

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 40X13 ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ

Веремейчик А. И., Нерода М. В.

УО «Брестский государственный технический университет», Брест

Введение. Перспективным методом упрочнения поверхностного слоя деталей машин и механизмов является лазерная закалка, при которой источником нагрева является лазерное излучение [1–6]. Сущность лазерной закалки заключается в превращении при быстром охлаждении гранецентрированной кристаллической решетки аустенита в объемно-центрированную кристаллическую решетку мартенсита. Благодаря ускоренному охлаждению в поверхностных слоях создаются градиенты температуры, приводящие к протеканию пластической деформации растяжения. После распространения температурного поля в глубину детали ввиду того, что мартенсит по сравнению с другими структурными составляющими стали имеет наибольший удельный объем, это является причиной появления значительных внутренних напряжений, приводящих к деформациям и появлению трещин, которые до сих пор в достаточной мере не изучены. Это приводит к необходимости разработки компьютерных моделей процесса лазерного упрочнения, позволяющих варьировать режимами и параметрами процесса. Знание температурных режимов нагрева и охлаждения позволит прогнозировать ход структурных и фазовых превращений обрабатываемого материала, избегать оплавления поверхности, что позволит сохранить ее высокое качество. Использование современных систем автоматизации инженерных расчетов (CAE-систем) в настоящее время является одним из наиболее эффективных способов решения такого рода задач по исследованию напряженно-деформированного состояния тел, оценке прочностных характеристик и прогнозирования долговечности конструкций. Программная система конечно-элементного анализа *ANSYS* является одной из наиболее эффективных CAE-систем. Программное обеспечение *ANSYS* со специальным интерфейсом *ANSYS Workbench* позволяет успешно решать различные задачи механики деформируемого твердого тела, теплофизики т. д.

Взаимодействие лазерного излучения с непрозрачными твердыми телами можно условно поделить на несколько этапов [7]: поглощение части лазерного излучения поверхностью в соответствии с коэффициентом поглощения материала при заданной температуре поверхности; распространение теплоты от поверхности вглубь материала по механизму теплопроводности с повышением его температуры вплоть до температуры фазового перехода; поглощение теплоты; нагрев вещества в другом фазовом состоянии до следующего фазового перехода; при прекращении действия лазерного луча процесс протекает в обратном порядке за счет описанного выше теплоотвода вглубь материала, а также конвективного и радиационного охлаждения, если модельный образец имеет конечные размеры.

1. Постановка задачи. Падающий на поверхность обрабатываемой детали лазерный пучок можно представить как локализованный тепловой источник определенной интенсивности [8]. В соответствии с этим задачи о нагреве материалов лазерным излучением могут быть рассмотрены с использованием закономерностей обычной теплопроводности (линейной или нелинейной). Температура T определяется из решения дифференциального уравнения (ДУ) теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

с краевыми условиями:

$$T(x, y, z, 0) = T_0; \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0); \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial z} = q_0(x, y, t); \quad (4)$$

где c – удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$; ρ – плотность материала, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; λ – коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$; T_0 – начальная температура, $^\circ\text{C}$.

Для исследования напряженно-деформированного состояния необходимо решить ДУ задачи теории упругости в перемещениях [9]:

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \vec{u} + \vec{F} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \text{grad} T = 0, \quad (5)$$

с граничными условиями:

$$u_i = f_i(x, y, z, t), \quad (6)$$

где λ и μ – параметры Ламе, Па; α_T – коэффициент линейного расширения, $\frac{1}{^\circ\text{C}}$.

2. Моделирование процесса лазерной закалки образцов. Численное решение задачи (1–6) в *ANSYS Workbench 2019 R2* проводится в два этапа. На первом этапе в модуле *Transient Thermal* решается нестационарная задача теплопроводности по определению температурного поля в деталях при воздействии движущегося высококонцентрированного источника нагрева. На втором этапе с помощью модуля *Static Structural* выполняется статический прочностной анализ модели.

