

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУР  
ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ИЗ  
РАСПЛАВА, ОБРАЗОВАННОГО ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

М.Н. Рысик, А.Л. Гурский

Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники, Минск  
E-mail: [batteries03@gmail.com](mailto:batteries03@gmail.com)

Лазерная обработка материалов: резка, сварка, сверление отверстий, маркировка, модификация поверхности – в настоящее время достигла высокого уровня применения в промышленности. Перекристаллизация при лазерном воздействии является современным методом получения материалов, обладающих улучшенными физическими и механическими свойствами. В данной работе рассматривается компьютерная модель прогнозирования кристаллической микроструктуры конструкционной стали из расплава, образованного при лазерном воздействии.

Решение задачи моделирования кристаллизации конструкционной стали из расплава в общем случае включает этапы моделирования теплового поля и расчет размера микроструктуры. [1]

Для оценки градиента температуры на фронте кристаллизации, оказывающего значительное влияние на структурообразование, проведено численное моделирование температурного поля в образце.

Распределение температурного поля  $T(x, y, z, t)$  в образце определяется уравнением

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \Delta H \frac{\partial g}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость,  $\lambda$  – теплопроводность,  $\Delta H$  – скрытая теплота фазового перехода,  $g$  – доля твердой фазы.

Для расчета размера микроструктуры используется модель свободного роста дендритов при быстром затвердевании. [2]. В случае локального неравновесного массопереноса радиус вершины дендрита  $R$  определяется формулой

$$R = \begin{cases} \frac{\Gamma}{\sigma} \left[ T_Q P_T \xi_T - \frac{2m(1-k)C_0 P_C \xi_C}{(1 - v_S^2/v_D^2)[1 - (1-k)Iv(P_C)]} \right]^{-1}, & v_S < v_D \\ \frac{\Gamma}{T_Q P_T \xi_T \sigma}, & v_S \geq v_D \end{cases}, \quad (2)$$

где  $\Gamma$  – коэффициент Гиббса-Томсона;  $\sigma = 1/4\pi^2$ ;  $\xi_T$ ,  $\xi_C$  – коэффициенты условия устойчивости;  $T_Q$  – температура адиабатического затвердевания;

$P_T$ ,  $P_C$  – тепловое и концентрационное числа Пекле;  $C_0$  – начальная концентрация примеси;  $v_S$ ,  $v_D$  – скорость движения фронта кристаллизации и диффузии соответственно;  $k$  – неравновесный коэффициент распределения примеси;  $m$  – наклон неравновесной линии ликвидуса.

Расчет тепловых полей при лазерной обработке проводился на данном этапе без учета влияния процессов кипения и образования плазмы в зоне воздействия лазерного луча на поверхность и установления механизмов этих процессов.

Программная реализация модели осуществлялась на высокоуровневом языке программирования Python с использованием пакета математических вычислений NumPy и пакета визуализации данных двумерной графикой Matplotlib.

Результаты численного моделирования для различных режимов движения лазерного луча с различной скоростью сканирования и расчета градиента температуры, а также расчет размеров кристаллической микроструктуры представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты моделирования теплового поля и расчета микроструктуры при лазерном воздействии

Скорость движения лазерного луча, м/с	Плотность мощности, Вт/м <sup>2</sup>	Глубина оплавленной зоны, м		Градиент температуры, К/м	Размер микроструктуры, м	
		экспериментальное [3]	рассчитанное		экспериментальное [3]	рассчитанное
0,010	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-7}$
0,042	$6,3 \cdot 10^{-9}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^7$	$7,4 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^{-7}$
0,092	$9,6 \cdot 10^{-9}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,67 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^7$	$3,9 \cdot 10^{-7}$	$4,1 \cdot 10^{-7}$
0,142	$3,2 \cdot 10^{-10}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^8$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$

Как видно из таблицы, полученные результаты находятся в хорошем соответствии с данными, полученными экспериментально [3].

1. Харанжевский Е.В., Кривилев М.Д. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество. Урмуртский университет. 2011. 187 с.
2. Galenko P.K., Danilov D.A. // Journal of Crystal Growth. 1999. №197. С. 992–1002.
3. Galenko П.К., Харанжевский Е.В., Данилов Д.А. // Журнал технической физики. 2002. Т. 72. С. 48–55