

УДК 621.791

ТЕРМОУПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СТЕРЖНЕ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

А. П. ПИЛИПЧУК¹, О. Г. ДЕВОЙНО¹, Д. Г. ДЕВОЙНО², О. Г. ГЕЛИВЕР³

¹Белорусский национальный технический университет

²Военная академия Республики Беларусь

³Белорусский научно-исследовательский институт транспорта «Транстехника»
Минск, Беларусь

При лазерной обработке в результате неравномерных нагрева и охлаждения с высокой скоростью, фазовых и структурных превращений возникают термические напряжения. Данные напряжения в значительной степени влияют на эксплуатационные характеристики поверхностного слоя и являются причиной трещинообразования при лазерной обработке. На рис. 1 и 2 изображены трещины в покрытии после лазерной обработки и в образце, полученном селективным лазерным спеканием из сплава ПГ-СР2 с использованием CO₂ – лазера «Комета». На основе анализа характера расположения трещин сделан вывод об определяющей роли продольных напряжений, действующих вдоль траектории источника. Для обеспечения качества поверхностного слоя необходимо при выборе режимов лазерной обработки прогнозировать напряженное состояние.

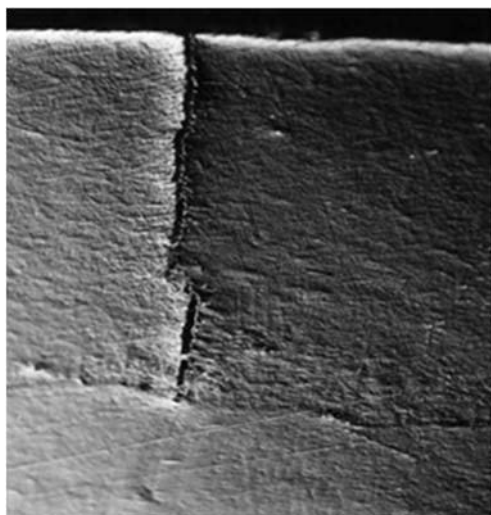


Рис. 1. Трещина в газотермическом покрытии после лазерной обработки

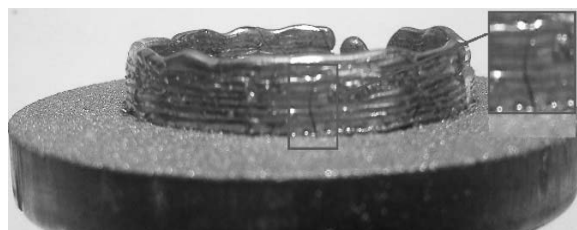


Рис. 2. Трещина в образце, полученном селективным лазерным спеканием

Механизм формирования напряженного состояния при воздействии поверхностного высококонцентрированного источника энергии рассмотрен в работах Г. А. Николаева, Н. О. Окерблома, И. П. Трочуна, А. Г. Григорьянца, В. С. Майорова и других авторов. В настоящей работе выполнен расчет термоупругих напряжений на основе использования решения И. А. Биргера:

$$\sigma_{mem} = E \left(\frac{\int E \alpha_T T dF}{\int E dF} + y \frac{\int E y \alpha_T T dF}{\int E y^2 dF} + x \frac{\int E x \alpha_T T dF}{\int E x^2 dF} - \alpha_T T \right) =$$

$$= E \left(\varepsilon_0 + y \frac{d\varphi_x}{dz} + x \frac{d\varphi_y}{dz} - \alpha_T T \right).$$

Данное решение основано на гипотезе плоских сечений: точки плоскости поперечного сечения после деформации лежат в одной плоскости, что позволяет использовать положение плоскости сечения в качестве показателя деформирования. Формула применима и для тел переменного сечения и с переменными упруго-геометрическими характеристиками сечения. Также на основе применения данной формулы возможно определение напряжений в случае, когда появляются пластические деформации (метод переменных параметров упругости).

Выполнен расчет термических упругих напряжений для призматического стержня сечением 5×8 мм из стали 40X. На рис. 3 представлено модельное распределение температуры по сечению стержня. В отличие от традиционного подхода, данное распределение температуры характеризуется неравномерностью по ширине. На рис. 4 представлены температурные деформации в поперечном сечении стержня в предположении, что стержень состоит из отдельных элементов.

