УДК 67.05

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ

Умнов В.П., Старостин Д.А.

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

Повышение стабильности лазерного термоупрочнения и его использование для изделий различной достаточно сложной геометрической формы возможно путем качественного управления технологическим процессом в автоматизированных системах на базе применения роботов, а также широкого использования моделей и современных подходов к структурному и параметрическому синтезу систем интеллектуального управления объектами, работающими в условиях нестационарности и неопределенности с учетом особенностей рабочего инструмента – лазерного луча. Предложена структура двухконтурной интеллектуальной системы управления, содержащей контур стабилизации температуры поверхностного слоя и контур коррекции параметров упрочняемого слоя. Такая структура позволит получить поверхность с переменной глубиной и (или) твердостью упрочненного слоя в случае ее неравномерного износа по условиям эксплуатации объекта, а также стабилизировать термический цикл в недетерминированных условиях, обеспечивая инвариантность процесса к внешним возмущениям. Система содержит параллельные модели нагрева материала, включая модель термического цикла.

Ключевые слова: лазерное термоупрочнение, интеллектуальная система управления, модель

SYSTEM MANAGEMENTS BY ROBOTIC TECHNOLOGICAL PROCESS OF THE LASER WORKHARDENING

Umnov V.P., Starostin D.A.

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

Increase of stability of the laser work hardening and his use for the wares of different difficult enough geometrical form maybe by a quality management by a technological process in CASS on the base of application of robots, and similarly deployment of models and modern going near the structural and self-reactance synthesis of the systems of intellectual management by objects working in the conditions of not stationarity and vagueness taking into account the features of working instrument – laser ray. The structure of double-circuit intellectual control system offers, to the containing a contour stabilizing of temperature of superficial layer and contour of correction of parameters of hardenable layer. Such structure will allow to get a surface with a variable depth and (or) hardness of the work-hardened layer in case of her uneven wear on external of object environments, and also to stabilize a thermal cycle in nondeterministic terms, providing the invariance of process to external indignations. The system contains the parallel models of heating of material, including the model of thermal cycle.

Keywords: laser work hardening, intellectual control system, model

Лазерное упрочнение металлов значительно улучшает надежность, долговечность и другие эксплуатационные показатели изделий за счет повышения их износостойкости, теплостойкости и твердости. Усилия специалистов в области лазерного упрочнения сегодня направлены главным образом на создание высокоэффективных автоматизированных комплексов, обеспечивающих необходимую точность временного и локального дозирования теплового воздействия.

Однако в современных условиях возможности лазерного технологического оборудования используются далеко не полностью. Это объясняется в основном нестабильностью конечного результата лазерного упрочнения, которая зависит от априорной неопределенности теплофизических свойств материала упрочняемого изделия, существенной погрешности необходимого дозирования энергии излучения в зону нагрева, неравномерности распределения плотности мощности, статических и динамических погрешностей исполнительной системы и других факторов.

Одним из направлений в создании автоматизированной системы управления лазерным технологическим процессом является обеспечение системного подхода при планировании экспериментальных и теоретических работ с целью полного описания взаимосвязи между механическими характеристиками, определяемыми условиями эксплуатации изделия и техническими параметрами комплекса [1]. При этом

отмечается необходимость создания многокомпонентных банков данных взаимосвязи показателей качества, свойств материалов, параметров лазерного технологического процесса, технологических приемов и технических параметров на основе математических моделей. По существу, такая система является автоматизированной системой подготовки производства и не является системой непосредственного управления ходом технологического процесса в понимании классической теории. Разработке алгоритмов управления автоматизированными установками лазерного термоупрочнения, включая роботы, на основе моделей процессов, организации обратных связей и выработке на их основе управляющих воздействий на технологические параметры посвящено достаточно большое количество работ, например [2–4]. В большинстве известных работ используются стационарные модели и одноконтурные системы управления по температуре нагрева поверхности объекта упрочнения. В качестве измерительных преобразователей в таких системах используются пирометры. Бесконтактное измерение температуры на поверхности детали в зоне обработки позволяет системе управления осуществлять регулирование процессом лазерного термического упрочнения в режиме реального времени преимущественно за счет изменения скорости перемещения луча. Такие системы не способны измерять скорости нагрева и охлаждения зоны воздействия луча на поверхность изделия и, следовательно, глубину упрочненного слоя, которая является основным показателем результата термообработки.

