

УДК 621.793

О.Г. ДЕВОЙНО, д-р техн. наук
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

В.В. ЖАРСКИЙ, д-р техн. наук
ООО «РУХСЕРВОМОТОР», г. Минск, Республика Беларусь

А.С. КАЛИНИЧЕНКО, д-р техн. наук
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

А.П. ПИЛИПЧУК, канд. техн. наук
Военная академия Республики Беларусь, г. Минск

С. ЛОЧС
Белорусско-Латвийский научно-инновационный центр, г. Минск

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ПЛАСТИНЫ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Перспективными способами создания трехмерных объектов с использованием лазерного излучения являются аддитивные технологии (AdditiveFabrication/AF) и технологии бесконтактной лазерной деформации. Выполнен анализ процесса формирования напряженного состояния при лазерной обработке. Разработана модель, описывающая процесс возникновения продольных температурных напряжений при лазерной обработке пластины на основе использования нормально-полосового источника гипотезы плоского сечения. Представлены результаты расчетов продольных деформаций и напряжений для пластин разного сечения.

Ключевые слова: лазерная обработка, температурные напряжения

Введение. Приоритетными задачами и направлениями научно-технического, технологического и инновационного развития Республики Беларусь является создание конкурентоспособного и высокотехнологичного машиностроительного сектора экономики на базе имеющихся и новых технологий. Решение данных задач возможно на основе использования прогрессивных видов обработки, позволяющих получать уникальные свойства, недостижимые в рамках традиционных технологических подходов. Одним из таких видов обработки является лазерная обработка поверхности деталей, основанная на возможности лазерного излучения создавать на малом участке поверхности высокие плотности теплового потока, необходимые для интенсивного нагрева или расплавления практически любого материала. В отличие от традиционных технологий термической и химико-термической обработок поверхности материалов в машиностроении, лазерная обработка характеризуется более высокой эффективностью и уникальностью получаемых результатов. В настоящее время активно развиваются способы создания трехмерных объектов с использованием лазерного излучения. Примером данных технологий являются аддитивные технологии (AdditiveFabrication/AF) и технологии бесконтактной лазерной деформации [1–5]. Характерной особенностью данных методов является использование лазерного излучения для локального спекания/сплавания исходного материала или бесконтактной деформации без приложения внешних сил с помощью температурных и структурных напряжений. При этом в зависимости от параметров обработки возможно формирование качественного изделия без дефектов. Интерес к данным технологиям в качестве альтернативы традиционным технологическим методам для произ-

водства товарной продукции обусловлен высокой гибкостью, т. е. способностью переналадки оборудования в кратчайшие сроки для производства разнотипных деталей. Данные технологии целесообразно использовать, когда традиционные методы оказываются не только дороги в плане материальных потерь, но и чрезвычайно затратны по времени (рисунок 1).

Постановка задачи исследования. Актуальной задачей является назначение оптимальных способов, вариантов, схем и режимов лазерной обработки деталей на стадии их проектирования. Одними из основных параметров качества при лазерной обработке являются остаточные напряжения, сопутствующие любой обработке поверхности детали высококонцентрированным источником энергии. Причиной появления внутренних

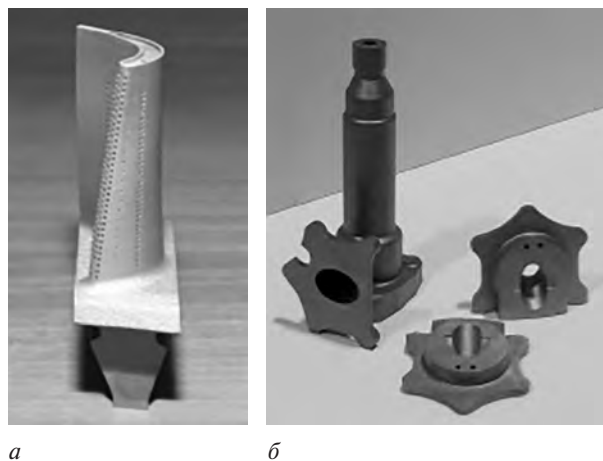
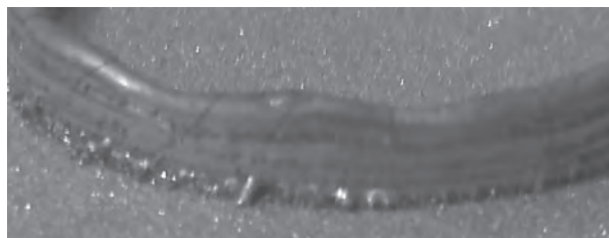


