

УДК 669.2.017:620.18; 669.2.017:620.17;  
669.2-419:620.18; 669.2-419:620.17

## **АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ**

**П. Е. ЛУЩИК**, канд. техн. наук, **О. Г. ДЕВОЙНО**, д-р техн. наук,  
**И. В. РАФАЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук  
РИУП «НТП БНТУ «Политехник»

*В статье представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния листовой стали 65Г при лазерной поверхностной обработке. Приводятся сравнительные оценки возникающих напряжений и остаточных деформаций после лазерной поверхностной закалки с использованием конечно-элементных моделей пластин и экспериментальных образцов из листовой стали.*

**Ключевые слова:** лазерная обработка, напряженное состояние, деформации, листовая сталь.

## **ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE DURING LASER SURFACE HARDENING OF SHEET STEEL**

**P. E. LUSHCHIK**, Ph. D. in Technical Sciences, **O. G. DEVOINO**, Dr of Engineering Sciences, **I. V. RAFALSKI**, Ph. D. in Technical Sciences  
Science and Technology Park of BNTU "Polytechnic"

*The article presents the results of modeling the stress-strain state of sheet steel 65G during laser surface treatment. Comparative estimates of emerging stresses and residual deformations after laser surface hardening using finite-element models of plates and experimental samples from sheet steel are given.*

**Keywords:** laser processing, stress state, deformation, sheet steel.

Лазерная поверхностная закалка является перспективным методом высокоскоростной термической обработки поверхностного слоя без объемного разогрева деталей, получившая широкое применение для поверхностного упрочнения и получения изделий с заданным градиентом состава, структуры и свойств [1–3].

Актуальной проблемой лазерной обработки изделий из листовой стали является выбор технологических параметров и маршрутов обработки, обеспечивающих отсутствие остаточных деформаций либо соответствие их значений требуемым расчетным величинам.

Целью настоящей работы является моделирование напряженно-деформированного состояния листовой стали 65Г при лазерной поверхностной обработке и проведение сравнительного анализа полученных результатов с экспериментальными данными.

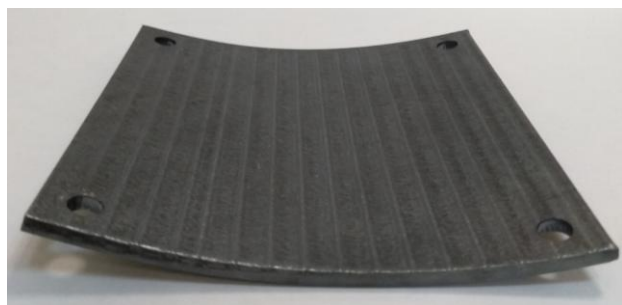
Оценку возникающих напряжений и остаточных деформаций после лазерной поверхностной закалки выполняли с использованием конечно-элементных моделей образцов листовой стали с размерно-геометрическими параметрами пластин, соответствующими экспериментальным образцам.

Параметры деформированного состояния экспериментальных образцов листовой стали марки 65Г после поверхностной лазерной обработки с использованием оптоволоконного лазера номинальной мощностью 1 кВт и длиной волны 1,06 мкм представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры деформированного состояния экспериментальных образцов листовой стали марки 65Г после поверхностной лазерной обработки с использованием оптоволоконного лазера номинальной мощностью 1 кВт и длиной волны 1,06 мкм

| Номер образца | Среднее значение толщины листа, мм | Длина стороны образца $L$ , мм | Максимальное значение прогиба $H$ , мм | Отношение прогиба к длине листа $H/L$ , о. е. |
|---------------|------------------------------------|--------------------------------|--|---|
| 1             | 2,86                               | 92                             | 7,1                                    | 0,077   |
| 2             | 2,90                               | 98                             | 6,7                                    | 0,068   |

Схема измерений деформаций представлена на рисунке 1, измеренные величины определялись как средние значения (по результатам трех измерений) с использованием механического штангенциркуля с ценой деления нониуса 0,1 мм.



*a*



*б*

Рисунок 1 – Образец листовой стали марки 65Г толщиной 2,8–2,9 мм (*a*) и профиль контролируемых параметров деформированного состояния после поверхностной лазерной обработки с использованием оптоволоконного лазера мощностью 1 кВт и длиной волны 1,06 мкм (*б*)

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния листовой стали после лазерной поверхностной обработки при последовательной схеме лазерного сканирования показали, что характер остаточных деформаций расчетные модели предсказывали верно. Однако максимальные значения остаточной деформации при этом составили не более 3,45 мм, а максимальные значения эквивалентных напряжений в пластине после снятия закреплений – 644 МПа. Более низкие значения остаточных деформаций по сравнению с экспериментальными данными свидетельствовали о необходимости уточнения исходных значений физико-механических свойств сплава, принятых для расчета.