В работе [3] предлагается для контроля поверхностного распределения температур детали использовать тепловизор и по поверхностному градиенту вычислять градиент по глубине закалки, определяющий процесс теплового воздействия. Такое устройство матричного типа обрабатывает избыточную информацию, поскольку изображение перемещается относительно матрицы и создает дополнительные «геометрические шумы». Кроме этого, использование тепловизора предопределяет простую форму обрабатываемого изделия, ограничивая его применение. При лазерной термообработке изделий цилиндрической формы для организации обратной связи предлагается использовать оптико-электронную систему [4], в которой в качестве датчика используются две линейки инфракрасных датчиков, устанавливаемых с учетом скорости термообработки и времени насыщения, характеризующего неустановившийся режим распределения тепла от источника излучения. Данная система способна идентифицировать скорости нагрева и охлаждения зоны воздействия луча на поверхность изделия заданной формы только для определенной постоянной скорости движения теплового пятна.

Кардинальным путем повышения стабильности лазерного термоупрочнения и его использования для изделий различной достаточно сложной геометрической формы является создание качественного управления технологическим процессом в автоматизированных системах на базе применения роботов, а также широкого использования моделей и современных подходов к структурному и параметрическому синтезу систем интеллектуального управления объектами, работающими в условиях нестационарности и неопределенности с учетом особенностей рабочего инструмента – лазерного луча. Одной из возможных структур эффективных систем управления процессом лазерного термоупрочнения при использовании роботов является двухконтурная система, структура которой приведенная на рис. 1.

В системе имеется два контура регулирования: контур стабилизации температуры на поверхности объекта обработки и контур коррекции параметров упрочняемого слоя.

Первый контур предназначен для поддержания постоянства температуры нагрева поверхностного слоя в недетерминированных условиях (не запрограммированное изменение плотности материала объекта, его геометрии, условий теплоотвода или других параметров) и включает в себя датчик температуры нагрева поверхности объекта обработки, функциональный преобразователь ФП1, регуляторы скорости, приводы перемещения подвижных звеньев лучепровода и непосредственно лучепровод, включая оптическую головку. Датчик температуры нагрева поверхности объекта обработки (например, пирометр) должен иметь зону измерения, соответствующую площади пятна температурного воздействия лазера на объект для получения интегрального параметра. Функциональный преобразователь ФП1 служит для согласования сигнала с датчика температуры с сигналом коррекции на регулятор скорости и реализует определенную нелинейную зависимость, зависящую от физико-химических свойств материала объекта обработки, его геометрии и параметров лазерного излучения. Исходя из этого в качестве функционального преобразователя ФП1 целесообразно использовать нейроконтроллер. Регуляторы скорости (ПИД-регуляторы) имеют три входа: задающее воздействие, традиционный сигнал обрат-

ной связи с датчиков приводов и преобразованный с помощью обратных якобианов сигнал с преобразователя ФП1. Быстродействие контура стабилизации температуры определяется главным образом электромеханической постоянной времени приводов, а качество процесса регулирования – настройкой параметров ПИД-регуляторов.

