

УДК 621.785.54

## ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЗАКАЛКЕ СКАНИРОВАНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

М. Ю. Целуев, С. Н. Целуева

Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П.О. Сухого»,  
г. Гомель, Республика Беларусь

**Введение.** С развитием технологического оборудования и аппаратуры технология лазерной поверхностной закалки сталей находит все более широкое применение для повышения твердости, улучшения износостойкости и сопротивления термоусталостному разрушению поверхностных слоев деформирующего инструмента, применяемого в машиностроении и металлургии [1]. Преимуществами лазерной закалки при упрочнении деформирующего инструмента являются высокие механические и эксплуатационные характеристики закаленного материала, труднодостижимые традиционными методами закалки; низкая окисляемость и отсутствие коробления инструмента, что в ряде случаев позволяет применять лазерную закалку в качестве завершающей операции обработки; возможность автоматизации обработки контурных, криволинейных и труднодоступных участков поверхностей инструмента и др. [1, 2].

К настоящему времени выполнен ряд экспериментальных и теоретических исследований [1-4], по результатам которых разработаны практические рекомендации, предложены технологические схемы сканирования излучения и режимы лазерной поверхностной закалки сталей различного химического состава. Несмотря на полученные теоретические результаты и разработанные практические рекомендации, вопрос выбора оптимальных технологических режимов лазерной закалки, обеспечивающих высокие показатели качества поверхностного слоя деформирующего инструмента, является важной и актуальной научно-технической задачей в технологии термической обработки сталей.

**Целью работы** является теоретическое исследование особенностей формирования температурного поля в массивном деформирующем инструменте при закалке сканированием сфокусированного излучения непрерывного лазера по полосовой области плоской поверхности с различными коэффициентами перекрытия дорожки нагрева для случаев постоянной и регулируемой мощности излучения во времени.

**Методика исследования.** На основе закономерностей классической теории теплопроводности в работе [4] предложено решение тепловой задачи нагрева и последующего охлаждения массивной стальной

заготовки при сканировании по полосовой области ее плоской поверхности излучения непрерывного лазера с нормально-круговым распределением плотности мощности в поперечном сечении луча и изменением мощности лазера во времени:

$$T = T_0 + \frac{2[1-r]}{c[4\pi d]^{3/2}} \int_0^t \frac{P(\tau)}{[t-\tau]^{1/2}[t_0+t-\tau]} \times \exp\left(-\frac{z^2}{4d[t-\tau]} - \frac{[x-V\tau]^2 + [y-A\sin(2\pi f\tau)]^2}{4d[t_0+t-\tau]}\right) d\tau, \quad (1)$$

где  $T=T(x,y,z,t)$  – нестационарное температурное поле заготовки, зависящее от координат  $x$ ,  $y$  и  $z$  прямоугольной координатной системы и времени  $t$ ;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $r$  – коэффициент отражения излучения лазера от поверхности;  $c$  – объемная теплоемкость материала;  $d$  – температуропроводность материала;  $P=P(t)$  – зависимость мощности излучения лазера от времени;  $t_0=[4md]^{-1}$  – постоянная времени;  $m=3/R^2$  – коэффициент сосредоточенности теплового источника;  $2R$  – диаметр пятна нагрева на поверхности заготовки;  $V$  – скорость продольного перемещения излучения лазера;  $2A$  – ширина полосовой области сканирования;  $f$  – частота колебаний излучения лазера при сканировании.

С целью повышения равномерности распределения энергии лазера по ширине полосовой области сканирования поверхности заготовки предложена [4] зависимость изменения мощности излучения  $P=P(t)$  во времени:

$$P = P_m |\cos(2\pi ft)|. \quad (2)$$

где  $P_m$  – максимальная мощность лазера на оси  $y=0$  полосовой области сканирования излучения лазера.

Особенности формирования температурного поля при сканировании сфокусированного излучения лазера по полосовой области плоской поверхности массивного деформирующего инструмента исследовали путем численного решения математической модели (1). Для целей исследования была разработана программа, написанная на языке FORTRAN, в которой вычисление определенного интеграла, входящего в (1), осуществлялось с помощью подпрограммы QAGS библиотеки алгоритмов численного интегрирования QUADPACK. Расчеты выполняли для оптических и теплофизических характеристик, соответствующих

свойствам инструментальной легированной стали 5ХНМ, применяемой для изготовления штампов горячего деформирования, для случаев постоянной мощности ( $P=\text{const}$ ) и регулирования мощности излучения итербиевого лазера (длина волны  $\lambda=1070$  нм) в соответствии с выражением (2). При выполнении численных вычислений ширина полосовой области сканирования лазера составляла  $2A=6$  мм, диаметр пятна излучения на поверхности заготовки –  $2R=0,7$  мм, частота сканирования –  $f=220$  Гц. Величина коэффициента перекрытия  $K=V/(2Rf)$  дорожки от движущегося пятна излучения лазера на поверхности заготовки составляла от 0,01 до 0,50. Значение  $P_m$  при обработке с регулированием мощности излучения лазера определялась из условия отсутствия плавления поверхности инструмента.

