

УДК 621.785

Н.А. Чиченев, профессор, д-р техн. наук

Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",

ул. Ленинский проспект, 4, г. Москва, Россия, 119049

chich38@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РАЗМЕРНОСТЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ

Предложены безразмерные параметры для описания процессов лазерной закалки, которые одновременно учитывают как технологические параметры лазерной термообработки, так и теплофизические характеристики обрабатываемого металла, и имеют ясный физический смысл.

Ключевые слова: *лазерная закалка, теория размерностей, безразмерные параметры.*

Введение. Одним из перспективных методов повышения работоспособности технологического инструмента ОМД является лазерное поверхностное упрочнение, практическое применение которого стало возможным благодаря появлению промышленных лазеров высокой мощности. При лазерной обработке нагрев металла осуществляется с поверхности, при этом не требуется применять какие-либо охлаждающие среды, что существенно упрощает технологию термоупрочнения. Кроме того, процессы лазерной обработки характеризуются малым временем воздействия и обеспечивают практически полное отсутствие деформаций обрабатываемых изделий. За счет изменения параметров лазерного излучения и технологических режимов обработки удается в широких пределах регулировать скорости нагрева и охлаждения металла, а также время облучения, благодаря чему становится возможным получить требуемые структуры и свойства металлов в зоне лазерного воздействия [1, 2].

Для лазерной термообработки могут быть использованы лазеры как импульсного, так и непрерывного действия. Основными факторами, определяющими выбор типа лазера, являются глубина упрочненного слоя и производительность процесса. Для упрочнения технологического инструмента ОМД в условиях промышленного производства наибольшее распространение получили СО₂-лазеры непрерывного действия, так как, по сравнению с импульсными лазерами, они обладают более высокой мощностью и обеспечивают большую глубину зоны лазерного воздействия и высокую производительность.

Основными технологическими параметрами процесса непрерывной лазерной термообработки являются: P - мощность излучения лазера непрерывного действия; d_n - диаметр лазерного пятна на поверхности обрабатываемой детали; V - линейная скорость перемещения лазерного луча относительно обрабатываемой поверхности; s - расстояние (шаг) между серединами соседних лазерных дорожек; $K_{\text{пог}}$ - коэффициент поглощения лазерного излучения покрытием, наносимого на поверхность обрабатываемой детали для снижения ее отражательной способности.

Для лазерной обработки различных материалов одним важным фактором является плотность q мощности лазерного излучения, равная отношению мощности лазерного излучения P к площади поверхности $A = \pi \cdot d_n^2$, на которую оно падает

$$q = 4 \cdot P / (\pi \cdot d_n^2)$$

В данном выражении предполагается, что энергия излучения равномерно распределена по сечению цилиндрического лазерного пучка диаметром d_n . При термоупрочнении величина плотности для большинства металлов и сплавов лежит в диапазоне $q = 10 \dots 100$ кВт/см².

Основными характеристиками теплофизических свойств металлов, которые необходимо учитывать при лазерной термообработке, являются: λ – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоемкость; $\alpha = \lambda / (c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности, где ρ – плотность; $T_{\text{пл}}$ – температура плавления; $T_{\text{зак}}$ – температура закалки.

Целью данной статьи является определение безразмерных параметров для описания процессов лазерной закалки на основе критериальных уравнений теории размерностей и подобия.

Основное содержание работы. В настоящее время в теории теплопроводности отсутствуют общие методы точного решения задачи лазерной термообработки металлов с учетом присущих ей нелинейностей. Поэтому на практике часто приходится использовать различные упрощения и прибегать к приближенным способам решения на основе численных методов, принципов моделирования и др. В частности для построения экспериментальных и теоретических моделей можно применить методы теории размерностей и подобия.

В теории размерности основной теоремой является так называемая π -теорема (теорема Е. Buckingham), которая говорит о том, что любое физико-математическое уравнение можно записать в виде безразмерного критериального уравнения, включающего в себя основные размерности всех входящих в уравнение величин [3, 4]. В системе СИ используются следующие размерности основных

величин: единица длины – метр (м); единица времени – секунда (с); единица массы – килограмм (кг); единица температуры – Кельвин (К).

Известно, что максимальная глубина h_{\max} закалки и температура поверхности $T_{\text{пов}}$ при лазерной термообработке металлов являются функциями ряда технологических параметров обработки и теплофизических характеристик металла

$$h_{\max} = F_1(1, \alpha, q, t, T_{\text{пл}}, T_{\text{зак}}), \tag{1}$$

$$T_{\text{пов}} = F_2(1, \alpha, q, t). \tag{2}$$

Используя π -теорему, безразмерное критериальное уравнение можно представить, например, в следующем виде

$$h_{\max} = C_1 \cdot (\alpha \cdot t)^{1/2} \cdot [q_{\text{пл}} \cdot (\alpha \cdot t)^{1/2} / (\lambda \cdot T_{\text{пл}})]^g \cdot (T_{\text{зак}} / T_{\text{пл}})^n, \tag{3}$$

$$T_{\text{пов}} = T_{\text{пл}} = C_2 \cdot (T_{\text{пл}} / 1) \cdot (\alpha \cdot t)^{1/2}, \tag{4}$$

где C_1, C_2, g, n – константы, устанавливаемые экспериментально.