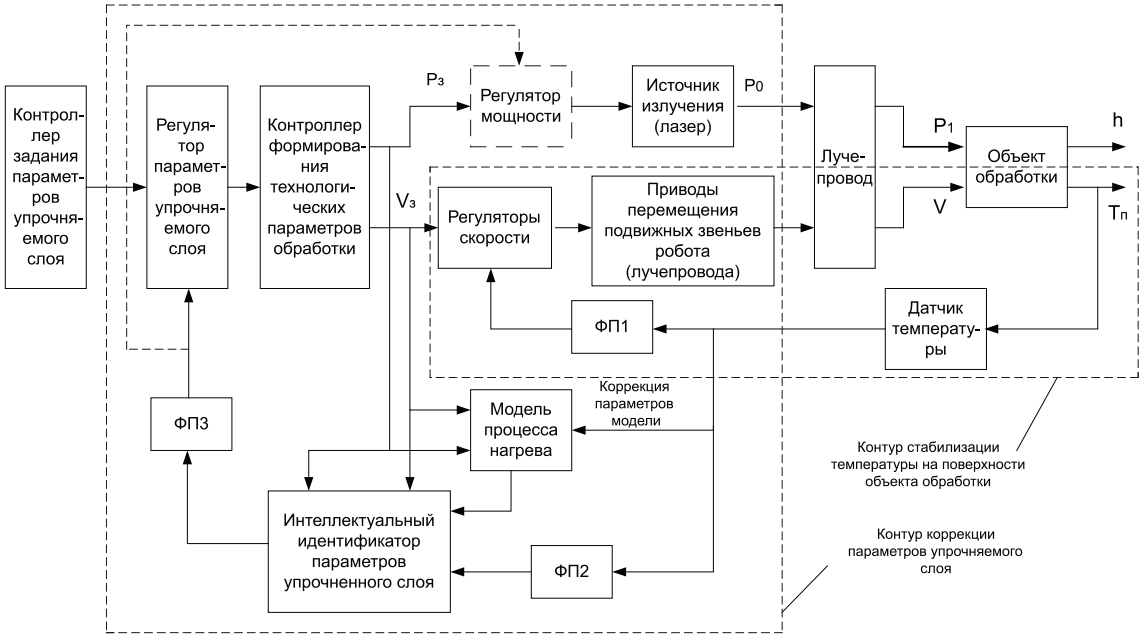

Рис. 1. Структурная схема двухконтурной системы управления роботизированным технологическим процессом лазерного термоупрочнения

Контур коррекции параметров упрочняемого слоя служит для обеспечения требуемого качества протекания технологического процесса исходя из анализа температурного цикла воздействия на материал объекта обработки в реальном масштабе времени. Такая коррекция необходима для получения поверхностей с переменной глубиной и (или) твердостью поверхностного слоя в случае ее неравномерного износа по условиям эксплуатации объекта, а также стабилизации термического цикла в недетерминированных условиях, обеспечивая инвариантность процесса. Для реализации предлагаемой коррекции используется принцип построения адаптивных систем с параллельной моделью процесса. В качестве модели может быть использована 3D-модель нагрева объекта, построенная, например, с использованием пакета Comsol.

Интеллектуальный идентификатор параметров упрочняемого слоя на основании информации с датчика температуры нагрева поверхности, параллельной модели процесса, заданий скорости перемещения луча и мощности излучения в реальном масштабе времени оценивает термический цикл, происходящий в материале объекта и как следствие, глубину и твердость закаленного слоя. В регуляторе параметров упрочняемого слоя производится изменение технологического задания.

На рис. 2 приведен пример 3D-модели нагрева образца из стали 40Х лазерным лучом, перемещающимся с контурной скоростью 10 мм·с$^{-1}$. Диаметр точки фокуса 8 мм, при этом оценивается изменение температуры в 10 сечениях по направлению движения на глубину до 4 мм с интервалом времени 0,1 с.

На основании 3D-модели и информации с датчика температуры в интеллектуальном идентификаторе производится 3D-оценка термического цикла в материале с желаемым процессом. На рис. 3 приведен пример кривых термического цикла для одного из сечений рис. 2.

