

УДК 681.513.2

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Лятов Р.А., Умнов В.П.

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: mex-rob@yandex.ru

Лазерная обработка относится к наукоемким технологиям, определяющим уровень производства в промышленно развитых странах. Одним из применений лазерной обработки в промышленности является поверхностное упрочнение изделий мощными лазерами. Эта операция, как правило, выполняется многокоординатными комплексами или роботами, оснащенными системами числового программного управления движением и регуляторами мощности лазерного излучения. Универсальность комплексов во многом определяется возможностями обработки разнообразных изделий, в том числе при отсутствии их компьютерных моделей и чертежей. С учетом этого использование системы САД/САМ/САЕ в комплексах лазерного упрочнения нецелесообразно. Для автоматизированной подготовки управляющих программ предлагается использовать для построения геометрического образа изделия техническое зрение на базе бинокулярных триангуляционных лазерных датчиков, а для назначения режимов обработки параллельные натурный и машинный эксперименты. Предложена структура системы подготовки управляющей программы и ее воспроизведение и алгоритм ее двухкоординатной реализации. Предложен алгоритм выполнения параллельных натурального и машинного экспериментов при назначении режимов обработки и приведен пример его реализации. Предложенные в работе процессы автоматизированной подготовки управляющих программ для координатных перемещений и назначения режимов обработки позволят значительно сократить затраты и сроки подготовки производства для лазерных технологических комплексов термоупрочнения.

**Ключевые слова:** лазерная обработка, управляющая программа, алгоритм, параллельный эксперимент, режим обработки

## THE SYSTEM OF THE AUTOMATED TRAINING OF MANAGING DIRECTORS OF PROGRAMS FOR LASER HARDENING OF PRODUCTS OF IRREGULAR SHAPE

Lyatov R.A., Umnov V.P.

*The Federal State budgetary educational institution of higher professional education «The Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs»,  
Vladimir, e-mail: mex-rob@yandex.ru*

The laser processing relates to complex technologies, that determines the manufacture level in industrialized countries. One of uses of the laser processing in manufacture is a surface hardening with powerful lasers. This operation is usually performed by multicoordinate complexes or robots with CNC systems of control of movement and laser power regulators. The universality of complexes is determined by possibilities of processing diverse products even without their computer models and blueprints. Knowing that, the using CAD/CAM/CAE system in laser hardening complex is not expediently. For automatic preparation of control program is advised to use for building a geometrical form of product, use technical sight which is based on binocular triangular laser sensors, for appointment of processing modes with parallel natural and machine experiments. The structure of preparing system and her reproduction and her two-coordinate realization algorithm are offered. Algorithm of parallel appointment of natural and machine experiments with selecting modes of processing is offered and the experiments with selecting modes of processing is offered and of automated preparation of control programs preparation of manufacturing for laser technological complexes of laser hardening.

**Keywords:** laser processing, the operating program, an algorithm, a parallel experiment, the processing mode

Современное производство характеризуется все возрастающим внедрением наукоемких технологий, к числу которых относится лазерная обработка материалов. Одним из основных применений лазерной обработки в промышленности является поверхностное упрочнение изделий мощными лазерами, рассмотренное в работе [1]. Эта операция, как правило, выполняется многокоординатными комплексами или роботами, оснащенными системами числового программного управления движением. Одним из направлений совершенствования процесса закалки поверхности деталей яв-

ляется разработка и внедрение эффективных систем управления процессом. К числу таких систем относится система, предложенная в работе [2]. В системе организованы две обратные связи, первая (внутренняя) из которых поддерживает постоянную величину температуры нагрева поверхности при незапрограммированных изменениях условий обработки (геометрии объекта обработки, свойств материала и т.д.) путем изменения контурной скорости перемещения луча. Вторая обратная связь (внешняя) корректирует входные параметры лазерного излучения на основании компьютерного

анализа температурного цикла, определяемого с использованием матричного тепловизора и компьютерной модели процесса в условиях незапрограммированного изменения глубины слоя упрочнения и его твердости, обеспечивая адаптивность процесса в условиях неопределенности и нестационарности процесса.

