECT = READ_WRITE;
TCD: STACK_SIZE = 0,
TASK_PRIORITY = 50,
TIME_SLICE = 0,
BUSY_LAMP_OFF = 0,
ABORT_REQUEST = 0,
PAUSE_REQUEST = 0;
DEFAULT_GROUP = 1,1,*,*,*;
CONTROL_CODE = 00000000
00000000;
LOCAL_REGISTERS = 0,0,0;
/MN
1: UTOOL_NUM=2 ;
2: UFRAME_NUM=0 ;
3: LBL[1:START] ;
4: OVERRIDE=R[3:Robot SPEED] ;
5: !---Initialization--- ;
6: CALL CHECK_AUTO_MODE ;
7: CALL AA_LASER_OFF ;
8: CALL CALC_TBL_START ;
9: CALL CALC_TBL_END ;
10: !---HOME POS--- ;
11: J PR[3:HOME 3 test] 10% CNT10 ;
12: !Speed check >2mm/s ;
13: LBL[2:Speed check] ;
14: IF (R[22:Speed mm/s]>2) THEN ;
15: ELSE ;
16: MESSAGE[VERY LOW SPEED !] ;
17: JMP LBL[2] ;
18: ENDIF ;
19: !LASER START Position! ;
20: J PR[3:HOME 3 test] 30% CNT10 ;
21: L PR[60:Calc Table ORG] 100mm/sec FINE
;
22: !Laser ON Signals ;
23: DO[7:OFF:Error RESET]=PULSE,1.0sec ;
24: DO[4:OFF:Laser Threshold]=ON ;
25: DO[5:OFF:Shutter OPEN]=ON ;
26: WAIT 1.00(sec) ;
27: LBL[3:Laser ON Failure] ;
28: !---Laser ON--- ;
29: IF (DO[15:OFF:Laser and Pyro
ENABLE]=ON),CALL AA_LASER_ON ;
30: IF (DO[15:OFF:Laser and Pyro
ENABLE]=OFF),JMP LBL[3] ;
31: L PR[62:Calc Table END] R[22:Speed
mm/s]mm/sec FINE ;
32: !---Laser OFF--- ;
33: CALL AA_LASER_OFF ;
34: J PR[3:HOME 3 test] 20% CNT10 ;
35: PAUSE ;
36: JMP LBL[1] ;
/POS
/END
```

Фиг. 1. Управляваща програма за следене на равнинна повърхнина

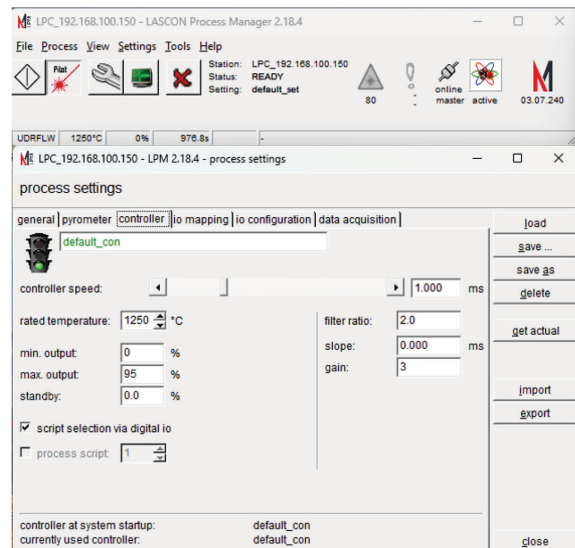
```

/PROG AAA_CHUCK_PARTS
LINE_COUNT = 44;
MEMORY_SIZE = 1528;
PROTECT = READ_WRITE;
TCD: STACK_SIZE = 0,
TASK_PRIORITY = 50,
TIME_SLICE = 0,
BUSY_LAMP_OFF = 0,
ABORT_REQUEST = 0,
PAUSE_REQUEST = 0;
DEFAULT_GROUP = 1,1,*,*;
CONTROL_CODE= 00000000 00000000;
LOCAL_REGISTERS = 0,0,0;
1: UTOOL_NUM=2 ;
2: UFRAME_NUM=0 ;
3: LBL[1:START] ;
4: OVERRIDE=R[3:Robot SPEED] ;
5: !---Initialization--- ;
6: CALL CHECK_AUTO_MODE ;
7: CALL AA_LASER_OFF ;
8: CALL CALC_CHK_START ;
9: CALL CALC_CHK_END ;
10: CALL CALC_PERIPHERIAL_SPEED ;
11: !---HOME POS--- ;
12: J PR[3:HOME 3 test] 10% CNT10 ;
13: CALL AA_SPEED_CHECK ;
!LASER START Position! ;
15: J PR[3:HOME 3 test] 30% CNT10 ;