В системе управления предполагается коррекция 3D-модели нагрева в реальном масштабе времени. Для этого предлагается использовать сравнительную оценку параметров, полученных с датчика температуры, с параллельной моделью нагрева поверхностного слоя в процессе движения, пример которой приведен на рис. 4.

Для обучения контроллера можно воспользоваться графиком зависимости средней температуры пятна нагрева поверхности лазерным лучом от скорости обработки. Такой график, полученный для рассматриваемого случая, приведен на рис. 5.

Координаты секторов		Временные интервалы (в секундах)																													
Ось X	Ось Y	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
1	4	20	20	20	20	21	20	15	38	135	277	397	443	442	424	401	379	358	339	322	307	294	281	271	261	253	253	253	253	253	253
1	3	20	20	20	20	21	20	17	30	85	169	243	280	290	290	284	277	269	262	254	247	240	233	227	221	216	216	216	216	216	216
1	2	20	20	20	20	20	20	19	24	47	85	124	152	169	180	187	191	193	194	194	192	190	188	186	183	181	181	181	181	181	181
1	1	20	20	20	20	20	20	20	20	21	26	40	59	78	96	110	121	129	135	140	143	145	146	147	147	146	146	146	146	146	146
2	4	20	20	21	22	23	20	10	107	396	701	899	878	779	690	618	559	510	469	435	407	382	361	342	326	313	313	313	313	313	313
2	3	20	20	20	21	22	20	15	69	229	406	529	536	498	462	430	403	380	359	341	325	311	298	286	275	266	266	266	266	266	266
2	2	20	20	20	21	21	20	18	39	103	180	245	270	275	277	275	272	268	263	257	251	245	238	232	226	222	222	222	222	222	222
2	1	20	20	20	20	20	20	20	19	16	24	45	79	111	136	153	166	174	180	183	184	184	183	182	180	178	178	178	178	178	178
3	4	19	19	24	28	15	7	55	295	619	936	1173	1232	1126	963	832	733	655	592	541	499	464	433	407	384	366	366	366	366	366	366
3	3	19	19	22	25	18	5	38	171	356	543	694	755	708	634	572	524	484	450	422	397	375	356	339	323	311	311	311	311	311	311
3	2	20	20	21	22	19	14	26	78	155	242	321	370	378	370	359	349	338	327	315	305	294	284	274	265	258	258	258	258	258	258
3	1	20	20	20	20	20	20	18	14	17	32	59	95	136	170	193	207	216	220	222	222	220	217	214	210	207	207	207	207	207	207
4	4	18	20	29	26	5	6	152	440	709	930	1153	1223	1129	1171	996	863	764	687	623	570	526	489	456	428	407	407	407	407	407	407
4	3	19	20	25	23	5	6	91	252	409	546	688	801	824	762	680	614	563	521	484	453	425	401	379	360	345	345	345	345	345	345
4	2	19	20	22	22	14	14	45	110	180	250	327	397	434	435	421	405	390	376	361	346	332	319	307	295	286	286	286	286	286	286
4	1	20	20	20	20	21	19	14	12	22	43	72	107	149	190	220	238	247	252	252	250	247	243	238	233	228	228	228	228	228	228
5	4	19	18	26	34	2	10	167	502	693	749	984	1201	1183	1131	1072	935	827	739	667	609	560	519	483	452	429	429	429	429	429	429