Универсальность комплексов во многом определяется возможностями обработки разнообразных изделий, в том числе при отсутствии их компьютерных моделей и чертежей. В этом случае для изделий сложной формы подготовка управляющей программы является трудоёмкой и длительной процедурой.

Цель работы: построение системы автоматизированной подготовки управляющих программ упрочнения изделий сложной формы для лазерных технологических комплексов, а также алгоритма назначения режимов обработки, позволяющих сократить сроки и затраты на технологическую подготовку производства.

Процесс подготовки программ обработки деталей на лазерном технологическом комплексе обычно включает следующие основные действия:

- оценка возможности проведения лазерной термической обработки на конкретной детали с учётом её формы и материала, из которых она изготовлена;
- выбор режима лазерной термической обработки с учётом опыта, полученного при обработке изделий схожей формы и материала, или опираясь на вновь проведённый эксперимент на отладочном изделии;
- измерение и описание геометрии обрабатываемой детали (при отсутствии ее модели);
- разработка плана обработки детали на лазерном технологическом комплексе;
- разработка управляющей программы лазерного термоупрочнения для лазерного технологического комплекса;
- компиляция программы либо набор с пульта в систему управления.

Ручное программирование целесообразно использовать при обработке поверхностей деталей сравнительно простой конфигурации в случаях, когда ручное программирование менее затратно, чем подготовка управляющих программ с использованием ЭВМ.

Для автоматизированного программирования с использованием ЭВМ систему автоматизированной подготовки управляющих программ упрочнения изделий лазерный технологический комплекс необходимо оснастить датчиком-измерителем, способным предоставлять для ЭВМ данные, необ-

ходимые для составления геометрической матрицы поверхности объекта с требуемой точностью измерения, программой-процессором и программой-постпроцессором для преобразования геометрической матрицы поверхности объекта в его 3-D модель, а также программный код, воспринимаемым УЧПУ лазерного технологического комплекса [3]. В качестве измерителя предлагается использовать лазерный датчик-дальномер семейства бинокулярных триангуляционных лазерных датчиков серии ЛД2 [4], которые способны работать в режиме 3D сканера для построения геометрической матрицы поверхности детали.

Бинокулярные триангуляционные датчики серии ЛД2 поставляются с программным обеспечением для ЭВМ/ПК, которое способно не только строить геометрическую матрицу поверхности сканируемого объекта, но и преобразовывать её для последующей обработки постпроцессором в 3D модель.

Предлагается процесс подготовки программы в режиме обучения выполнять с следующей последовательности:

1. Сканирование объекта.
2. Составление геометрической матрицы поверхности сканируемого объекта.
3. Построение 3D модели детали на основе геометрической матрицы поверхности сканируемого объекта.
4. Выбор на 3D модели поверхностей или участков поверхностей, подлежащих термоупрочнению с использованием ПК.
5. Генерация постпроцессором программного кода.
6. Сохранение созданной управляющей программы упрочнения обрабатываемой детали в памяти УЧПУ и/или ПК.
7. Задание режимов обработки (требуемой мощности и скорости движения).

Структурная схема работы системы в режиме подготовки программы представлена на рис. 1.

Алгоритм работы лазерного технологического комплекса, оснащенного бинокулярным триангуляционным лазерным датчиком ЛД2 в режиме обучения по осям X и Y представлен на рис. 2.

Отсутствие достаточно точных моделей лазерного упрочнения, сложность управления технологическим процессом и большое число факторов, влияющих на его протекание, не позволяют однозначно задавать режимы обработки. Ввиду этого при подготовке программы обработки с выбором режимов используют результаты экспериментов или простые расчеты. При этом обычно используется достаточно большое количество итераций.