Рисунок 1 — Детали авиационных двигателей изготовленные с применением AF: а — лопатка турбины из никелевого сплава; б — детали системы топливоподдачи (материал Ti64)



а



б

Рисунок 2 — Трещины в газотермическом покрытии после лазерной обработки (а) и в образце, полученном селективным лазерным спеканием (б)

температурных напряжений при лазерной обработке являются градиенты температуры в зоне лазерного воздействия и химического состава, что является причиной образования трещин при лазерной обработке газотермических покрытий и лазерной наплавке (рисунок 2). Вместе с тем внутренние напряжения являются основой перспективного способа бесконтактной деформации. Отмеченные обстоятельства определяют необходимость исследования и выявления закономерностей процесса формирования напряженно-деформированного состояния при лазерной обработке, а также поиска эффективных способов управления данным процессом [6–7].

Выбор оптимальных режимов требует проведения натуральных исследований, которые требуют существенных затрат времени и технологических ресурсов. Локальность воздействия при лазерной обработке и высокие скорости нагрева и охлаждения затрудняют проведение их экспериментального исследования. В настоящее время широко применяются методы компьютерного моделирования тепловых процессов и напряженно-деформированного состояния материалов в условиях лазерного нагрева, например, с использованием коммерческого пакета мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics [8]. На рисунке 3 представлены компьютерная модель образца, а также



Рисунок 3 — Моделирование детали, созданной методом лазерной наплавки металла [8]

фотографии натуральных образцов с одним и шестью слоями металла.

Применение данного подхода для моделирования процесса лазерной наплавки позволило провести анализ развития процесса формирования внутренних напряжений и спрогнозировать остаточные тепловые напряжения и деформации, возникающие при лазерной наплавке. Однако внутренняя часть программного комплекса является «черным ящиком», что затрудняет процесс решения принципиально новых задач, не предусмотренных разработчиками. Также необходимо отметить значительные размеры машинного кода, сопутствующих данных программ и обязанность поддерживать совместимость новых версий с предыдущими.

Известные методики расчета напряженного состояния не всегда дают адекватные количественные оценки. Так, известные математические модели хорошо описывают процесс формирования напряженного состояния при сварке пластин и наплавке валика на кромку пластины, когда диаметр пятна высококонцентрированного источника соизмерим с толщиной детали. Однако для случая лазерной наплавки, когда диаметр пятна значительно меньше характерных размеров детали, применение данных моделей нецелесообразно. Отмеченные обстоятельства определили *цель представленной работы* — анализ процесса формирования напряженного состояния в полубесконечном теле при лазерной обработке.

Описание модели. Исследуемый объект представляет собой пластину с геометрическими размерами L , H , δ . На поверхность пластины воздействует лазерный луч, что является причиной возникновения температурного поля (рисунок 4).

Для расчета процесса нагрева и охлаждения изделия при лазерной обработке необходимо выбрать расчетную