**Полученные результаты.** Как видно из графических данных, представленных на рис. 1, обработка инструмента сканированием излучения постоянной мощности приводит к существенно неравномерному нагреву поверхности в конце каждого цикла колебания луча лазера. Зависимость безразмерной температуры  $\theta=\pi k(T-T_0)/(P_m m^{1/2})$  от безразмерной координаты  $\gamma=\gamma m^{1/2}$  свидетельствует о наличии двух локальных максимумов температуры, расположенных на границах полосовой области сканирования излучения. Минимальная температура  $\theta_{\min}$  нагрева наблюдается на оси  $\gamma=0$  полосовой области сканирования излучения лазера. Максимальная  $\theta_{\max}$  и минимальная  $\theta_{\min}$  величины безразмерной температуры имеют обратную нелинейную зависимость от значения коэффициента перекрытия  $K$ . Относительное приращение температуры  $(\theta_{\max}-\theta_{\min})/\theta_{\min}$  практически линейно увеличивается от 2,37 до 11,59 при росте  $K$  в интервале 0,01...0,5.

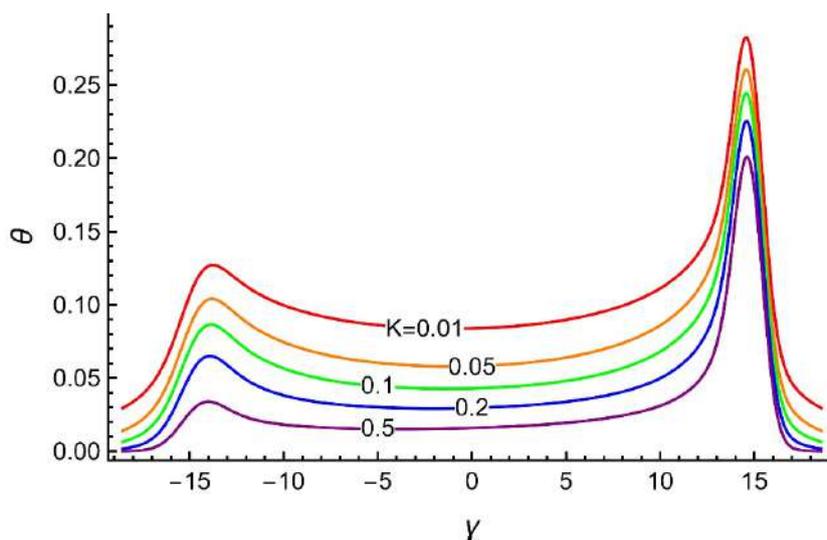


Рис. 1 – Зависимость безразмерной температуры  $\theta$  на поверхности инструмента от безразмерной координаты  $\gamma$  в момент положения пятна

нагрева на краю полосовой области сканирования лазера при постоянной мощности излучения для различных коэффициентов перекрытия  $K$ .

Графическая зависимость, приведенная на рис. 2, показывает распределение температуры нагрева поверхности инструмента по ширине полосовой области обработки для случая сканирования излучения с регулированием мощности лазера в соответствии с выражением (2). Согласно приведенным данным максимальная температура поверхности инструмента в конце каждого цикла колебания луча лазера наблюдается у границы полосовой области сканирования. Величина максимальной температуры  $\theta_{\max}$  нагрева поверхности нелинейно снижается от 0,08 до 0,03 при росте коэффициента перекрытия  $K$  в диапазоне 0,01...0,5. Относительное приращение температуры  $(\theta_{\max}-\theta_{\text{mean}})/\theta_{\text{mean}}$  ( $\theta_{\text{mean}}$  – относительная температура на оси полосовой области сканирования) практически линейно увеличивается от 0,01 до 1,05 при росте  $K$  в интервале 0,01...0,50.