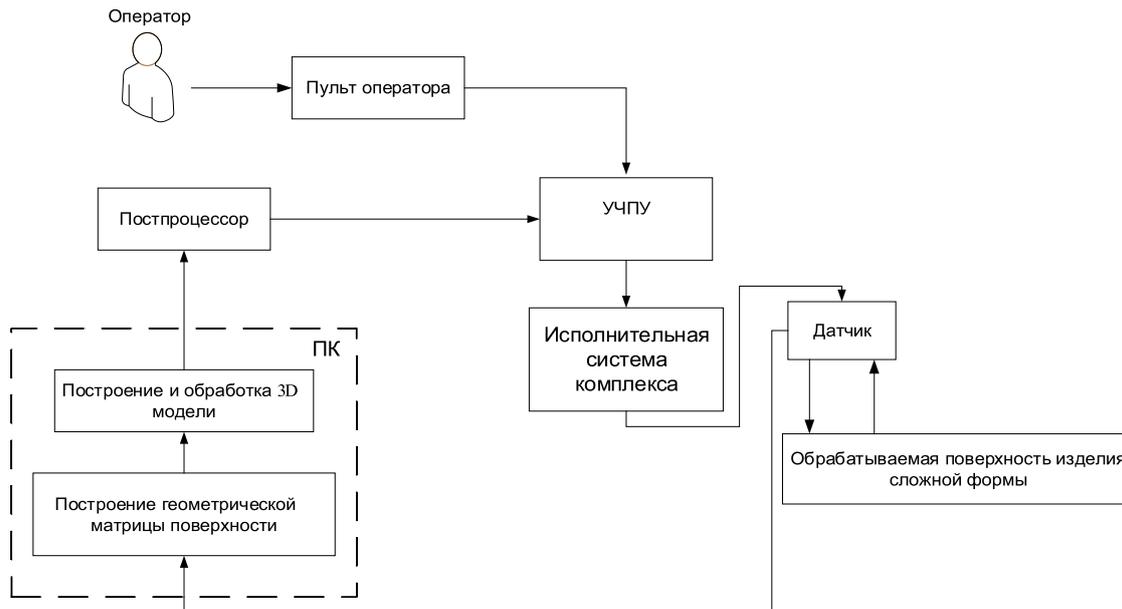


Рис. 1. Структурная схема системы автоматизированной подготовки управляющих программ в режиме обучения



Рис. 2. Алгоритм работы лазерного технологического комплекса, оснащенного бинокулярным триангуляционным лазерным датчиком ЛД2 в режиме обучения по осям X и Y

Требуемое время воздействия лазерного луча  $t$  на поверхность в случаях, когда требуемая глубина закаленного слоя известна (например, из условия допустимого износа детали в процессе эксплуатации или с учетом допустимого числа перешлифовок и т.д.), определяется по выражению

$$t = \pi \cdot Z^2 \cdot [T_{пл} / (T_{пл} - T_{зак})]^2 / 4 \cdot a, \quad (1)$$

здесь  $a$  – коэффициент теплопроводности материала,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $T_{зак}$  – температура

нагрева материала, необходимая для заковки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{пл}$  – предельная температура нагрева до оплавления детали,  $^{\circ}\text{C}$ .

Требуемая величина эффективной плотности мощности –  $Q_{эф}$  источника излучения может быть определена по формуле

$$Q_{эф} = \lambda \cdot (T_{пл} - T_{пл}) / A \cdot Z, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала,  $\text{Вт}/(\text{см} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$A$  – коэффициент поглощения энергии лазерного излучения материалом детали.

Для закалки на требуемую глубину радиус лазерного луча –  $r$  на детали можно определить по формуле

$$r = \left[ \gamma \cdot A \cdot P_0 \cdot \frac{Z}{\pi} \cdot \lambda \cdot (T_{пл} - T_{зак}) \right]^{1/2}. \quad (3)$$

Здесь  $\gamma$  – коэффициент, отражающий часть энергии, поглощенной обрабатываемым материалом;  $P_0$  – мощность источника излучения, Вт.

