

УДК 621.76

Теплофизические эффекты лазерного сплавления металлических порошков при производстве изделий с отрицательными углами наклона

Савин Андрей Валерьевич^{1(*)}

savin_av@voenmeh.ru

Борейшо Анатолий Сергеевич¹

boreisho_as@voenmeh.ru

Джгмадзе Гванца Тенгизовна¹

dzhgamadze_gt@voenmeh.ru

Петрова Юлия Юрьевна¹

petrova_iuiu@voenmeh.ru

Смоленцев Сергей Сергеевич²

smolentsev@lsystems.ru

Тимофеев Владимир Андреевич²

timofeev@lsystems.ru

¹ БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия² АО «Лазерные системы», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Селективное лазерное сплавление металлических порошков позволяет уменьшить массу изделий при сохранении прочности. Однако при выращивании изделий с отрицательными углами более 45° к вертикали без дополнительных поддержек возникают недопустимые искажения формы изделия, вызванные термическими напряжениями. Проведен детальный анализ картины этих напряжений и соответствующих деформаций. Предложен метод, позволяющий решить проблему за счет локального предварительного подогрева зоны выращивания.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, термические напряжения, остаточные деформации, модуль упругости, предел текучести, уравнение теплопроводности

Введение. Метод селективного лазерного сплавления (СЛС) позволяет уменьшить массу изделий при сохранении прочности [1]. При этом СЛС имеет свои ограничения. Например, выращивание изделий с отрицательными наклонами более 45° к вертикали требует дополнительных поддержек, которые предотвращают искажения формы изделия [2]. Исследование картины развития этих напряжений и деформаций позволяет детально разобраться в причинах искажений формы и найти методы их устранения, не предусматривающие дополнительных технологических поддержек. Для такого анализа необходимо разработать упрощенную постановку задачи и соответствующую вычислительную процедуру.

Материалы и методы; результаты. В качестве объекта выбран предельный случай — горизонтальная балка с углом наклона к вертикали 90° , малый фрагмент которой показан на рис. 1. Пусть температура, горизонтальные напряжения и деформации зависят только от времени и вертикальной координаты z . Тепловое расширение приводит к изгибу балки, но боковые поверхности в силу симметрии остаются плоскими:

$$l(z) = l_0 \varepsilon(z) \left(1 + \frac{\sigma(z)}{E} + \alpha \Delta T(z) \right) = A + Bz.$$

Здесь l_{00} — исходная длина фрагмента, $\varepsilon(z)$ — функция, описывающая горизонтальные пластические деформации, $\sigma(z)$ — напряжения, $\alpha\Delta T(z)$ — тепловые деформации.

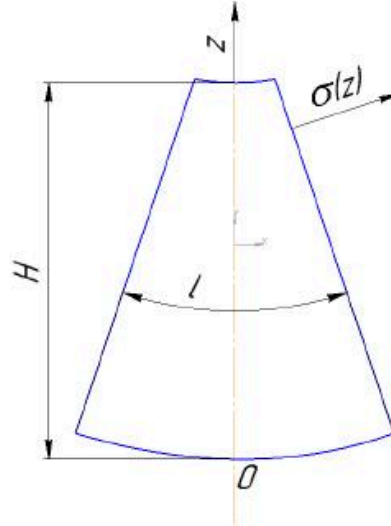


Рис. 1. Фрагмент тонкой горизонтальной балки толщиной H

Обозначим $z/H \equiv \bar{z}$, $Hb \equiv \bar{b}$, $a = A/l_{00}$, $b = B/l_{00}$. Условие равновесия сил и моментов приводит к двум уравнениям:

$$a \int_0^1 \frac{E}{\varepsilon} d\bar{z} + \bar{b} \int_0^1 \frac{E}{\varepsilon} \bar{z} d\bar{z} = \int_0^1 E(1 + \alpha\Delta T) d\bar{z}$$

$$a \int_0^1 \frac{E}{\varepsilon} \bar{z} d\bar{z} + \bar{b} \int_0^1 \frac{E}{\varepsilon} \bar{z}^2 d\bar{z} = \int_0^1 E(1 + \alpha\Delta T) \bar{z} d\bar{z}$$

Эти уравнения позволяют определить a , $\bar{b}$ и профиль $\sigma(z)$. Если напряжения превышают предел текучести, то производится коррекция функции $\varepsilon(\bar{z})$. Профиль температуры вычисляется как решение уравнения теплопроводности.

На рис. 2 приведены зависимости ε , σ и радиуса кривизны $R = A/B$ от z , t для стальной балки толщиной 1 мм, времени лазерного воздействия $t_{las} = 100$ мс, интенсивности излучения 10^6 Вт/см² и двух значений температуры подогрева T_{ini} . Верхняя поверхность охлаждается излучением, нижняя — теплоизолирована. Предварительный подогрев позволяет существенно уменьшить остаточную кривизну балки (рис. 3).