В соответствии с [1], при лазерной закалке плотность мощности в поперечном сечении лазерного пучка распределяется по закону нормального распределения Гаусса:

$$p = p_0 \exp(-k_0 r^2), \quad (7)$$

где p – плотность мощности в любой точке лазерного пучка, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $p_0 = \frac{W}{S}$ – максимальная плотность мощности по оси пучка, зависящая от расстояния от лазера до термообрабатываемой поверхности, $\text{Вт}/\text{м}^2$; W – мощность лазера, Вт; S – площадь лазерного воздействия, м^2 ; $k_0 = \frac{2}{\omega^2}$ – коэффициент сосредоточенности плотности мощности, характеризующий концентрацию энергии в зоне воздействия, $1/\text{м}^2$; r – расстояние от точки, в которой определяется плотность мощности, до оси пучка, м.

Построение геометрической модели образцов в *ANSYS Workbench* выполнено с использованием графического модуля *ANSYS SpaceClaim*. Материал модели закаливаемых образцов в форме прямоугольного параллелепипеда размерами $200 \times 20 \times 7$ мм (ри-

сунок 1) – коррозионно-стойкая жаропрочная сталь 40X13. При генерации конечно-элементной сетки использовались конечные элементы тетраэдрической формы. Локальное изменение сетки с уменьшением ребер элементов в 2 раза проводилось с помощью опции *Refinement* меню *Mesh Control*. В таблице 1 приведены режимы лазерной закалики.

Модуль управления материалами в *ANSYS Workbench 2019 R2* представлен элементом *Engineering Data*, входящим в структуру инженерного анализа. Все механические и термодинамические свойства материала, зависящие от температуры, задавались в соответствии с таблицей 2.

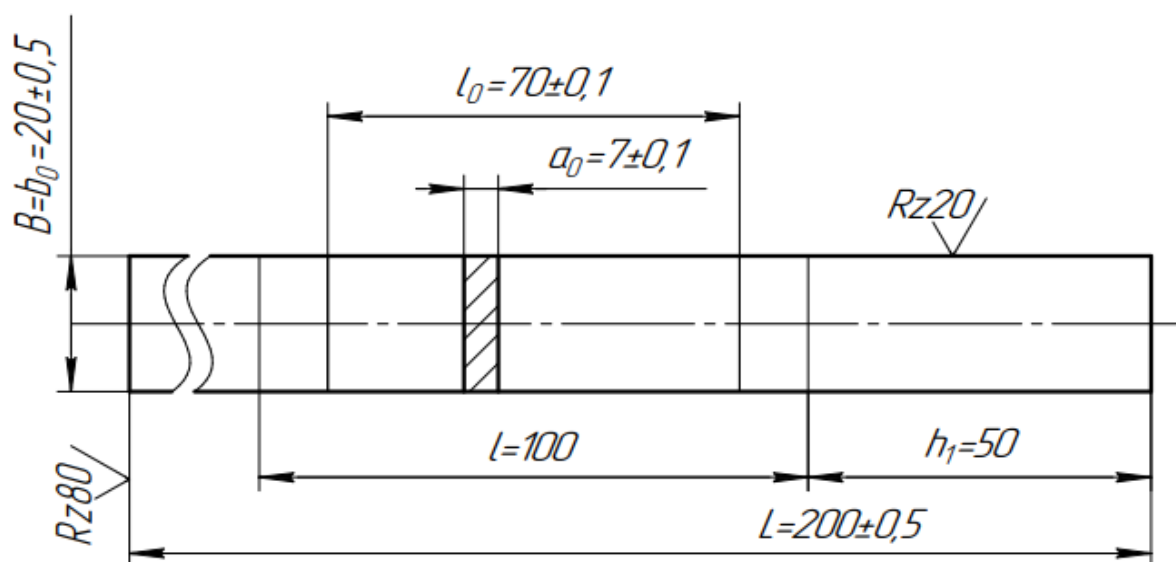


Рис. 1. Закаливаемый образец (размеры в мм)