Верификация значений физико-механических свойств сплава, выполненная методом их пошаговой корректировки, показала, что наиболее значительным фактором, влияющим на адекватность компьютерных моделей напряженно-деформированного состояния

листовой стали, является изменение значений предела текучести и коэффициента теплового расширения материала.

На рисунках 2 и 3 представлены компьютерные модели распределения остаточных деформаций после снятия закреплений, аналогичные данным натурального эксперимента.

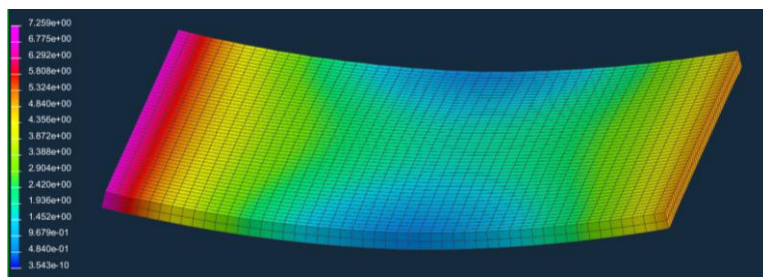


Рисунок 2 – Распределение деформаций в пластине после корректировки параметров модели

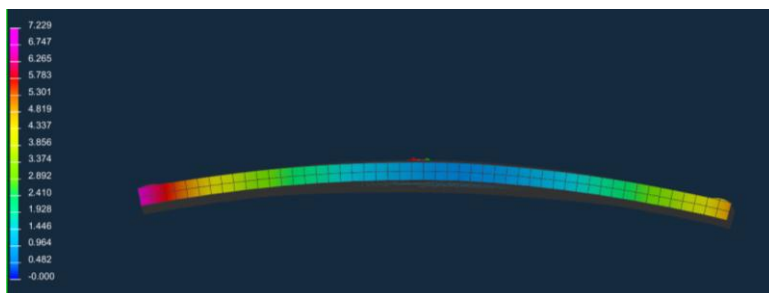


Рисунок 3 – Деформации по оси Z в пластине после корректировки параметров модели

Для детального анализа процесса лазерной поверхностной закали с использованием данных полученного расчета была построена кривая зависимости максимальной величины деформации от количества участков лазерной обработки (рисунок 4).

Как видно из рисунка 4, изменение величины деформации при последовательном прохождении лазерным лучом происходит при интенсивном росте значений в начале процесса обработки и снижении интенсивности роста значений в конце. Результаты моделиро-

вания показали, что после снятия закреплений значения остаточных деформаций достигают значения 7,2 мм.

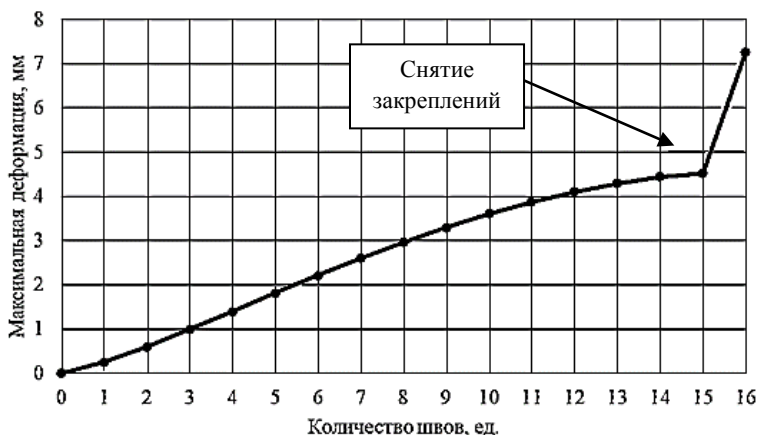


Рисунок 4 – Зависимость максимальной величины деформации от количества участков лазерной обработки

На следующем этапе исследовали влияние модифицированной технологической схемы лазерного сканирования при «шахматной» схеме прохождения лазерного луча на величину остаточной деформации пластины. Зависимость максимальной величины деформации от количества участков лазерной обработки при «шахматной» схеме лазерной обработки представлена на рисунке 5.