5	3	19	19	23	28	10	10	100	287	403	451	597	786	854	806	729	663	607	559	518	483	452	425	401	380	363	363	363	363	363	363
5	2	20	19	21	23	16	11	49	124	181	220	296	392	448	459	449	435	419	402	385	368	353	338	324	311	301	301	301	301	301	301
5	1	20	20	20	20	21	20	14	12	22	55	81	110	153	198	232	253	264	268	269	266	262	257	251	245	240	240	240	240	240	240
6	4	19	18	26	34	2	10	168	524	709	758	969	1173	1184	1131	1073	935	827	739	668	609	560	519	483	452	429	429	429	429	429	429
6	3	19	19	23	28	10	10	100	299	412	455	589	778	851	807	730	663	607	559	518	483	452	425	402	380	364	364	364	364	364	364
6	2	20	19	21	23	16	11	49	128	184	221	293	390	448	459	450	436	419	402	385	369	353	338	324	311	301	301	301	301	301	301
6	1	20	20	20	20	21	20	14	11	26	55	82	111	153	198	232	253	264	269	269	266	262	257	251	245	240	240	240	240	240	240
7	4	18	20	29	26	5	19	150	433	706	928	1156	1223	1130	1171	997	863	765	688	624	571	527	489	457	429	407	407	407	407	407	407
7	3	19	20	25	23	5	6	90	249	407	545	689	808	829	763	680	614	563	521	485	453	426	401	380	360	346	346	346	346	346	346
7	2	19	20	22	22	14	14	45	108	179	250	327	399	435	435	421	406	391	376	361	346	332	319	307	295	286	286	286	286	286	286
7	1	20	20	20	20	21	19	15	12	22	43	72	107	149	190	220	238	248	252	252	251	247	243	238	233	229	229	229	229	229	229
8	4	19	19	24	28	16	4	54	297	621	935	1173	1232	1123	963	832	734	655	593	542	500	465	434	408	385	367	367	367	367	367	367
8	3	19	19	22	25	18	4	38	173	357	542	691	752	706	634	572	524	484	451	423	398	376	357	340	324	312	312	312	312	312	312
8	2	20	20	21	22	19	14	26	78	155	241	320	369	377	369	359	349	338	327	316	305	295	285	275	266	258	258	258	258	258	258
8	1	20	20	20	20	20	20	18	14	17	32	59	95	136	170	193	207	216	221	222	222	220	218	214	211	207	207	207	207	207	207
9	4	20	20	21	22	23	20	10	108	393	694	891	870	774	688	619	560	512	471	437	409	384	362	344	327	314	314	314	314	314	314
9	3	20	20	20	21	22	20	15	69	228	402	525	531	495	460	431	404	381	361	343	326	312	299	287	276	267	267	267	267	267	267
9	2	20	20	20	21	21	20	18	39	102	179	243	268	274	276	276	273	269	264	258	252	246	239	233	227	222	222	222	222	222	222
9	1	20	20	20	20	20	20	20	19	16	24	45	79	111	136	154	166	175	180	183	185	185	184	183	181	179	179	179	179	179	179
10	4	20	20	20	20	21	20	16	40	136	277	398	448	450	432	409	385	362	343	325	309	295	283	272	261	254	254	254	254	254	254
10	3	20	20	20	20	21	20	18	31	86	169	244	283	295	294	289	281	273	264	256	249	241	234	228	222	217	217	217	217	217	217
10	2	20	20	20	20	20	20	19	25	48	85	125	153	171	183	189	193	195	196	195	193	191	189	186	183	181	181	181	181	181	181
10	1	20	20	20	20	20	20	20	20	21	27	40	59	79	97	111	122	130	136	141	144	146	147	147	147	147	147	147	147	147	147

