

УДК 621.785.54

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЗАКАЛКЕ СКАНИРОВАНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРА

С.Н. Целуева, М.Ю. Целуев, С.И. Красюк

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

Введение. С совершенствованием технологического оборудования и аппаратуры технология лазерной закалки находит все более широкое применение для повышения твердости, улучшения износостойкости и сопротивления усталостному разрушению поверхностных слоев деформирующего и режущего инструмента, деталей машин и механизмов различного назначения. К достоинствам лазерной закалки сталей относят высокие механические характеристики закаленного слоя, труднодостижимые традиционными методами закалки, низкую окисляемость поверхности, практически полное отсутствие коробления детали, что в ряде случаев позволяет применять лазерную закалку в качестве завершающей операции обработки [1, 2].

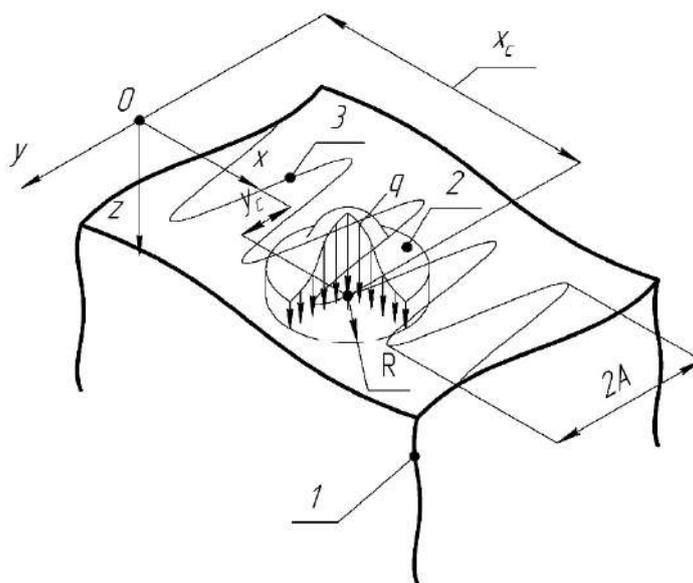
К настоящему времени выполнено значительное количество экспериментальных и теоретических исследований [1-3], по результатам которых разработаны практические рекомендации, предложен ряд технологических схем сканирования излучения и режимов лазерной поверхностной закалки сталей различного химического состава. Несмотря на полученные теоретические результаты и разработанные практические рекомендации, до настоящего времени вопрос поиска оптимальных траекторий сканирования и законов регулирования мощности излучения лазера, обеспечивающих высокие показатели качества закаленного поверхностного слоя стальных деталей, является важной и актуальной научно-технической задачей в технологии термической обработки и металловедении.

Целью работы является обоснование временной зависимости для управления мощностью лазера на основе теоретического исследования температурного поля массивной стальной заготовки при закалке сканированием излучения лазера по полосовой области плоской поверхности.

Методы исследований. Высокие показатели качества при лазерной обработке стальных деталей, к которым относятся равномерность толщины закаленного слоя, качество поверхности и точность размеров, однородность физико-механических характеристик и структурно-фазового состава поверхностного слоя, в значительной степени определяются

особенностями формирования температурного поля на этапах нагрева и охлаждения стали.

В работе на основе закономерностей классической теории теплопроводности сформулирована тепловая задача 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 регулированием мощности лазера во времени. Схема рассматриваемой тепловой задачи представлена на рисунке 1.



1 – заготовка, 2 – излучение лазера, 3 – траектория перемещения излучения лазера по поверхности заготовки

Рис. 1 – Схема обработки плоской поверхности массивной заготовки излучением лазера со сканированием по полосовой области

Решение тепловой задачи, полученное методом тепловых источников, имеет вид:

$$T = T_0 + \frac{2(1-r)}{c[4\pi d]^{3/2}} \int_0^t \frac{P(t')}{[t-t']^{1/2}[t_0+t-t']} \times \exp\left(-\frac{z^2}{4d[t-t']} - \frac{[x-Vt']^2 + [y-A\sin(2\pi ft')]^2}{4d[t_0+t-t']}\right) dt', \quad (1)$$

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.