16: L PR[61:Calc Chuck ORG] 100mm/sec FINE ;
17: !Laser ON Signals ;
18: DO[7:OFF:Error RESET]=PULSE,1.0sec ;
19: DO[4:OFF:Laser Treshold]=ON ;
20: DO[5:OFF:Shutter OPEN]=ON ;
21: WAIT 1.00(sec) ;
22: LBL[3:Laser ON Failure] ;
23: !---Laser ON--- ;
24: IF (DO[15:OFF:Laser and Pyro
ENABLE]=ON),CALL AA_LASER_ON ;
25: IF (DO[15:OFF:Laser and Pyro
ENABLE]=OFF),JMP LBL[3] ;
26: SELECT R[43:Motion Selection]=R[40:Posit
Linear],JMP LBL[100] ;
27: =R[41:Posit Curcle],JMP LBL[101] ;
28: =R[42:Posit Spiral],JMP LBL[102] ;
29: LBL[100:LINEAR] ;
30: L PR[63:Calc Chk END Lin] R[22:Speed
mm/s]mm/sec FINE ;
31: JMP LBL[200] ;
32: LBL[101:CURCLE] ;
33: L PR[64:Calc Chk END Cur] R[23:Speed
sec]mm/sec FINE ;
34: IF(DO[13:OFF:Positioner MOVE]=OFF)THEN ;
35: JMP LBL[200] ;
36: ENDIF ;
37: LBL[102:SPIRAL] ;
38: !N/A ;
39: LBL[200:Laser OFF] ;
40: !---Laser OFF--- ;
41: CALL AA_LASER_OFF ;
42: J PR[3:HOME 3 test] 20% CNT10 ;
43: PAUSE ;
44: JMP LBL[1] ;
/POS
/END

```

Фиг. 2. Управляваща програма за следене на цилиндрична повърхнина

За управление на технологичния процес на закаляване се използва софтуерния продукт Lascon Process Manager. Приложението предлага интерфейс за настройване на параметрите на процеса закаляване - работната температура на закаляване на детайла, бързодействието при процеса, дълбочина на обратната връзка, събирането и обработването на данни за процеса, както и пускането на така наречения пилотен лазер – лазерен лъч, безопасен за оператор, чрез който може да се наблюдава ширината на лазерното петно и неговото местоположение – фиг. 3.

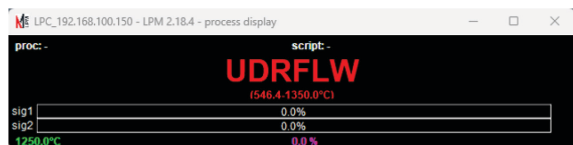


Фиг. 3. Основен изглед на софтуер Lascon Process Manager за настройка на параметрите на оптичния пирометър

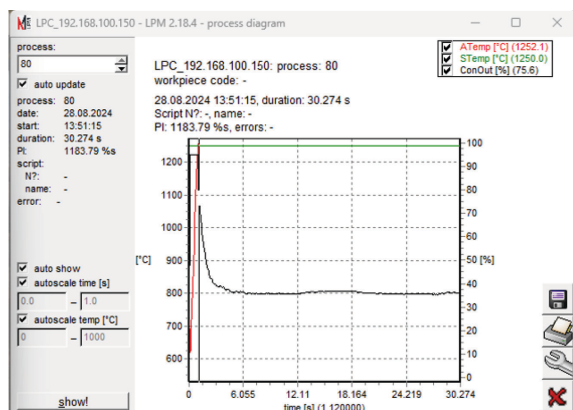
Изпълнението на процеса относно регулирането и задаването на температурата е показано на фиг. 4, като могат да се наблюдават двата сигнала за грешки на двуцветния пирометър, както и текущата стойност на работната температура и времето за протичане на процеса.