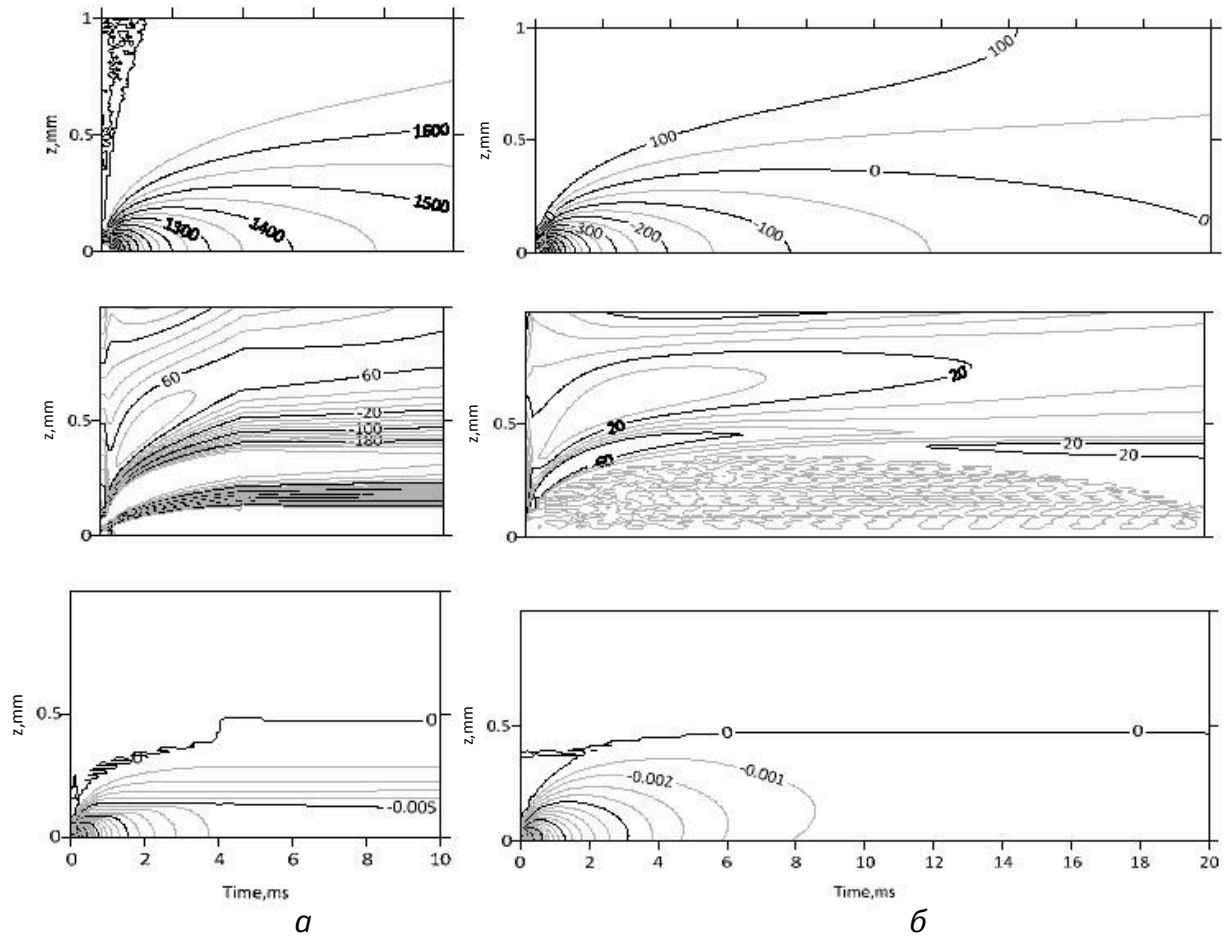


Рис. 2. Зависимости $T_L - T$, σ и ε от координаты и времени;
материал — сталь, толщина балки 1 мм;
а — $T_L - T_{ini} = 1700^\circ$; б — 150° .

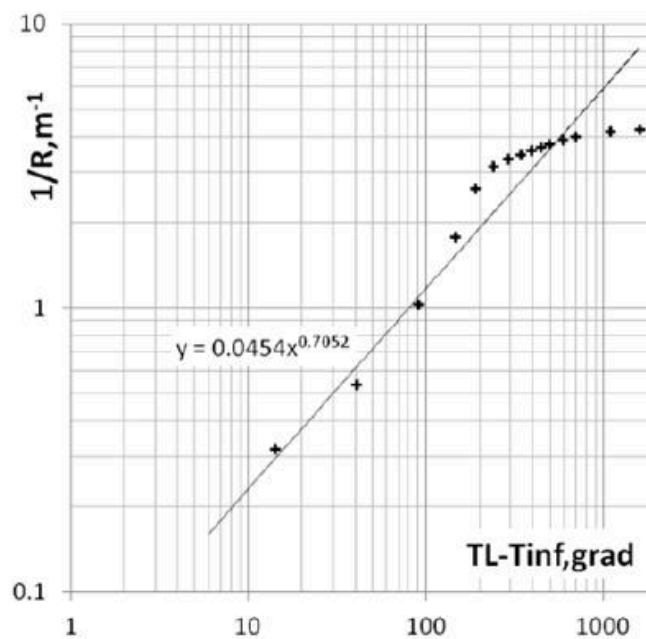


Рис. 3. Зависимость кривизны балки от температуры предподогрева
(T_L — температура плавления, T_{inf} — температура при $t \gg t_{las}$)

Заключение. Моделирование показывает, что предварительный локальный подогрев участка изделия позволяет расширить диапазон форм изделий, которые могут быть выращены без применения поддержек.

Список источников

- [1] Борейшо А.С., Джгамадзе Г.Т., Моисеев А.А. и др. Многоуровневое моделирование рабочих процессов селективного лазерного сплавления. *Фотоника*, 2022, т. 16, № 3, с. 212–219. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.3.212.219>
- [2] Li C., Liu J.F., Guo Y.B. Efficient multiscale prediction of cantilever distortion by selective laser melting. *Proc. of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, USA, 2016, pp. 236–246.