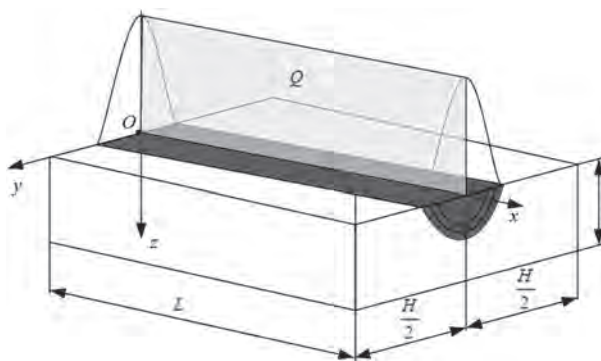


Рисунок 4 — Расчетная схема лазерной обработки

схему, выделяющую основные особенности рассматриваемого процесса. В зависимости от толщины детали расчет ведут по одной из схем [9]. При значительной толщине температурное поле практически затухает в массе металла; тогда влиянием нижней ограничивающей плоскости можно пренебречь и вести расчет по схеме источника на поверхности полубесконечного тела. Если толщина незначительна, температура вблизи источника практически выравнивается по толщине, тогда расчет ведут по схеме линейного источника в пластине. Если толщина мала так, что нельзя пренебречь ограничивающим влиянием нижней плоскости, но не настолько, чтобы считать температуру равномерно распределенной по толщине, выбирают для расчета схему точечного источника на поверхности плоского слоя толщиной δ .

Учитывая особенности процесса наплавки, при расчете температурного поля использовалось решение для полубесконечного тела [9–10], нагрев которого осуществляется нормально-полосовым источником. Значительные температурные градиенты являются причиной образования напряжений в исследуемом материале. Механизм формирования напряженного состояния в полубесконечном теле при воздействии поверхностного высококонцентрированного источника энергии рассмотрен в работах Г.А. Николаева, Н.О. Окерблома, И.П. Трочуна, Г.Б. Талыпова и других авторов [10–11]. С практически достаточной степенью приближения будем рассматривать как линейный или одномерный [11]. Использование данного допущения стало возможно на основе анализа характера расположения трещин (см. рисунок 2), который позволил сделать вывод об определяющей роли продольных напряжений.

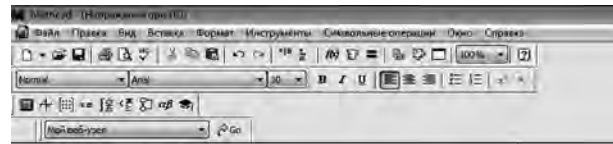
Для определения напряжений используется решение И.А. Биргера [12–13]:

$$\sigma_{\text{темп}} = E \left(\frac{\int E\alpha_T T dF}{\int E dF} + y \frac{\int E y \alpha_T T dF}{\int y^2 E dF} + x \frac{\int E x \alpha_T T dF}{\int x^2 E dF} - \alpha_T T \right) = E \left(\epsilon_0 + y \frac{d\varphi_x}{dz} + x \frac{d\varphi_y}{dz} - \alpha_T T \right).$$

В формуле параметр деформации ϵ_0 представляет удлинение оси пластины. Параметры деформации $\frac{d\varphi_x}{dz}$ и $\frac{d\varphi_y}{dz}$ выражают составляющие векторы кривизны после деформации.

Формула применима и для пластин переменного сечения, когда упруго-геометрические характеристики сечения изменяются по длине. Также на основе применения данной формулы возможно определение напряжений в случае, когда появляются пластические деформации (метод переменных параметров упругости) [14].

Результаты исследования. Определение температурного поля и напряжений при лазерной обработке выполнено с использованием математического пакета MathCad на сетке 51×51 . Результаты расчета напряжений (таблица $\Sigma\Sigma 2$), значение суммы напряжений ($\Sigma\sigma$) представлены на рисунке 5. Полученное значение суммы напряжений ($\Sigma\sigma$) свидетельствует о том, что эпюра напряжений уравновешена.



	43	44	45	46	47	48	49	50
32	-64.487	-65.731	-66.438	-66.57	-66.094	-64.985	-63.221	-60.788
33	-56.697	-57.749	-58.288	-58.278	-57.697	-56.49	-54.667	-52.205
34	-48.28	-49.126	-49.484	-49.32	-48.604	-47.312	-45.426	-42.932
35	-39.385	-39.993	-40.16	-39.833	-38.985	-37.593	-35.639	-33.111
36	-30.085	-30.485	-30.452	-29.956	-28.971	-27.474	-25.448	-22.886
37	-20.568	-20.735	-20.498	-19.828	-18.701	-17.097	-15.001	-12.401
38	-10.94	-10.671	-10.427	-9.581	-8.312	-6.599	-4.43	-1.794
39	-1.32	-1.015	-0.364	0.657	2.069	3.89	6.132	8.805
40	8.182	8.72	9.576	10.77	12.324	14.251	16.565	19.274
41	17.468	18.234	19.289	20.653	22.344	24.376	26.761	29.505
42	26.451	27.437	28.685	30.213	32.038	34.171	36.624	39.402
43	35.057	36.254	37.687	39.372	41.324	43.555	46.072	48.884
44	43.226	44.624	46.232	48.067	50.14	52.462	55.041	57.884
45	50.912	52.498	54.271	56.246	58.433	60.842	63.48	66.351
46	58.081	59.842	61.77	63.875	66.169	68.658	71.35	74.249
47	64.711	66.635	68.705	70.932	73.324	75.888	78.63	81.554
48	70.795	72.868	75.069	77.406	79.888	82.521	85.309	88.257
49	76.331	78.541	80.86	83.299	85.863	88.558	91.388	94.357
50	81.332	83.664	86.091	88.621	91.259	94.011	96.879	...