Таблица 1 – Режимы лазерной закалики образцов

Мощность лазерного излучения, кВт	Константа		Переменная	
	Диаметр лазерного луча, мм	Скорость движения луча, мм/мин	Диаметр лазерного луча, мм	Скорость движения луча, мм/мин
1,2	2	–	–	500
				700
				1000
	–	500	2	–
			3	–
			4	–

Таблица 2 – Химический состав (%) и характеристики стали 40X13

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Fe				
0,35–0,44	до 0,6	до 0,6	до 0,6	до 0,025	до 0,03	12–14	~84				
Свойства	Температура, °С										
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	
Модуль упругости E , ГПа	216	214	206	198	188	176	163	148	140	140	
Коэффициент Пуассона ν	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
Плотность ρ , кг/м ³	7650	7630	7600	7570	7540	7510	7480	7450	7420	7420	
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·°С)	25	26	27,2	28,3	29,1	28,3	27,9	28,5	28,5	28,5	
Коэффициент линейного расширения $\alpha_T \cdot 10^6$, 1/°С	–	10,8	11,9	12,3	13	13,6	13,5	13,8	14,6	14,6	
Удельная теплоемкость c , Дж/(кг °С)	461	482	523	565	607	674	775	888	825	491	

В соответствии со скоростью движения лазера к узлам конечно-элементной модели пошагово последовательно прикладывалась температурная нагрузка вдоль оси симметрии сначала верхней, а затем нижней поверхности образцов. Для моделирования распространения температуры вглубь детали создан макрос для ANSYS на параметрическом языке программирования APDL, т. к. принималось, что тепловой поток распределяется по диаметру пятна нагрева по закону, близкому к распределению Гаусса. В APDL-макросе для учета температурной нагрузки использована зависимость:

$$q = q_H \exp \left[\left(- \frac{(x^2 + (y - vt)^2)}{r_H^2} \right) \right], \text{ где } q_H = \frac{AW}{\pi r_H^2}; W = 1,2 \text{ кВт}; r_H = \frac{D}{2}.$$

где x, y – координаты центра пятна нагрева. Оси x и y лежат в плоскости образцов, подверженной термообработке, причем ось y направлена в сторону движения источника нагрева, ось z – по направлению действия источника тепла. На всех поверхностях модели задавалась конвекция с различными коэффициентами теплоотдачи α . При задании коэффициента учитывалось, что он зависит от характера движения лазера, его физических свойств, размеров и формы поверхности, направления теплового потока и т. д. Начальная температура принималась равной $T_0 = 20$ °С. Расчет теплового поля и напряженно-деформированного состояния (НДС) проводился для скоростей движения источника тепла $v = 8,33, 11,66, 16,66$ мм/с, диаметра лазерного пятна на поверхности $D = 2, 3, 4$ мм.

3. Некоторые результаты исследования температуры и НДС. В результате теоретических исследований созданной модели получены результаты решения задачи теплопроводности в виде линий равного уровня, отражающих распределение температуры в закаливаемых образцах. Некоторые результаты приведены на рисунке 2.