При выводе этих уравнений можно воспользоваться методом Рэлея, для чего функцию максимальной глубины закалки (1) будем искать в форме

$$h_{\max} = C_1 \cdot 1^e \cdot \alpha^f \cdot q^g \cdot t^h \cdot T_{\text{пл}}^m \cdot T_{\text{зак}}^n. \tag{5}$$

Размерности параметров, входящих в это уравнение, выражаются через размерности основных единиц в следующем виде:

коэффициент теплопроводности λ	- [кг·м·с ⁻³ ·К ⁻¹]
коэффициент температуропроводности a	- [м ² ·с ⁻¹]
плотность мощности лазерного излучения q	- [кг·с ⁻³]
максимальная глубина закалённого слоя h_{\max}	- [м]
время t	- [с]
температура плавления $T_{\text{пл}}$ и закалки $T_{\text{зак}}$	- [К]

Подставив эти размерности в (4.5), получим

$$[м] = C_1 \cdot [кг \cdot м \cdot с^{-3} \cdot К^{-1}]^e \cdot [м^2 \cdot с^{-1}]^f \cdot [кг \cdot с^{-3}]^g \cdot [с]^h \cdot [К]^m \cdot [К]^n$$

или

$$[м] = C_1 \cdot [кг]^{e+g} \cdot [м]^{e+2f} \cdot [с]^{-3e-f-3g+h} \cdot [К]^{-e+m+n}. \tag{6}$$

Так как степени обеих сторон уравнения должны быть одинаковы, то получаем систему алгебраических уравнений

$$e + g = 0; \quad e + 2f = 16; \quad -3t - f - 3g + h = 0; \quad -e + m + n = 0.$$

Решая эту систему, находим значения коэффициентов и после их подстановки в (5) получаем формулу для максимальной глубины закалки

$$h_{\max} = C_3 \cdot (\lambda \cdot T_{\text{пл}} / q_{\text{пл}}) \cdot (T_{\text{зак}} / T_{\text{пл}})^n = C_3 \cdot (\alpha \cdot t)^{1/2} \cdot (T_{\text{зак}} / T_{\text{пл}})^n. \tag{7}$$

Из этой формулы, которая полностью аналогична выражению (3), следует, что время воздействия t и плотность мощности q лазерного излучения являются определяющими факторами для максимальной глубины закалки. Поскольку для конкретного металла отношение $T_{\text{зак}} / T_{\text{пл}}$ - величина постоянная, то, приняв в выражении (7) $n = 1$, получаем простейшую формулу для определения максимальной глубины закалки

$$h_{\max} = C_4 \cdot (\lambda \cdot T_{\text{зак}} / q_{\text{пл}}) = C_4 \cdot (\alpha \cdot t)^{1/2} \cdot (T_{\text{зак}} / T_{\text{пл}}). \tag{8}$$

Из этой формулы видно, что на величину максимальной глубины закалки оказывает влияние температура плавления металла $T_{\text{пл}}$ либо в явном виде, либо косвенно через плотность мощности $q_{\text{пл}}$, которая в соответствии с (4) связана с температурой поверхности металла $T_{\text{пов}} = T_{\text{пл}}$ и временем t воздействия лазерного излучения.

Установленные закономерности находятся в хорошем соответствии с результатами эксперимента (рисунок 1), приведенными в работе [5]. Анализ рассмотренных выше зависимостей позволяет сделать вывод, что максимальная глубина закалки при лазерной термообработке обратно пропорциональна плотности q мощности источника тепла (рисунок 2).