Требуемая скорость движения лазерного луча может быть определена по выражению

$$V_{зак} = 2r/t = [(8a \cdot (T_{пл} - T_{зак})^{3/2} / \pi \cdot T_{пл}^2 \cdot Z^{3/2}) \cdot (\gamma \cdot A \cdot P_0 / \pi \cdot \lambda)^{1/2}], \text{ (см/с)}. \quad (4)$$

Методика выбора режимов лазерного термоупрочнения в классическом варианте представляет собой итерационный поиск необходимых параметров на базе выражений (1)–(4) с неоднократной проверкой на образце-свидетеле. Однако лазерное термоупрочнение протекает с высокими скоростями, величины которых существенно влияют на структуру и качество закаленного слоя поверхности. На основании этого целесообразно режимы лазерного термического упрочнения назначать с использованием одновременно проведения натурального эксперимента и компьютерного расчета.

На рис. 3 приведен предлагаемый алгоритм выполнения параллельных натурального и машинного экспериментов.

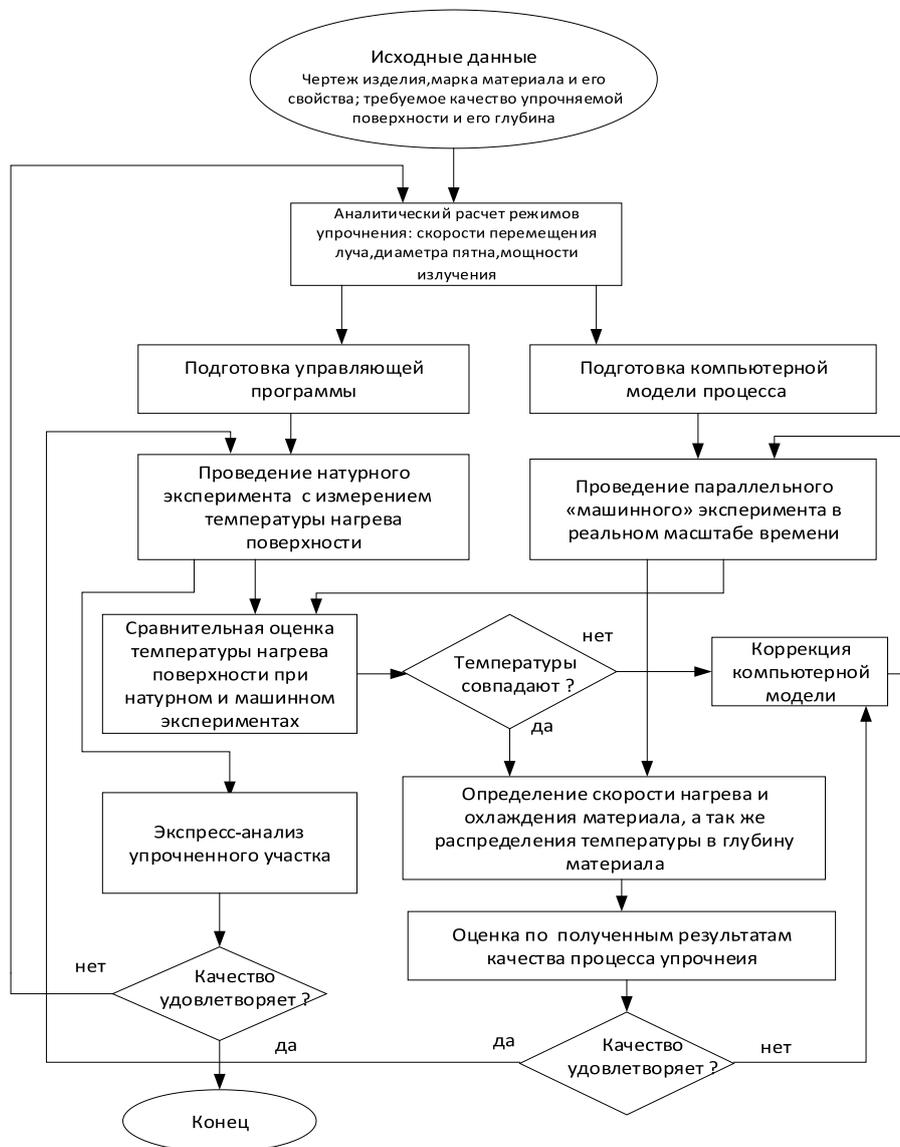


Рис. 3. Алгоритм выполнения параллельных натурального и машинного экспериментов

Ось Z

10	384	402	420	431	438	442	427	369	269	165	
9	573	615	663	718	777	853	909	866	725	493	
8	754	825	919	1028	1138	1223	1214	1122	954	746	
7	897	994	1103	1225	1325	1339	1264	1111	949	792	
6	964	1055	1187	1292	1347	1317	1117	936	773	743	
5	963	1054	1185	1290	1351	1329	1131	945	772	723	
4	896	993	1101	1219	1313	1326	1254	1107	948	791	
3	753	824	918	1027	1137	1222	1214	1122	954	745	
2	572	615	664	719	775	846	893	851	720	495	
1	384	402	419	430	447	444	413	367	293	202	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ось X

Рис. 4. Матрица температур модели нагрева поверхности изделия из стали 40X

Для проведения эксперимента необходим датчик измерения температуры нагрева при воздействии лазерного луча на материал и программный продукт моделирования этого воздействия. В качестве датчика температуры может быть использован оптический инфракрасный пирометр, но поскольку источник нагрева не является точечным, для повышения точности эксперимента целесообразно в качестве датчика использовать более дорогой тепловизионный модуль, описанный в работе [5]. Такой модуль позволяет осуществлять матричное измерение температуры нагрева и оценивать ее распределение по поверхности. Датчик температуры должен быть закреплен на оптической головке и постоянно направлен на пятно излучения на поверхности.