$\Sigma\sigma = -4.761 \times 10^{-12}$

Рисунок 5 — Результаты расчета напряжений

На рисунках 6, 7 представлены результаты расчетов продольных деформаций и напряжений в полубесконечном теле с учетом принятых допущений. На рисунках 6 а, 7 а представлены температурные деформации и положение плоскости сечения, определенного из условия равновесия внутренних напряжений, развивающихся в поперечном сечении, и их моментов для пластин с размерами $H = 40$ мм, $\delta = 10$ мм и $\delta = 20$ мм. На рисунках 6 б, 7 б представлены эпюры продольных напряжений в различных сечениях $y = 0$; $y = 0,1$; $y = 0,2$; $y = 0,3$; $y = 0,4$ для данных пластин.

Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод о влиянии размеров тела на напряженное состояние. В сечении $y = 0$, расположенном на линии движения источника, напряжения сжимающие, а с удалением от линии движения ($y = 0,1$; $y = 0,2$; $y = 0,3$;

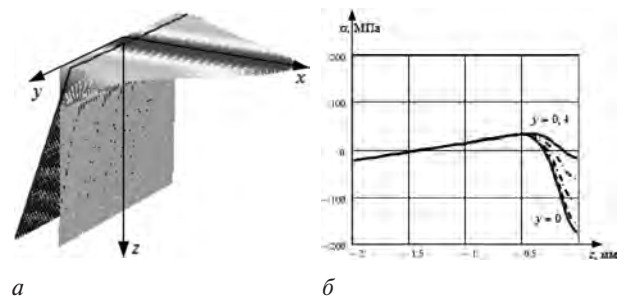


Рисунок 6 — Распределение деформаций (а) и продольных напряжений (б) для $\delta = 10$ мм

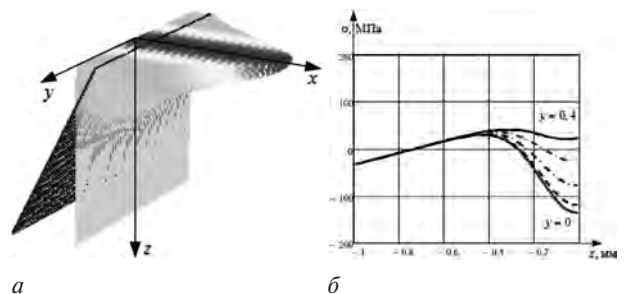


Рисунок 7 — Распределение деформаций (а) и продольных напряжений (б) для $\delta = 20$ мм

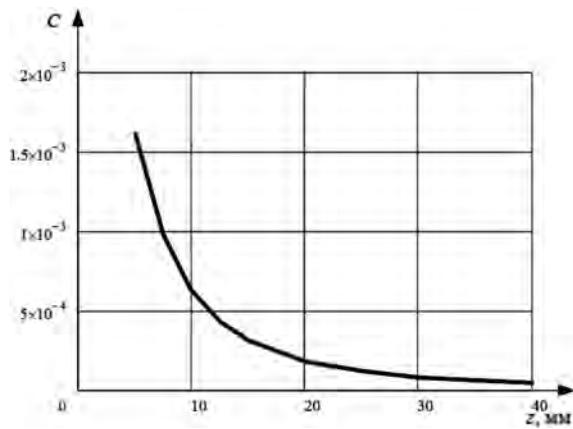


Рисунок 8 — Изменение кривизны пластины C в зависимости от толщины

$y = 0,4$) происходит перераспределение напряжений, что можно объяснить в рамках гипотезы плоских сечений.