Закон изменения мощности излучения $P=P(t)$, обеспечивающий высокую равномерность распределения энергии лазера по ширине полосовой области сканирования поверхности заготовки, найдем в предположении малой продольной скорости перемещения $V \approx 0$ точечного теплового источника мощностью $P=P(t)$ из условия:

$$2 \int_0^{t_c} P(t) \delta(y_c - A \sin(2\pi ft)) dt = \frac{P(t)}{A \pi f |\cos(2\pi ft)|} = const, \quad (2)$$

где $\delta(t)$ – дельта-функция.

Согласно (2) закон изменения мощности излучения, обеспечивающий равномерное распределение энергии лазера по ширине полосовой области сканирования, примет вид:

$$P = P_m |\cos(2\pi ft)|. \quad (3)$$

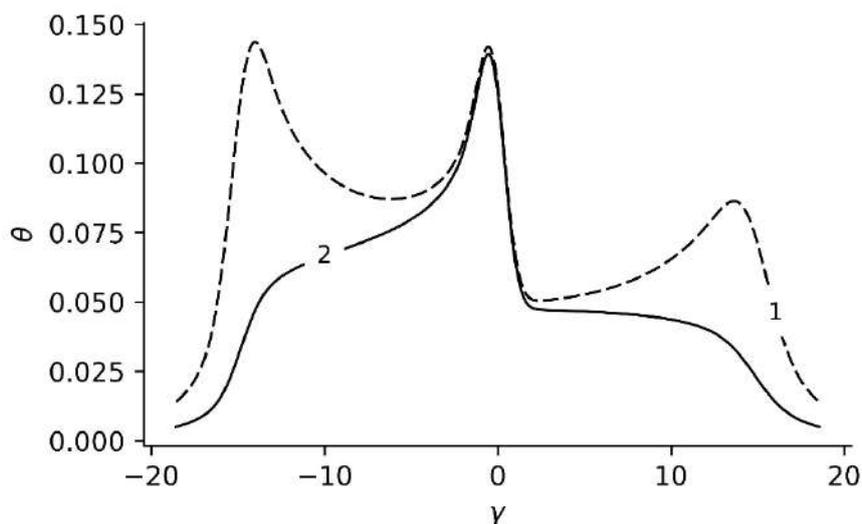
где P_m – максимальная мощность лазера на оси $y=0$ полосовой области поверхности заготовки.

Особенности формирования температурного поля при сканировании по полосовой области плоской поверхности заготовки излучения лазера исследовали путем численного решения математической модели (1). Для целей исследования была разработана компьютерная программа, написанная на языке FORTRAN 95, в которой вычисление определенного интеграла, входящего в (1), осуществлялось с помощью подпрограммы QAG библиотеки алгоритмов численного интегрирования QUADPACK. Расчеты выполняли для оптических и теплофизических характеристик, характерных для быстрорежущей стали Р6М5, для случаев постоянной мощности ($P=const$) и регулирования мощности излучения итербиевого лазера (длина волны $\lambda=1070$ нм) в соответствии с выражением (3). Ширина полосовой области сканирования лазера составляла $2A=6$ мм,

диаметр пятна излучения на поверхности заготовки – $2R=0,7$ мм, частота сканирования – $f=220$ Гц, коэффициент перекрытия следа от движущегося пятна излучения на поверхности заготовки – $K=V/(2Rf)=0,05$. Мощность излучения лазера определялась путем итерационных вычислений из условия отсутствия плавления поверхности заготовки.