Софтуерния продукт Lascon Process Manager позволява запис на технологичния процес по време, зададена и действителна температура и мощност на лазерния източник. Освен това данните могат да се използват в графичен и табличен вид – фиг. 5. Това позволява анализ в следствие на процеса, необходимата температура и мощност при закаля-

ване на различен по геометрия и материал детайли.

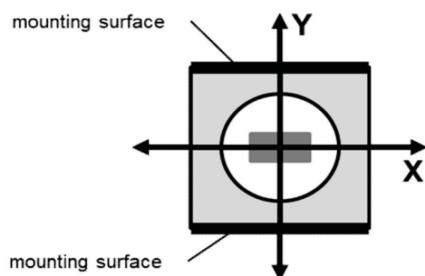


Фиг. 4. Прозорец за данни в реално време по време на технологичния процес



Фиг. 5. Диаграма на технологичния процес по време, мощност и температура

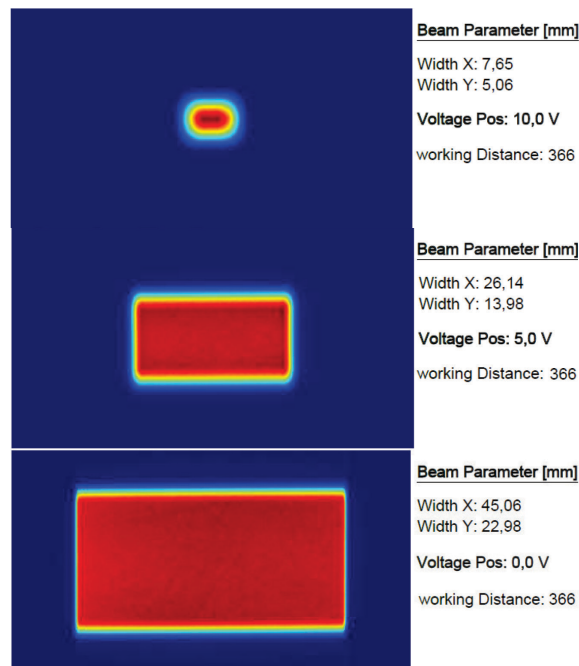
Третата стъпка от основните настройки и свързване е възможността за автоматично софтуерно задаване на ширината на петното на лазерния лъч. От фирмата производител са дефинирали такива данни за управление с аналогово напрежение в диапазона от 0 до 10V по двете оси X и Y, като съответно изменението на петното ще бъде в границите: по X – (8 ÷ 43) mm, а по Y – (5,5 – 22)mm. На фиг. 6 е показана площта на изменение на лазерния сноп в двете направление, като винаги се измества спрямо центъра на лазерната глава.



Фиг. 6. Разположение на петното на лазерния лъч спрямо лазерната глава

Предоставеното от производителя калибриране е показано на фиг. 7, при 0V,

5V и 10V входно напрежение, променяйки площта на лазерното петно.