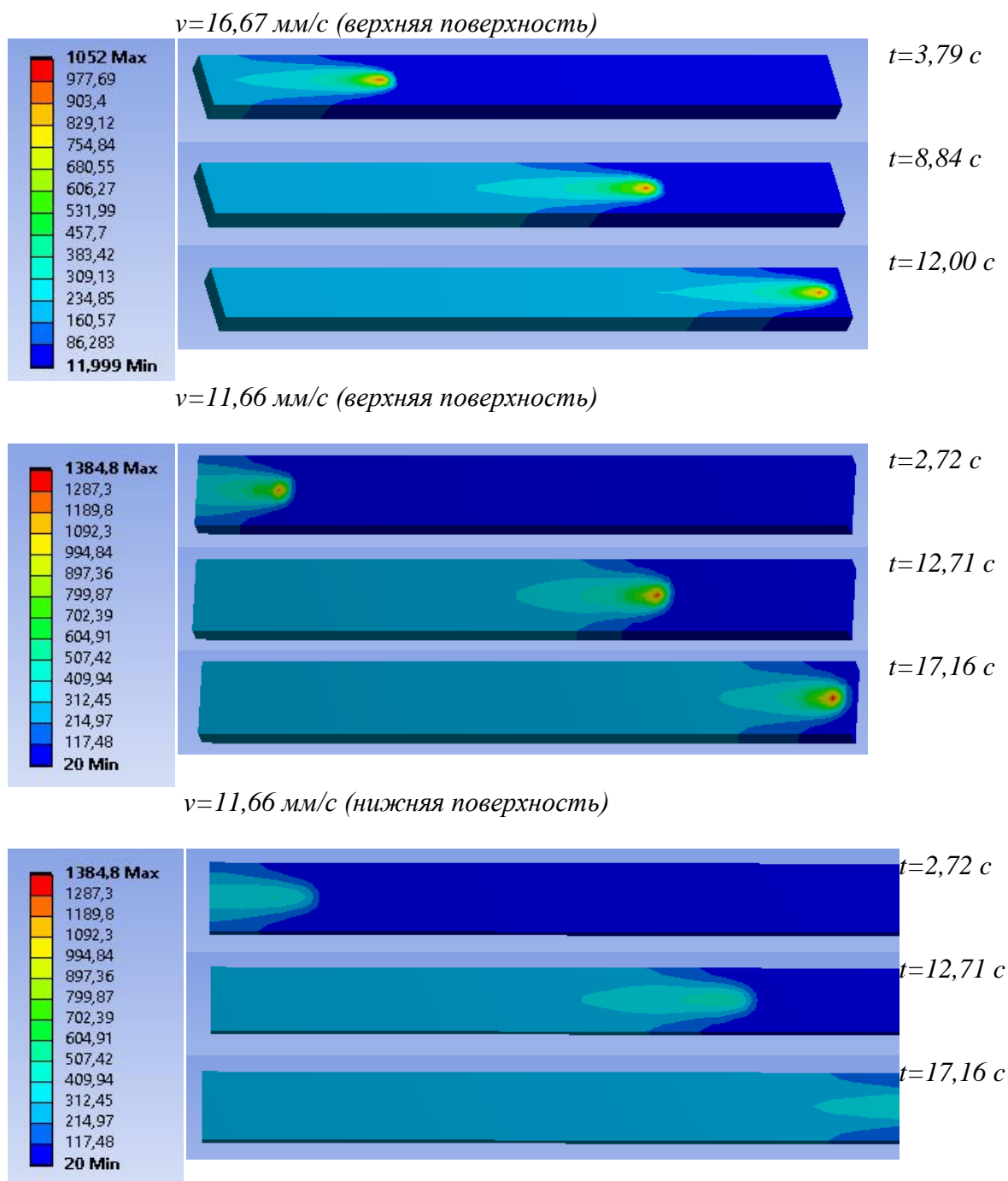


Рис. 2. Распределение полей температур °С на поверхности модели в различные моменты времени при $D = 2$ мм, $\alpha = 10-30 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}$, $q_H = 0,72 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$

По результатам исследований (рисунок 3) установлено, что зона термического воздействия лазерного луча в поперечном сечении модели имеет форму сегмента.

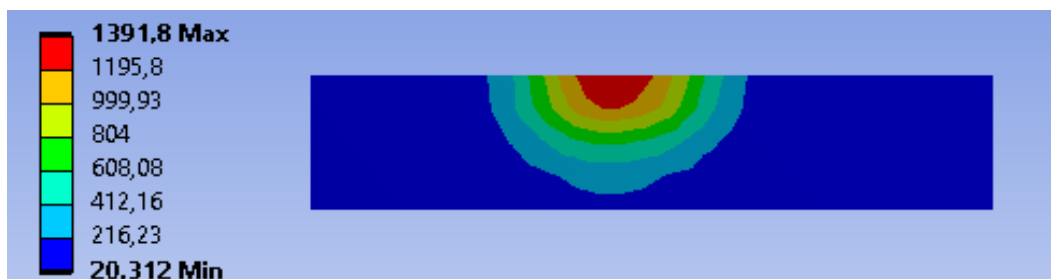


Рис. 3. Распределение температурного поля °C в сечении, перпендикулярном направлению движения лазерного луча, $t = 12,5$ с, $v = 16,67$ мм/с, $D = 2$ мм, $q_H = 1,2 \cdot 10^8$ Вт/м²