Рис. 2. 3D-модель нагрева образца из стали 40Х движущимся лазерным лучом

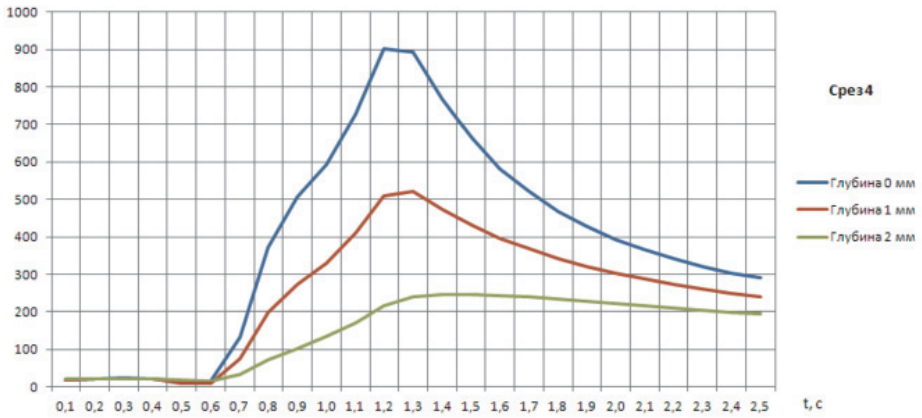

Рис. 3. Кривые термического цикла для одного из сечений

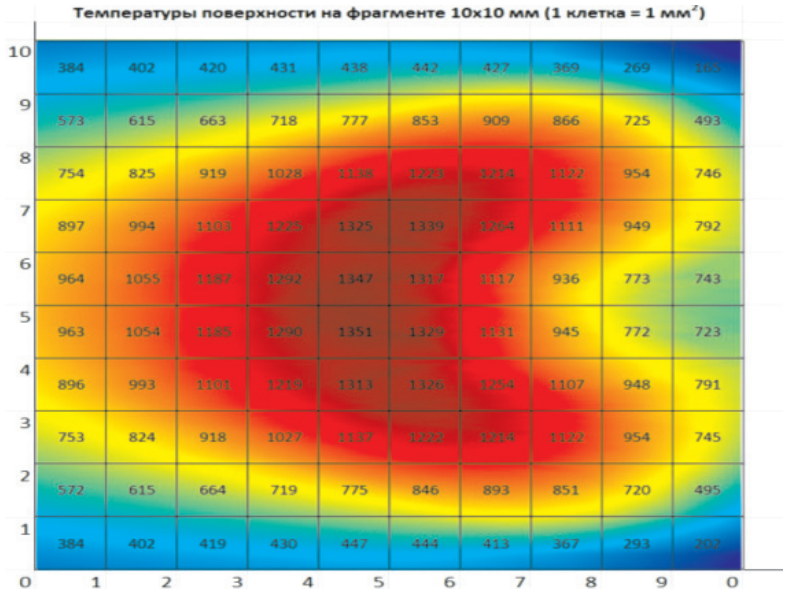

Рис. 4. Модель нагрева поверхностного слоя в процессе движения

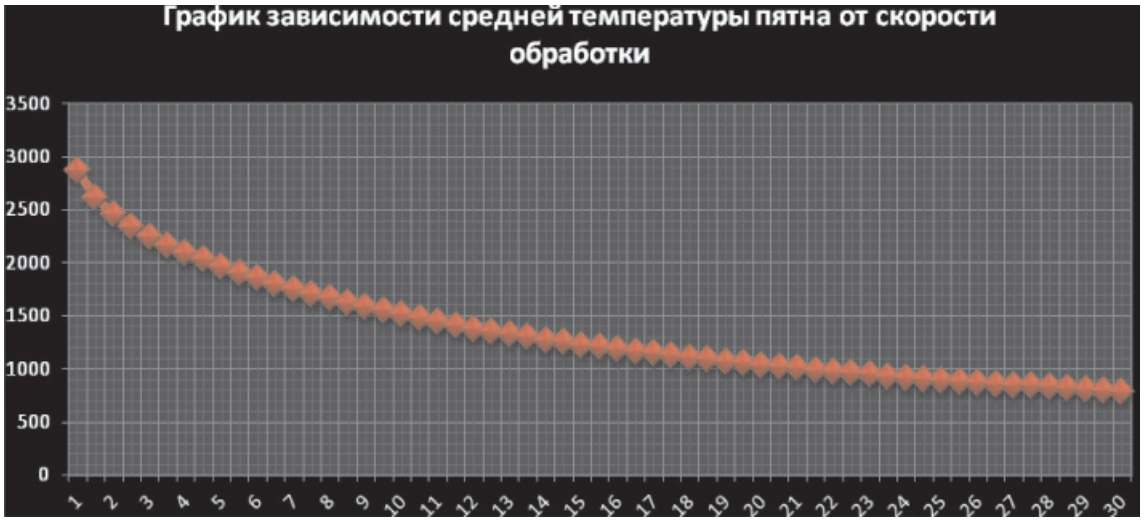

Рис. 5. График зависимости средней температуры пятна от скорости обработки

Для построения контроллера предлагается использовать двухслойную архитектуру нейронной сети Элмана [5] с массивом входов с диапазоном значений [minmax(P)], имеющую не менее 70 нейронов с функцией активации tansig в слое 1 и 1 нейрон с функцией активации purelin в слое 2, с прямой передачей сигнала. При этом в качестве обучающего алгоритма может быть выбран алгоритм Levenberg-Marquardt (trainlm). Этот алгоритм обеспечивает быстрое обучение, но требует много ресурсов. В случае, если для реализации этого алгоритма не хватит оперативной памяти, можно использовать другие алгоритмы (trainbfg, trainrp, trainscg, traincgb, traincgf, traincgp, trainoss, traingdx). По умолчанию используется trainlm. Указанная сеть формируется с помощью процедуры

net=newff([minmax(P)],[70 1],{‘tansig’,’purelin’},’trainlm’).

Рис. 6. График обучения нейросети

На рис. 6 показан график обучения построенной нейросети

Оптимальные результаты обучения были достигнуты при числе нейронов на входе до 90 и числе эпох обучения до 2000.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-01364).

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. Григорьянц А.Г. Упрочнение поверхности сплавов лазерным излучением / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов, В.М. Тарасенко и др. // Поверхность, физика, химия, механика. – 1983. – № 9. – С. 124–131.