Полученные результаты. Как видно из графических данных, представленных на рисунке 2, обработка образца сканированием излучения лазера постоянной мощности приводит к неравномерному нагреву поверхности. Зависимость безразмерной температуры $\theta=\pi k(T-T_0)/(P_m m^{1/2})$ от безразмерной координаты $\gamma=um^{1/2}$ свидетельствует о наличии трех локальных максимумов температуры, расположенных на границах полосовой области сканирования излучения и в месте текущего положения пятна нагрева лазера.

При сканировании излучения с регулированием мощности лазера в соответствии с зависимостью (3) по ширине полосовой области поверхности заготовки наблюдается один максимум температуры, перемещающийся вместе с движением пятна нагрева.



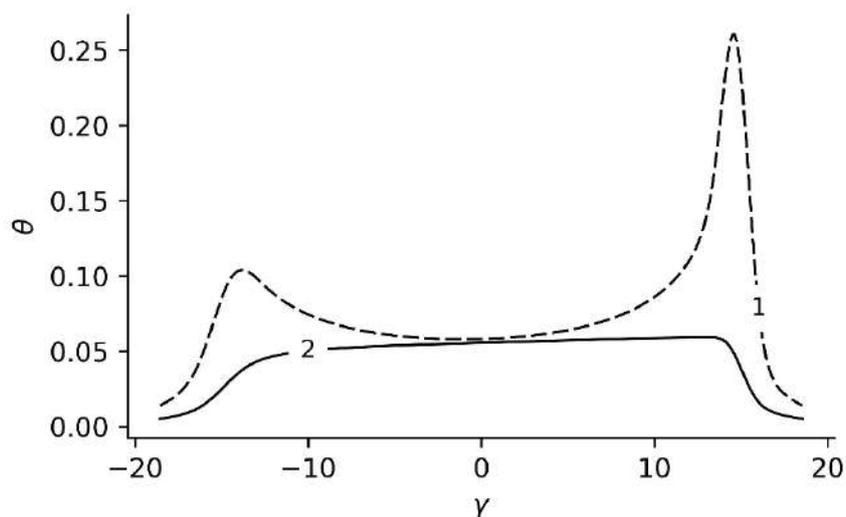
1 – без регулирования мощности излучения; 2 – с регулированием мощности излучения

Рис. 2 – Зависимость безразмерной температуры θ на поверхности заготовки от безразмерной координаты γ в момент положения центра пятна нагрева в центре полосовой области сканирования

Согласно графической зависимости, приведенной на рисунке 3, в момент положения пятна нагрева на краю полосовой области сканирования наблюдаются два максимума температуры нагрева поверхности заготовки. При этом максимальная температура превышает минимальную температуру нагрева поверхности в 4,496 раза. Таким образом, обработка заготовки излучением лазера без регулирования мощности с высокой вероятностью будет вести к снижению однородности

физико-механических характеристик и равномерности толщины закаленного поверхностного слоя в изделии.

В случае сканирования излучения с регулированием мощности лазера графическая зависимость, приведенная на рисунке 3, показывает близкое к однородному распределение температуры нагрева поверхности заготовки по ширине полосовой области обработки. Отношение максимальной температуры к минимальной температуре поверхности в пределах ширины $2A$ полосовой области нагрева составляет 1,065.



1 – без регулирования мощности излучения; 2 – с регулированием мощности излучения

Рис. 3 – Зависимость безразмерной температуры θ на поверхности заготовки от безразмерной координаты γ в момент положения центра пятна нагрева на краю полосовой области сканирования

Заключение. Предложена математическая модель (1) нестационарного температурного поля в массивной стальной заготовке при поверхностной закалке сканированием по полосовой области плоской поверхности излучения непрерывного лазера с нормально-круговым распределением плотности мощности при регулировании мощности излучения во времени.

Для случая сканирования излучения лазера по поверхности заготовки с гармоническим законом поперечного перемещения пятна нагрева предложена зависимость (3) для регулирования мощности излучения, обеспечивающая высокую равномерность распределения поглощенной энергии лазера и температуры нагрева поверхности по ширине полосовой области обработки.

Литература

1. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. – Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 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 закалки 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.