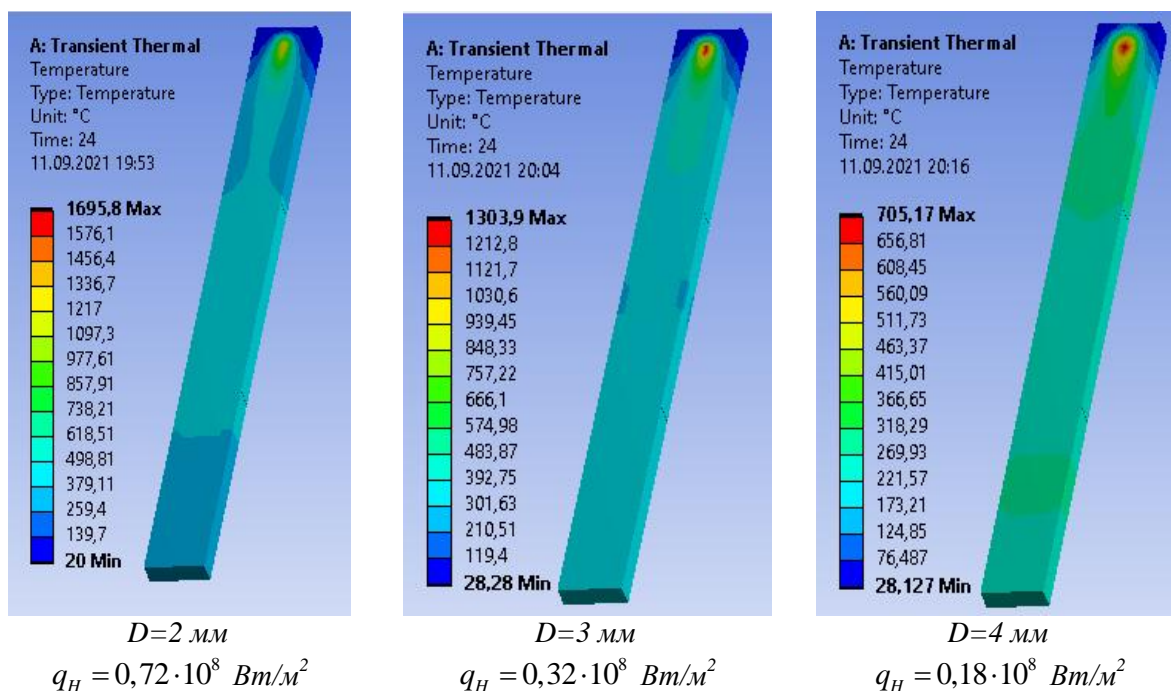


Рис. 4. Поле температур °C на поверхности модели образца в момент времени $t = 24$ с при различных диаметрах лазерного луча, $v = 8,33$ мм/с, $\alpha = 10-30 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$

Результаты теплового анализа, проведенные в модуле *Transient Thermal*, сохраняются в отдельном файле и используются при проведении статического анализа модели (определении напряженно-деформированного состояния).

Задача термоупругости по исследованию НДС в образцах при воздействии движущегося высококонцентрированного источника тепла, моделирующего лазерный луч, решается в модуле *Static Structural* на базе *ANSYS Mechanical*. Некоторые результаты статического анализа модели образца при ее температурном нагружении для различных граничных условий приведены на рисунок 5.