На рисунке 8 представлено изменение кривизны пластины C в зависимости от ее толщины. Из представленного графика видна возможность изменения формы пластины («поводки»). Таким образом, применение разработанной модели позволяет на этапе разработки технологии оценить внутренние напряжения и деформации в пластине.

Выводы. Разработана модель, описывающая процесс возникновения продольных температурных напряжений при лазерной обработке пластины на основе использования нормально-полосового источника. Представлены результаты расчетов продольных деформаций и напряжений для пластин разного сечения.

Применение разработанной модели позволяет на этапе разработки технологии оценить внутренние напряжения и деформации в пластине. Установлено, что в сечении $y = 0$, расположенном на линии движения источника, формируются максимальные сжимающие напряжения, а с удалением от линии движения ($y = 0,1$; $y = 0,2$; $y = 0,3$; $y = 0,4$) происходит перераспределение напряжений, что можно объяснить в рамках гипотезы плоских сечений.

Использование подхода целесообразно на этапе разработки технологии, что позволит повысить оперативность и снизить стоимость разработки.

Список литературы

1. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. — СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2013. — 222 с.
2. Логачева, А.И. Аддитивные технологии производства ответственных изделий из металлов и сплавов (обзор) / А.И. Логачева, Ж.А. Сентюрина, И.А. Логачев // Перспективные материалы. — 2015. — № 5. — С. 5–15.
3. Шишковский, И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий / И.В. Шишковский. — М.: ФИЗ-МАТЛИТ, 2009. — 424 с.
4. Моделирование процесса бесконтактной лазерной деформации адаптивным методом / Л.Ф. Головкин [и др.] // Электронное моделирование. — 2011. — № 3. — С. 71–84.
5. Пилипчук, А.П. Использование самофлюсующихся сплавов для создания деталей методом селективного лазерного спекания / А.П. Пилипчук [и др.] // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. — 2016. — № 1(50). — С. 165–174.
6. Девойно, О.Г. Особенности температурного поля при селективном лазерном спекании / О.Г. Девойно, А.П. Пилипчук // Аддитивные технологии, материалы и конструкции: материалы науч.-техн. конф., Гродно, 5–6 октября 2016 г. — Гродно: ГрГУ, 2016. — С. 67–76.
7. Исследование процесса формирования поверхности методом селективного лазерного спекания из сплава ПГ-СР3 / О.Г. Девойно [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / редколлегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. — Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016. — С. 82–90.
8. Фоули, А. Оптимизация методов 3D-печати с помощью приложений для моделирования / А. Фоули // Новости COMSOL. — 2015. — С. 5–6.
9. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. — М.: ГНТИМЛ, 1951. — 298 с.
10. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справ. / Н.Н. Рыкалин [и др.]. — М.: Машиностроение, 1985. — 496 с., ил.
11. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
12. Биргер, И.А. Сопrotивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. — М.: Наука, 1986. — 560 с.
13. Биргер, И.А. Неравномерно нагретые стержни с переменными параметрами упругости // Расчеты на прочность. — Вып. 7. — М.: Машгиз, 1961/ — С. 76–109.
14. Пилипчук, А.П. Оценка напряженного состояния при лазерной обработке газотермических покрытий / А.П. Пилипчук, О.Г. Девойно, А.Л. Кочеров // Теоретич. и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. — 2014. — Вып. 29. — С. 134–137.

Devoino O.G., Jarski V.V., Kalinichenko A.S., Pilipchuk A.P., Lochs S.

Influence of geometric dimensions of plate on stressed state during laser processing

Advanced methods for creating three-dimensional objects using laser radiation are additive technologies and non-contact laser deformation technologies. The analysis of the formation process of a stressed state during laser processing is performed. A model describing the occurrence process of longitudinal temperature stresses during the plate laser processing is developed on the base of the normal-band source of the flat-section hypothesis. The results of calculations of longitudinal deformations and stresses for plates of different cross-sections are presented.

Поступил в редакцию 21.07.2017.