Для нового варианта технологического маршрута обработки наблюдался схожий с предыдущим вариантом характер изменения деформаций пластины, однако после снятия закреплений максимальные деформации составили менее 6,0 мм. Такие изменения можно объяснить различием в напряженном состоянии пластин в конце процесса лазерной обработки (рисунки 6 и 7).

Таким образом, концентрация напряжений в периферийной части пластины при последовательном прохождении лазерного луча приводит к увеличению остаточной деформации пластины более чем на 1 мм.

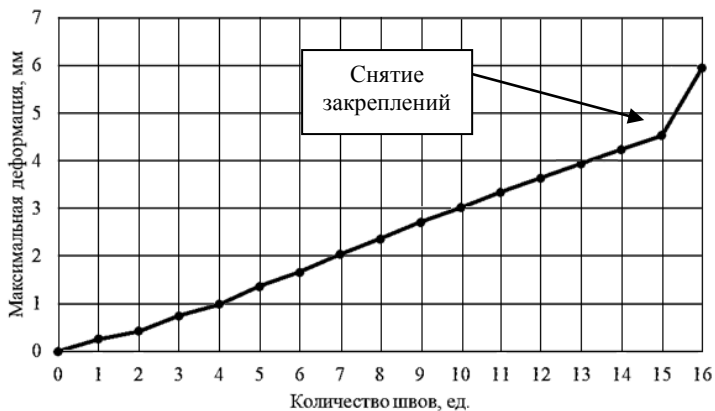


Рисунок 5 – Зависимость максимальной величины деформации от количества участков лазерной обработки («шахматная» схема прохождения лазерного луча) после снятия закреплений стальной пластины

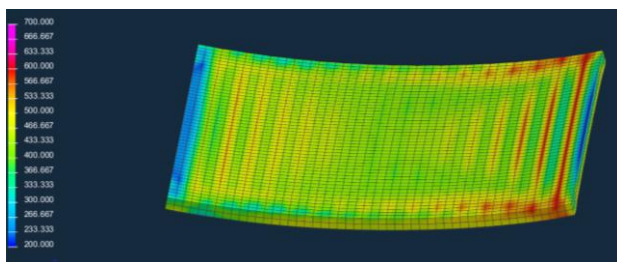


Рисунок 6 – Распределение максимальных эквивалентных напряжений в пластине (последовательная схема прохождения лазерного луча)

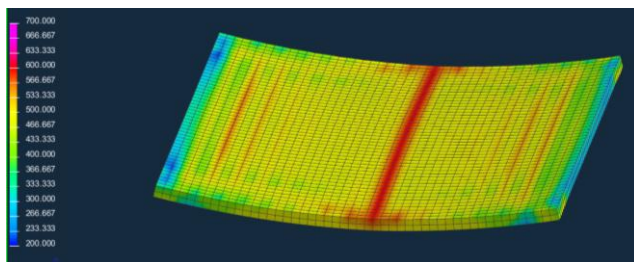


Рисунок 7 – Распределение максимальных эквивалентных напряжений в пластине (шахматная схема прохождения лазерного луча)

Полученные результаты позволяют проводить оптимизацию процесса лазерной поверхностной обработки с учетом особенностей выбора технологического маршрута лазерного сканирования, позволяющего минимизировать напряжения и остаточные деформации в изделиях из листовой стали.

### Список литературы

1. **Девойно, О. Г.** Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера / О. Г. Девойно, В. В. Жарский, А. П. Пилипчук // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 435–443.

2. **Ovais U. Khan.** Laser heating of sheet metal and thermal stress development / U. Khan Ovais, B. S. Yilbas // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 155–156. – P. 2045–2050.

3. **Vrtiel, Š.** Analysis of temperature and stress-strain fields during laser beam welding of a TRIP steel / Š. Vrtiel, M. Behúlová // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 726 (2020) 012002. – 12 p.

### References

1. **Devoino, O. G.** *Modelirovanie poverhnostnoy zakalki s ispolzovaniem skanirujuchego optovolokonnogo lazera* [Simulation of surface hardening using a fiber-optic laser scanning] / *Vesci Nacyyanal'naj akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnyh navuk = News of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of physical and technical sciences.* – 2018. – Vol. 63, No 4. – P. 435–443.

2. **Ovais U. Khan.** Laser heating of sheet metal and thermal stress development / U. Khan Ovais, B. S. Yilbas // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 155–156. – P. 2045–2050.

3. **Vrtiel, Š.** Analysis of temperature and stress-strain fields during laser beam welding of a TRIP steel / Š. Vrtiel, M. Behúlová // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 726 (2020) 012002. – 12 p.

Поступила 18.10.2023

Received 18.10.2023