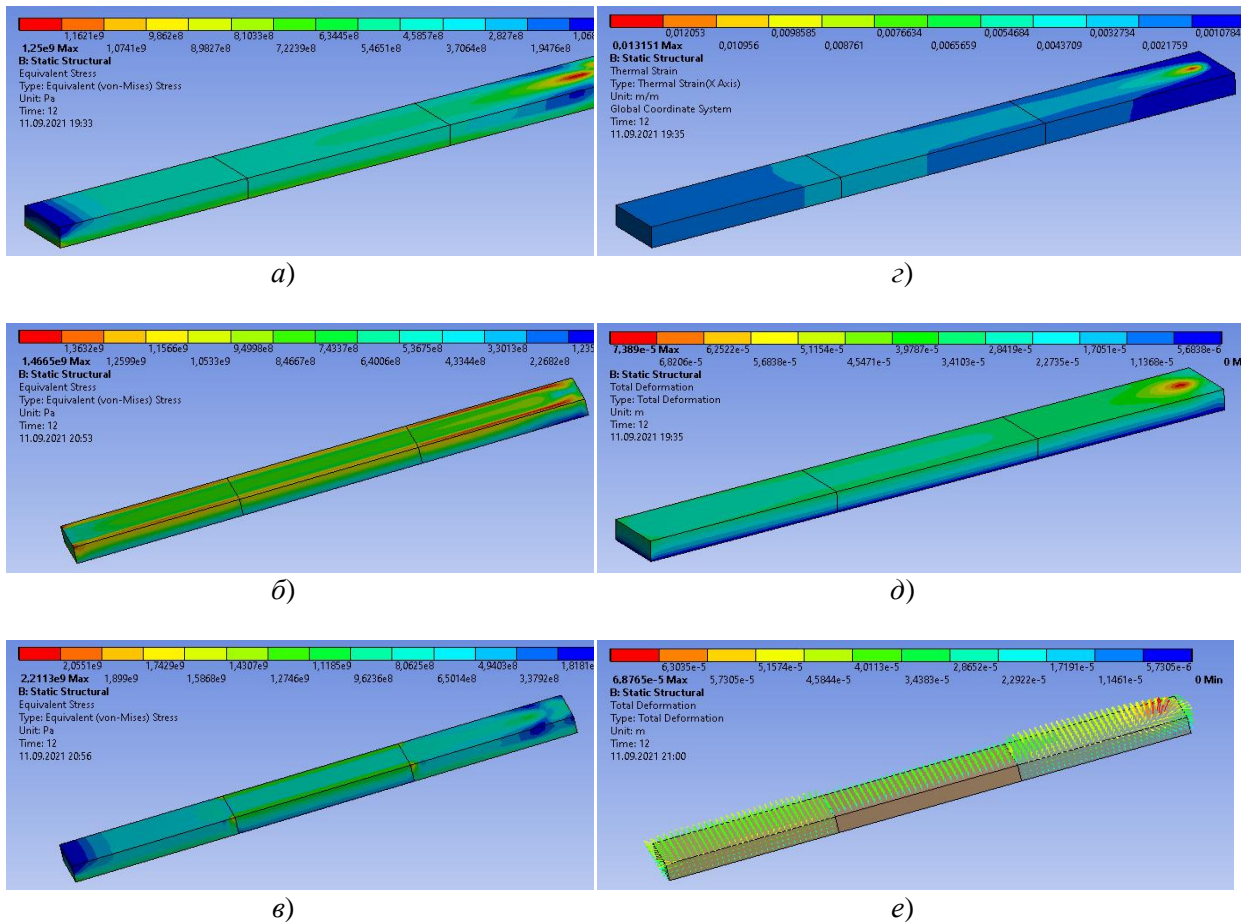


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений по критерию Мизеса (*Equivalent von-Mises Stress*, Па) (а–в), температурных деформаций (*Thermal Strain*) (z), суммарных перемещений (*Total Deformation*, м) (д) и векторное поле перемещений (*U*) (e) в конечно-элементной модели образца при лазерной закалке, $v = 16,67$ мм/с, $D = 2$ мм, $t = 12$ с, $q_H = 0,72 \cdot 10^8$ Вт/м²; а, z, д – закрепление модели по нижней поверхности, б – по нижней и двум боковым поверхностям, в, e – по нижней и средней части боковых поверхностей

4. Исследование механических характеристик закаленных образцов. Для определения механических характеристик закаленных образцов в модуле *Transient Structural* проведено моделирование испытаний на растяжение в зоне упругих деформаций. Граничные условия задавались в виде отсутствия перемещений вдоль оси *y* по задней торцевой грани с помощью параметра *Displacement*. Второй торцевой поверхности сообщалось перемещение $S = 0,00018$ м, направленное по оси *y*. Некоторые результаты исследований приведены на рисунке 6.