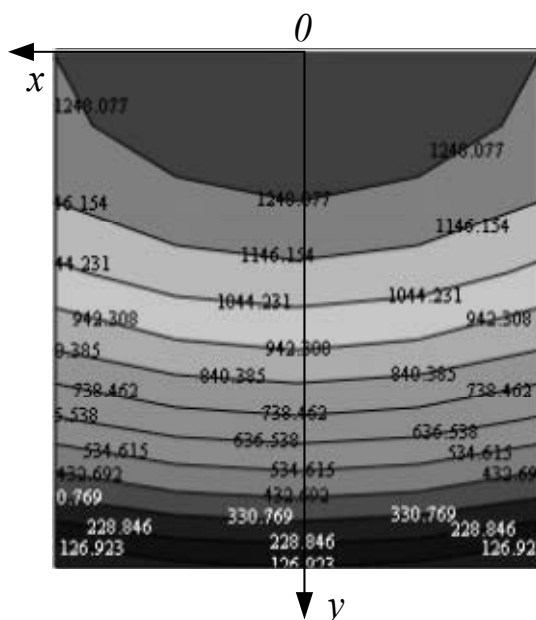


Рис. 3. Распределение температуры по сечению образца

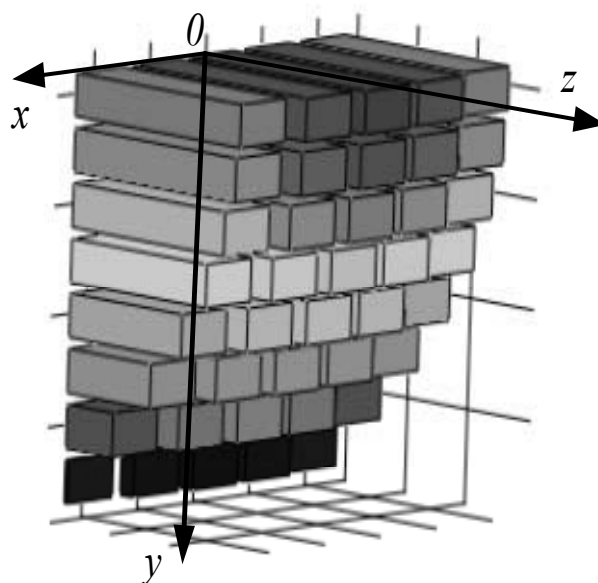


Рис. 4. Температурные деформации в поперечном сечении стержня

Результаты расчета напряжений на этапе нагрева представлены на рис. 5 и 6. Так как действительные деформации каждого элемента зависят от деформаций всех других элементов, то с учетом гипотезы плоских сечений результирующая деформация изобразится в виде плоскости (см. рис. 5). На рис. 6 представлено распределение термоупругих напряжений в поперечном сечении стержня. Угол поворота сечения в данном случае составил $0,136^\circ$.

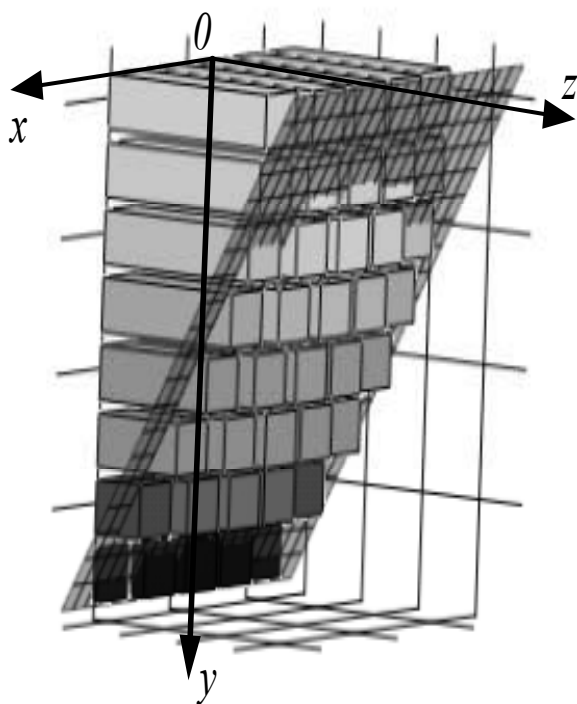


Рис. 5. Температурные деформации и положение сечения в результате нагрева

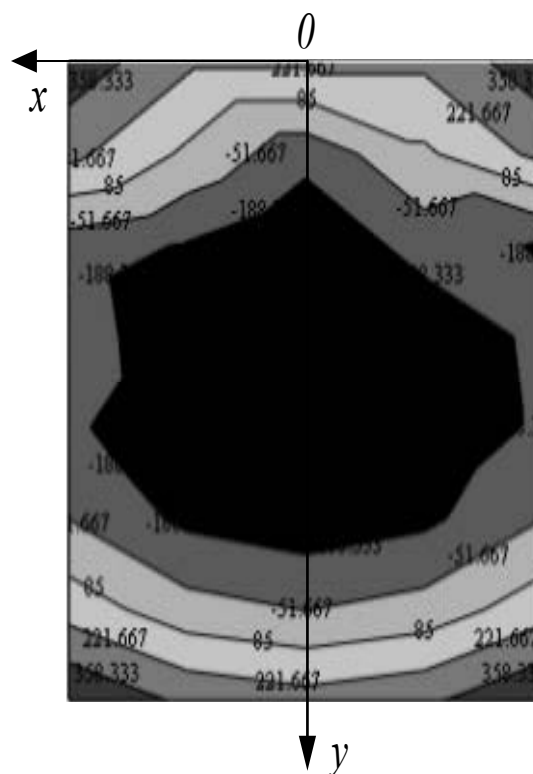


Рис. 6. Распределение температурных напряжений в поперечном сечении стержня

Выполнен анализ продольных напряжений, возникающих в поперечном сечении стержня при нагреве, для случая, когда распределение температуры характеризуется неравномерностью по ширине. Анализ представленных результатов свидетельствует, что неравномерное распределение температуры по ширине сечения является причиной формирования зон растягивающих и сжимающих напряжений. Данную особенность необходимо учитывать при выборе режимов лазерной обработки.