3. Кирилина А.Н. Применение средств тепловизионного контроля в системе управления процессом лазерного термического упрочения // Автоматизация в промышленности. – 2007. – № 1. – С. 5–7.

4. Патент РФ на полезную модель № 110669 / А.Н. Шилин, В.В. Медведев Устройство управления процессом лазерной закалки материала // Патент РФ на полезную модель № 110669. Опубл. 27.11. 2011.

5. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.

References

1. Grigor'janc A.G. Lazernaja tehnika i tehnologija: V 7 kn. Kn. 3. Metody poverhnostnoj lazernoj obrabotki / A.G. Grigor'janc, A.N. Safonov. – M.: Vysshaja shkola, 1987. 191 p.

2. Grigor'janc A.G. Uprochnenie poverhnosti splavov lazernym izlucheniem / A.G. Grigor'janc, A.N. Safonov, V.M. Tarasenko i dr. // Poverhnost', fizika, himija, mehanika. 1983. no. 9. pp. 124–131.

3. Kirilina A.N. Primenenie sredstv teplovizionnogo kontrolja v sisteme upravlenija processom lazernogo termicheskogo uprochenija // Avtomatizacija v promyshlennosti. 2007. no. 1. pp. 5–7.

4. Patent RF na poleznuju model' № 110669 / A.N. Shilin, V.V. Medvedev Ustrojstvo upravlenija processom lazernoj zakalki materiala // Patent RF na poleznuju model' № 110669. Opubl. 27.11. 2011.

5. Kruglov V.V., Borisov V.V. Iskusstvennye nejronnye seti. Teorija i praktika. M.: Gorjachaja linija Telekom, 2001. 382 p.

Рецензенты:

Гоц А.Н., д.т.н., профессор кафедры тепловых двигателей и энергетических установок, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир;

Кульчицкий А.Р., д.т.н., старший научный сотрудник, главный специалист, ООО «Завод инновационных продуктов «КТЗ», г. Владимир.

Работа поступила в редакцию 06.11.2014.