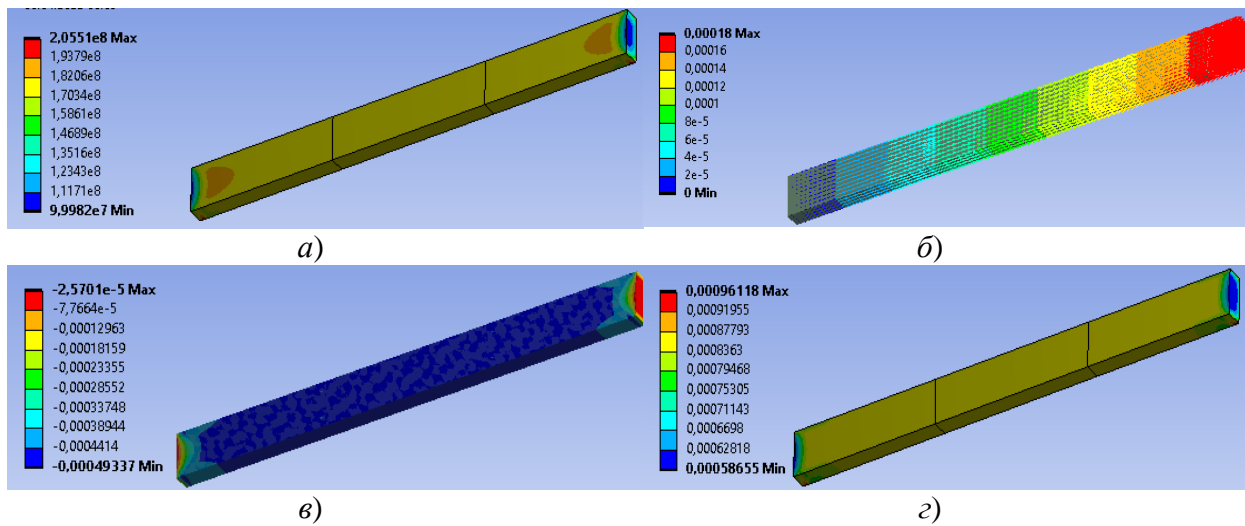


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений по критерию Мизеса (а), векторное поле перемещений (б), распределение поперечных деформаций (*Normal Elastic Strain, X Axis*) (в) и продольных деформаций (*Normal Elastic Strain, Y Axis*) (г) в образце после лазерной закалки при

$$D = 2 \text{ мм}, \alpha = 10\text{--}30 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}, q_H = 0,72 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2, v = 16,67 \text{ мм/с}$$

На рисунке 7 представлена зависимость нормальных напряжений σ (*Normal Stress, Y Axis*) и поперечных деформаций от продольных деформаций при испытаниях на растяжение образцов после лазерной закалки с различными скоростями движения лазера.