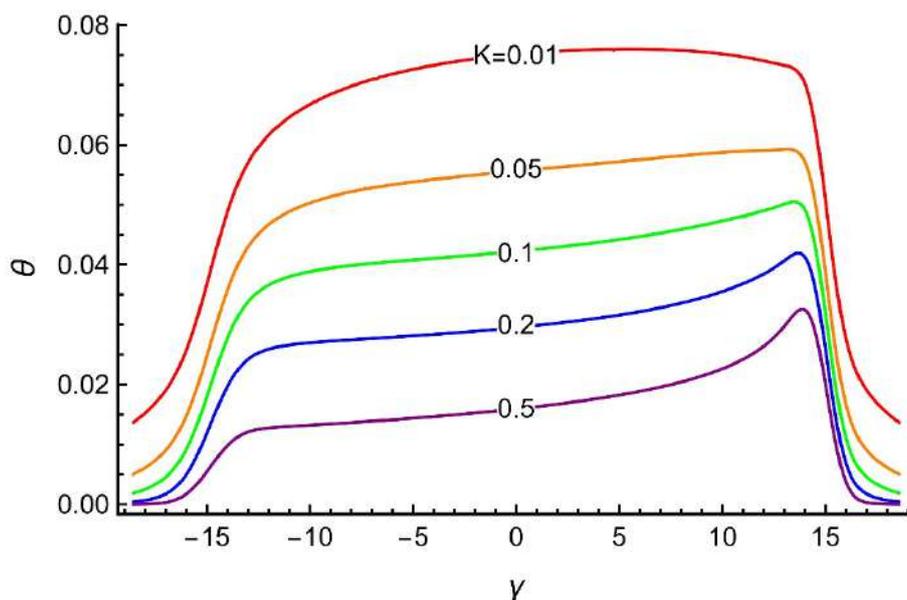


Рис. 2 – Зависимость безразмерной температуры  $\theta$  на поверхности инструмента от безразмерной координаты  $\gamma$  в момент положения пятна нагрева на краю полосовой области сканирования лазера при регулировании мощности излучения для различных коэффициентов перекрытия  $K$ .

Форма и расположение изотерм, соответствующих температуре закалки стали 5ХНМ, в зависимости от безразмерных координат  $\gamma=ut^{1/2}$  и  $\xi=zm^{1/2}$  для различных коэффициентов перекрытия  $K$  при обработке инструментом излучением лазера с регулированием мощности приведены на рис. 3. Представленные графические зависимости свидетельствуют о прямой нелинейной зависимости глубины области упрочненного материала от величины коэффициента перекрытия. Наиболее высокая

равномерность толщины упрочненного слоя, как видно из рис. 3, достигается при обработке сканированием лазера с коэффициентом перекрытия 0,1. При росте коэффициента перекрытия до 0,2 и более размер зоны термического влияния к концу каждого цикла колебания луча лазера не распространяется на всю ширину области сканирования излучения.

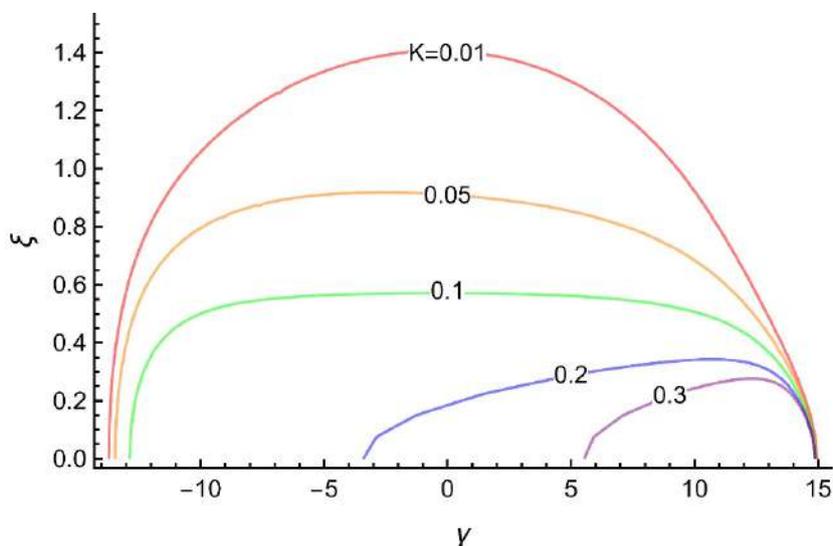


Рис. 3 – Изотермы температуры заковки в момент положения пятна нагрева на краю полосовой области сканирования лазера при регулировании мощности излучения для различных коэффициентов перекрытия  $K$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чиченев Н. А. Лазерное упрочнение технологического инструмента обработки металлов давлением / Н.А. Чиченев, С.А. Иванов, С.М. Горбатюк, А.Н. Веремеевич. – М.: МИСиС, 2013. – 166 с.
2. Майоров В. С. Лазерное упрочнение металлов // Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных и прикладных разработок / Под ред. В.Я. Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – С. 439-469.
3. Девойно О. Г. Моделирование поверхностной заковки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера / О.Г. Девойно, В.В. Жарский, А.П. Пилипчук // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2018. – Т. 63. – № 4. – С. 435-443.
4. Целуева С. Н. Температурное поле стальной заготовки при заковке сканированием излучения непрерывного лазера / С.Н. Целуева, М.Ю. Целуев, С.И. Красюк // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: Сборник научных статей 7-ой международной научно-практической конференции: В 2 ч. Ч. 2. – Гомель: НТЦК ОАО «Гомсельмаш», 2023. - С. 41-46.