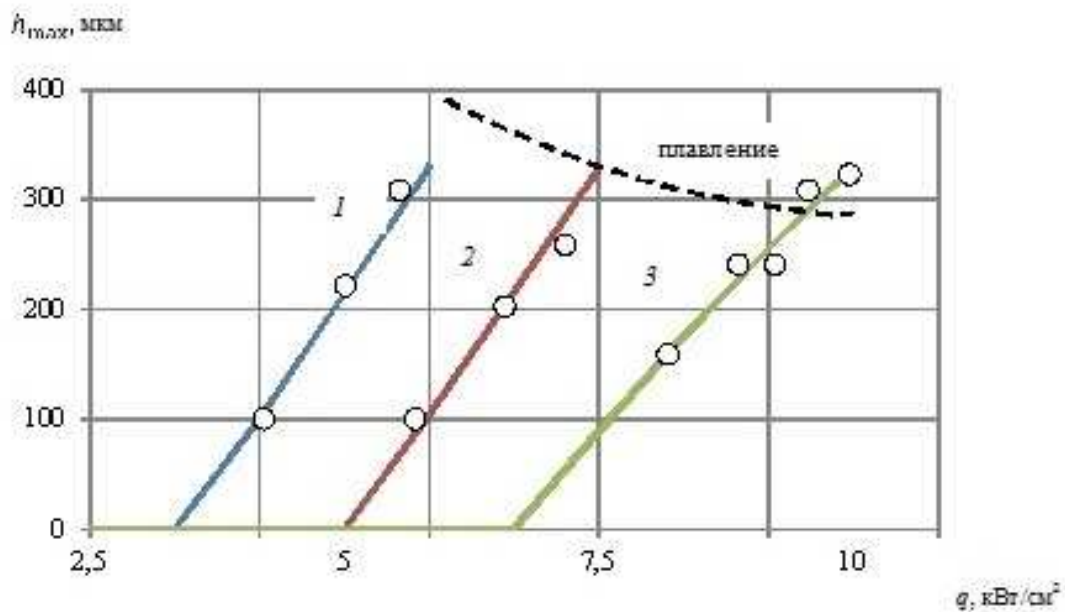


Рисунок 1 – Зависимость глубины закалки стали AiSi4304 [5] от плотности q мощности лазерного излучения при $d_n = 3$ мм и скоростях обработки V : 1 - 0,65 м/мин; 2 - 1,5 м/мин; 3 - 2,0 м/мин.

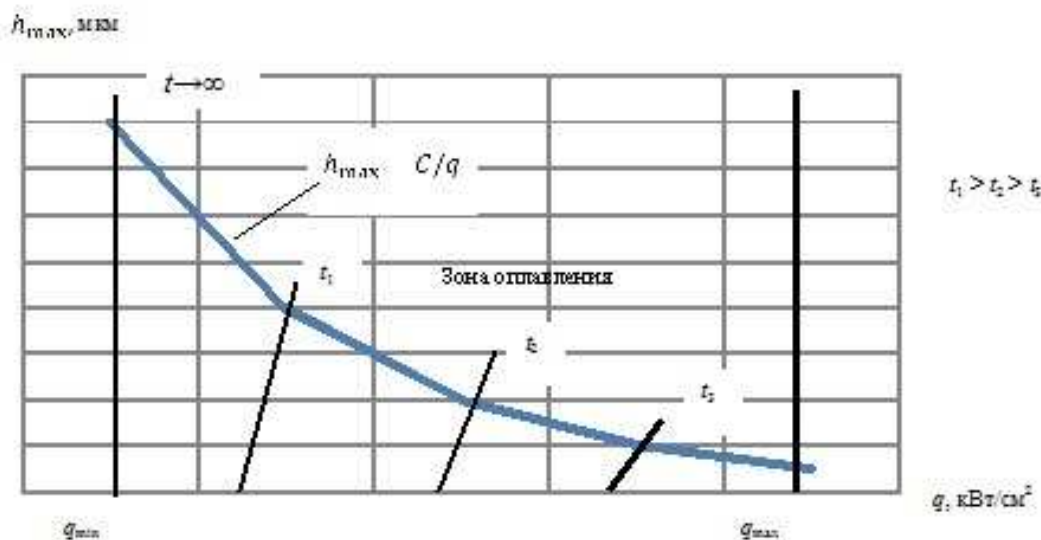


Рисунок 2 – Зависимость максимальной глубины закалки h_{max} от плотности q мощности лазерного излучения при различном времени воздействия

Если температура поверхности обрабатываемого материала при лазерном нагреве находится в интервале $T_{зак} \leq T_{пов} \leq T_{пл}$, то из приведенных выше формул можно сделать следующие выводы:

- 1) при одном и том же времени воздействия источника тепла, т.е. при $t = \text{const}$, с увеличением плотности q мощности источника тепла, возрастает глубина закалки h_{max} ;
- 2) когда температура поверхности равна температуре плавления металла, т.е. $T_{пов} = T_{пл}$, глубина зоны закалки h_{max} тем больше, чем меньше плотность q мощности лазерного излучения;
- 3) разным значениям плотности q мощности источника тепла, как правило, соответствуют разные максимальные значения глубины закаленной зоны h_{max} .

В настоящее время при анализе процессов лазерной термообработки металлов выбор безразмерных параметров лазерной обработке металлов различными авторами осуществляется достаточно произвольно. В то же время в теории размерностей и подобия разработаны общие принципы, согласно которым, например, рекомендуется выбирать такие параметры, которые имеют определенный

физический смысл и которые, как правило, применяются в классических теориях (механики сплошных сред, теплопроводности и др.).