На рис. 4 представлена матрица температур нагрева поверхности стали 40X, упрочняемой многоканальным лазером, при моделировании с использованием пакета моделирования физических процессов COMSOL.

При подготовке программы моделирования следует отобразить геометрические параметры и массу упрочняемого изделия, используя метод конечных элементов. Проводятся параллельные натурный и «машинный» (симуляция) эксперименты. На рис. 4 представлена матрица температур нагрева поверхности стали 40X, упрочняемой многоканальным лазером комплекса ЛК-5В, при моделировании с использованием пакета моделирования физических процессов COMSOL.

По оси Z изображена температура нагрева поверхности по ширине теплового пятна равной 10 мм. По оси X изображена температура нагрева поверхности изделия по направлению движения теплового пятна в миллиметрах.

После проведения эксперимента следует сравнить температуру нагрева поверхностей реальной и модельной, и при отклонении более 5% корректируются параметры модели (теплофизические характеристики материала). По модели оцениваются тепловые процессы и в глубину материала.

### Выводы

1. Предложен алгоритм подготовки управляющих программ для координатных перемещений в процессе термоупрочнения поверхностей деталей сложных форм на лазерных технологических комплексах на основе сканирования объектов обработки с использованием бинокулярных триангуляционных лазерных датчиков.

2. Приведены зависимости для предварительного назначения режимов лазерного термоупрочнения.

3. Предложен алгоритм выполнения параллельных натурального и машинного экспериментов, позволяющий сократить время и повысить точность режима лазерного термоупрочнения.

### Список литературы

1. Григорьянц А.Г. Лазерная техника и технология: В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов. – М.: Высшая школа, 1987. – 191 с.
2. Умнов В.П. Взаимосвязь компонентов и структурная модель манипулятора оптики лазер-робота / В.П. Умнов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2010. – № 3. – С. 46–52.
3. Производство электроники и систем промышленной автоматизации // ООО «ИНКОМ» [Электронный ресурс]. – URL: <http://iic-incom.com/ru> (дата обращения: 13.06.2018).
4. Эффективные решения для оборудования с ЧПУ // ООО «НТЦ ГеММа» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gemma.ru> (дата обращения: 13.06.2018).
5. Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы 3-го поколения. – М.: Логос, 2011. – 240 с.