Фиг. 7. Големина на петното при различни входни управляващи напрежения

Съгласуването на работата на лазерната глава с индустриалния робот по отношение на аналоговото входно напрежение за задаване на петното на лазерния лъч става посредством аналогови изходи от контролера на индустриалния робот. Особеността там е задаването програмно на това изходно напрежение посредством 12 битов регистър, приемащ стойности от 0 до 4096. При това положение изходното напрежение се променя в диапазона (-10 ÷ +10)V. Това налага ограничаване на зададените стойности само в диапазона 0 до 2047 bit, за получаване само на положително изходно аналогово напрежение.

Калкулирането на ширината на петното по оси X и Y (SpotsizeX [mm] и SpotsizeY [mm]) се извършва по следните формули:

$$\text{SpotsizeX} = -3,75 \cdot U_{\text{CONTROL}} + 44,92 \quad (1)$$

$$\text{SpotsizeY} = -1,81 \cdot U_{\text{CONTROL}} + 23,02 \quad (2)$$

където U_{CONTROL} е управляващото напрежение от изходните аналогови модули на контролера на индустриалния робот.

Извършено е изчисление на ширината на петното по X и Y направления спрямо входните напрежение и зададени брой битове в управляващата програма на работа – табл. 1. В табл. 2 и табл. 3 са представени резултатите за ширина на петното като функция на броя зададени bit-ве. Задаването на тези битове става в отделен регистър, обособен при програмирането на работа.

Табл. 1. Връзка между ширина на петното в mm и брой bit

бр. битове X и Y, bit	200	400	600	800	1000
напрежение X и Y, V	0,98	1,95	2,93	3,91	4,89
spot size, X	41,26	37,59	33,93	30,26	26,60
spot size, Y	21,25	19,48	17,71	15,95	14,18
бр. битове X и Y, bit	1200	1400	1600	1800	2047
напрежение X и Y, V	5,86	6,84	7,82	8,79	10,00
spot size, X	22,94	19,27	15,61	11,94	7,42
spot size, Y	12,41	10,64	8,87	7,10	4,92

Табл. 2. Необходим брой bit за задаване на ширина на петното на лъча по оста X

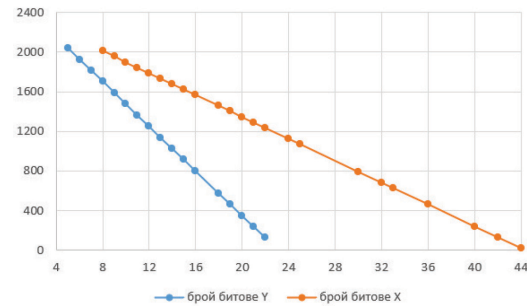
spot size X, mm	8	9	10	12	15	18
Брой битове	2010	1955	1900	1789	1623	1457
spot size X, mm	20	21	24	25	30	32
Брой битове	1347	1292	1126	1071	794	684
spot size X, mm	33	36	40	42	44	
Брой битове	628	463	242	131	20	

Табл. 3. Необходим брой bit за задаване на ширина на петното на лъча по оста Y

spot size Y, mm	5	6	7	8	9	10
Брой битове	2039	1926	1814	1701	1588	1476
spot size Y, mm	11	12	13	14	15	16
Брой битове	1363	1251	1138	1026	913	800
spot size Y, mm	18	19	20	21	22	
Брой битове	575	463	350	237	125	

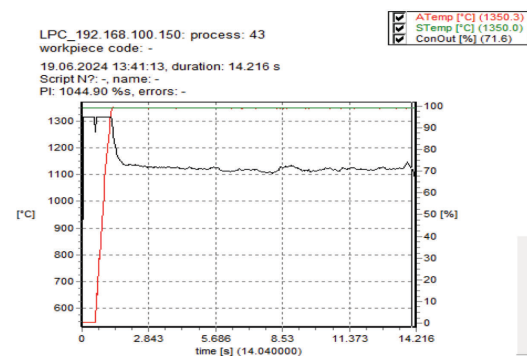
Резултатите са представени графично на фиг. 8, като се вижда линейността и при двете графики. Това е важна особеност

ност за технологичния процес, предвид нуждата от прецизно задаване на ширината на лазерното петно при детайли изискващи прецизна обработка.