Для построения статистической модели глубины зоны лазерного воздействия от параметров лазерного излучения в наших исследованиях использовали методы математического планирования эксперимента, а с целью обобщения полученных результатов на основе применения соотношений теории подобия предложено использовать следующие безразмерные (обобщенные) параметры:

- 1) коэффициент перекрытия лазерных дорожек

$$S^* = S/d;$$

- 2) относительная мощность лазерной обработки

$$P^* = 2 \cdot K_{\text{пог}} \cdot P_0 / (d \cdot \lambda \cdot T_{\text{пл}});$$

- 3) относительная скорость перемещения лазерного луча

$$V^* = V \cdot d / (4 \cdot a);$$

- 4) относительная глубина закалённого слоя

$$Z^* = 4 \cdot h \cdot P_0 / [P \cdot d^2 \cdot (T_{\text{пл}} - T_{\text{зак}}) \cdot \lambda].$$

Здесь S — расстояние между лазерными дорожками, м; d — диаметр луча, м; $K_{\text{пог}}$ — коэффициент поглощения; P — мощность лазерного излучения, Вт; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $T_{\text{зак}}$ и $T_{\text{пл}}$ — температуры соответственно закалки и плавления, °С; V — скорость перемещения лазерного луча, м/с; a — коэффициент температуропроводности, м²/с; $h_{\text{зак}}$ — глубина закаленного слоя, м.

Поясним физический смысл этих параметров.

Коэффициент перекрытия S^* характеризует влияние последующих соседних лазерных дорожек на предыдущие: при $S^* < 1$ дорожки перекрываются и структура материала в предыдущей зоне лазерного воздействия изменяется; обычно при $S^* > 2$ взаимным влиянием соседних дорожек можно пренебречь, и поэтому данное условие часто используется при лазерной закалке технологического инструмента ОМД.

Величина P^* соответствует отношению эффективной мощности лазерного излучения $P_{\text{эф}} = K_{\text{пог}} \cdot P$ к мощности, которое может быть отведено от поверхности за счет теплопроводности вглубь металла без его плавления.

Величина V^* равна отношению скорости перемещения лазерного луча к скорости распространения температурного фронта в данном материале.

В качестве относительной величины Z^* принято отношение глубины закаленного слоя $h_{\text{зак}}$ к максимально возможному теоретическому значению $h_{\text{макс}}$, которое достигается в том случае, когда температура на поверхности металла доходит до температуры его плавления.

Выводы. На основе критериальных уравнений теории размерностей и подобия получены безразмерные (обобщенные) параметры для описания процессов лазерной закалки. По сравнению с известными из научно-технической литературы параметрами, предложенные безразмерные комплексы выгодно отличаются тем, что они одновременно учитывают как технологические параметры лазерной термообработки, так и теплофизические характеристики обрабатываемого металла; кроме того, они имеют ясный физический смысл.

Перспективы дальнейших исследований в данной области. Применение безразмерных параметров дает возможность построения математических моделей лазерной закалки, и на этой основе осуществить разработку и оптимизацию технологии лазерной термообработки.

Библиографический список использованной литературы:

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. - 663 с.
2. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: Справочник: В 3-х томах / под ред. А.Г. Рахштадта, Л.М. Капуткиной, С.Д. Прокошкина – М.: Интермет Инжиниринг. – Том 1: Металловедение и термическая обработка стали и чугуна, 2005. - 647 с.; Том 2: Стрoение стали и чугуна, 2005. - 528 с.; Том 3: Термическая и термомеханическая обработка стали и чугуна. 2007. – 920 с.
3. Седов Л.И. Методы подобия и размерностей в механике. – М.: Наука, 1965. – 388 с..
4. Чижиков Ю.М. Теория подобия и моделирование процессов обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1970. – 296 с.
5. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Энергоатомздат, 1985. – 207 с.

Поступила в редакцию 23.01.2014 г.

Чиченев Н.А. Застосування теорії розмірності для опису процесу лазерного загартування

Запропоновані безрозмірні параметри для опису процесів лазерного загартування, які одночасно враховують як технологічні параметри лазерної термообробки, так і теплофізичні характеристики оброблюваного металу, і мають ясний фізичний сенс.

Ключові слова: лазерне загартування, теорія розмірності, безрозмірні параметри.

Chichenev N.A. Application of the theory of dimensions for the description of lazer training process

The dimensionless parameters for the description of processes of laser training which at the same time consider both technological parameters of laser heat treatment, and heatphysical characteristics of processed metal are offered, and make clear physical sense.

Keywords: laser training, theory of dimensions, dimensionless parameters.