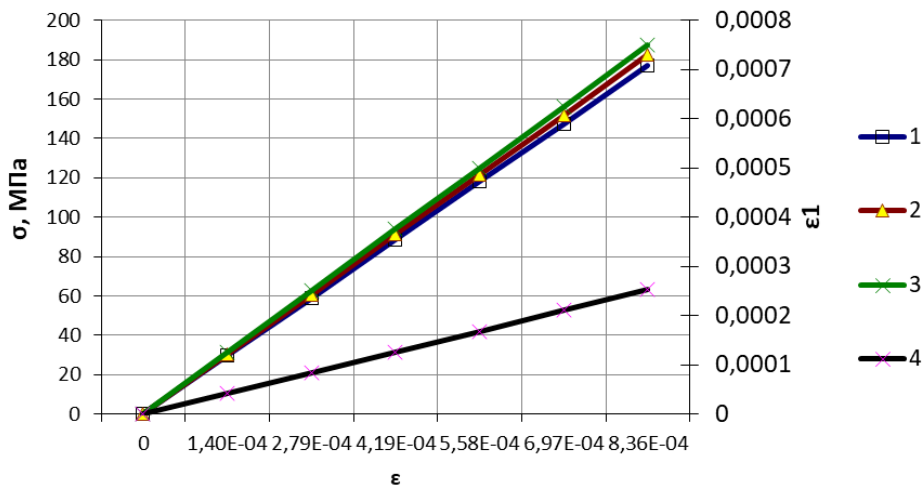


Рис. 7. Зависимость нормальных напряжений (1–3) (МПа) и относительных поперечных деформаций (4) от относительных продольных деформаций при $D = 2 \text{ мм}, \alpha = 10\text{--}30 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°С}},$

$$q_H = 0,72 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2 \text{ 1, 4 – скорость движения лазера } v = 16,67 \text{ мм/с, 2 – } v = 11,66 \text{ мм/с, 3 – } v = 8,33 \text{ мм/с}$$

По результатам исследований НДС определены механические характеристики образцов, упрочненных лазерной закалкой при указанных выше режимах. Модуль продольной упругости составил $E = 215\text{--}219 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,29\text{--}0,30$.

Заключение. Проведена постановка и численное решение задачи нестационарной теплопроводности по исследованию температурного поля при закалке стальных образцов лазером непрерывного действия для различных скоростей движения лазера и диаметров лазерного пятна. Моделирование проводилось с учетом неоднородности свойств стали 40X13.

С использованием конечно-элементного комплекса *ANSYS Workbench* определено напряженно-деформированное состояние моделей образцов при их термообработке лазером для различных граничных условий.

Исследовано влияние скорости движения лазерного луча, ширины дорожки и глубины закалки на температурное поле и напряжения. Установлено, что неравномерность распределения температур и структурной неоднородности в зоне лазерного воздействия приводит к появлению значительных растягивающих напряжений (рисунок 5), которые могут вызвать коробление и образование трещин.

В среде *ANSYS Workbench* проведено моделирование испытаний образцов на растяжение, теоретически определен модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона материала закаленных образцов. Результаты численных экспериментов показали незначительное изменение характеристик упругости.

Полученные результаты температурного и статического анализа могут быть использованы для определения оптимальных режимов работы лазеров и геометрических размеров установок для лазерной закалки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев и др. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Вейко В. П. Технологические лазеры и лазерное излучение / В. П. Вейко. – М. : СПбГУ ИТМО, 2006. – 52 с.
3. Абильсиитов Г. А. Технологические лазеры: справочник / Г. А. Абильсиитов, В. С. Голубев, В. Г. Гонтарь. – М. : Машиностроение, 1991. – 432 с.
4. Gaković, B.; Trtica, M.; Petrović, S.; Panjan, P.; Cekada, M.; Samardžija, Z. Surface structures formed on AISI 420 stainless steel by pulsed laser irradiation. *Mater. Sci. Forum* 2005, 494, 309–314.
5. Leung, M. K.; Man, H.; Yu, J. Theoretical and experimental studies on laser transformation hardening of steel by customized beam. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2007, 50, 4600–4606.
6. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
7. Морозов Е. А. Исследование влияния параметров лазерной термической обработки на структуру и свойства порошковых сталей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.06 / Е. А. Морозов. – Пермь, 2019. – 110 с.
8. Журавлев М. М. Распределение температуры внутри теплового поля при лазерной обработке / М. М. Журавлев, А. В. Королев, М. К. Решетников // Вестник СГТУ. 2013. – № 1 (74). – С. 62–66.
9. Коваленко А. Д. Основы термоупругости / А. Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 239 с.
10. Карслоу, Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 488 с.

Поступила: 30.03.2022