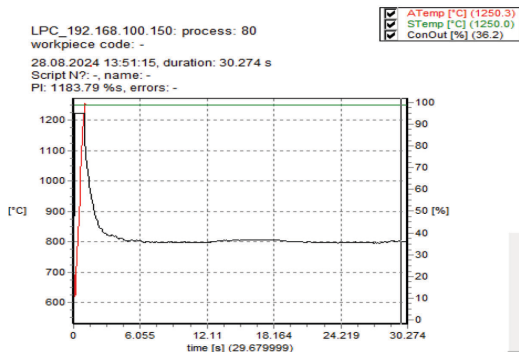


Фиг. 8. Връзка между броя зададени в контролера битове и ширина на петното на лазерния лъч в mm

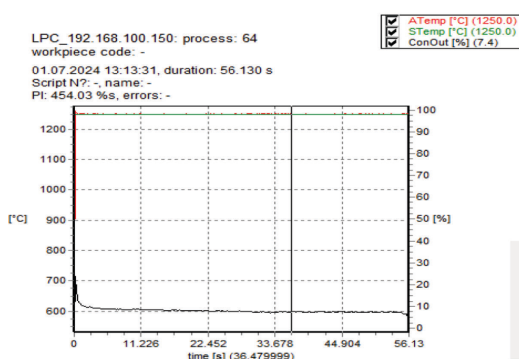
Задаването на различна ширина на петното на лазерния лъч е свързано с повърхностното закаляване на различни по вид детайли, както и бързодействието при обработка. Освен това, този подход способства за равномерното закаляване на детайли с различна големи и позволява обработването на детайли с малка геометрични размери, тесни технологични отвори, както и зъби на зъбни колела с малък диаметър. Задаването на различно по ширина петно влияе на изходната мощност на лазерния източник и лазерна глава, като на фиг. 9, 10 и 11 се вижда големината на тази изходна мощност при еднаква температура (1250⁰C) на закаляване.



Фиг. 9. Диаграма на процеса на закаляване при ширина на петното (43x22)mm



Фиг. 10. Диаграма на процеса на закаляване при ширина на петното (26x14)mm



Фиг. 11. Диаграма на процеса на закаляване при ширина на петното (8x5,5)mm

От получените диаграми на различните процеси се вижда увеличаването на изходната мощност при по-голяма площ на петното на лазерния лъч, както и увеличаване на времето за работа на лазерната глава за покриване на идентична площ, тоест движение с по-ниска скорост.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализирана и изследвана е система и програмно осигуряване за лазерно закаляване на повърхнини. Така представената система съгласува работата на три отделни модула, обезпечавщи нейното функциониране. В процеса на реализиране и изследване се установи нужда от линейност в управлението на петното на

лазерния лъч, задаване на неговата големи, необходимостта от имплементиране в управляващите програми на блокове и алгоритми за проверка на статус и състояния на лазерен източник и пирометър. Използвания пирометър напълно функционално управлява, задава и регулира температурата на закалявания слой и мощността на лазерната глава, като осигурява прецизност и висока точност на регулиране за получаването на качествен закален слой, без прегряване или недогрят детайл.

Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

Благодарности: Авторите изказват своята благодарност към рецензентите за насоките и критичните бележки при оформянето на настоящия доклад, както и изказват благодарност към проект BG16RFPR002-1.014-0005.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www2.fanuc.eu/uk/en/robots/robot-filter-page/m-20-series/m-20id-35>
- [2] <https://www.fanuc.eu/il/en/robots/accessories/robot-motion/positioners>
- [3] <https://www.laserline.com/en/int/ldmseries/>
- [4] <https://www.laserline.com/en-int/otz-series/>
- [5] <https://www.mergenthaler-laser.com/en/hardening>