УДК 621.791.725:519.6 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-66-72

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ СТАЛИ 12Х18Н10Т

Капалин Н.Ю.[1], Бердников О.О.[1], Реченко Д.С.[2], Каменов Р.У.[3]
[1]Омский государственный технический университет, Омск;
[2]Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк;
[3]Тольяттинский государственный университет, Тольятти

Ключевые слова: лазерная резка, 12Х18Н10Т, математическое моделирование, Malamute, MOOSE, конечно-элементный метод, тепловое поле, зона термического влияния, погонная энергия, сквозное плавление.

Аннотация. В работе представлена конечно-элементная квазитрёхмерная модель теплового процесса лазерной резки листовой стали 12Х18Н10Т толщиной 0,8 мм, реализованная в программном комплексе Malamute на платформе MOOSE. Рассмотрено влияние мощности лазерного излучения и скорости перемещения режущей головки на температурное состояние материала. В модель включены температурно-зависимые теплофизические свойства, плавление и испарение, конвективный и лучистый теплообмен, а также движущийся эллипсоидальный гауссов источник. Для 12 сочетаний мощности 1300 и 1400 Вт и скоростей 200–700 мм/мин рассчитаны погонная энергия и критерии сквозного плавления. Показано, что увеличение скорости уменьшает тепловое воздействие, а увеличение мощности расширяет область устойчивого плавления. Определена область режимов, рекомендуемая для последующей экспериментальной проверки.

MATHEMATICAL MODELING OF THE THERMAL PROCESS IN LASER CUTTING OF 12X18H10T STEEL

Kapalin N.Yu.[1], Berdnikov O.O.[1], Rechenko D.S.[2], Kamenov R.U.[3]
[1]Omsk State Technical University, Omsk;
[2]Siberian State Industrial University, Novokuznetsk;
[3]Tolyatti State University, Tolyatti

Keywords: laser cutting, 12X18H10T, mathematical modeling, Malamute, MOOSE, finite element method, thermal field, heat-affected zone, linear energy density, through-thickness melting.

Abstract. A finite-element quasi-three-dimensional model of the thermal process of laser cutting of 0.8 mm thick 12X18H10T stainless steel is presented. The model was implemented in Malamute based on the MOOSE framework. The influence of laser power and cutting-head speed on the thermal state of the material was analyzed. Temperature-dependent thermal properties, melting and evaporation, convective and radiative heat transfer, and a moving ellipsoidal Gaussian heat source were included. Twelve combinations of laser power of 1300 and 1400 W and speeds from 200 to 700 mm/min were considered. The linear energy density and through-thickness melting criteria were evaluated. Increasing speed reduced the thermal input, while increasing power shifted the through-melting boundary toward higher speeds. The calculated results were used to define the modes recommended for subsequent experimental verification.

Введение

Лазерная резка коррозионностойких сталей относится к высококонцентрированным термическим процессам, при которых качество формируемой поверхности определяется одновременно тепловым воздействием лазерного излучения, условиями удаления расплава и последующим охлаждением

материала. Для тонколистовой стали 12Х18Н10Т особенно важно определить режим, обеспечивающий устойчивое сквозное прорезание при минимально необходимом тепловложении. Прямой подбор режимов только экспериментальным способом требует значительного количества образцов, поэтому целесообразно предварительно сузить область исследования посредством численного моделирования [1].

Целью работы является формирование и исследование конечно-элементной модели лазерной резки стали 12Х18Н10Т толщиной 0,8 мм для предварительного выбора технологических режимов. В качестве варьируемых факторов приняты мощность лазера и скорость перемещения источника. Основное внимание уделено достижению температуры плавления по всей толщине листа, ширине расплавленной области и расчётной зоне термического влияния. В соответствии с исходной постановкой модели измеренные экспериментальные значения шероховатости и глубины изменённого слоя не используются при построении расчётных зависимостей.

1. Расчётная постановка и математическая модель

Для предварительного выбора режимов принята квазитрёхмерная постановка. Конечно-элементная область представляет поперечное сечение листа, а движение лазерного источника вдоль линии реза учитывается виртуальной координатой. Размер расчётной области составляет 4,0 мм в поперечном направлении и 0,8 мм по толщине. Ось реза расположена в центре расчётной области. Такой подход позволяет воспроизводить локальный термический цикл без моделирования длинной трёхмерной пластины.

Начальная температура материала принята 293,15 K. Теплофизические свойства зависят от температуры. Плавление и испарение учитываются методом эффективной теплоёмкости. Поток расплава и газодинамика азота непосредственно не решаются; влияние защитного газа учитывается эффективным коэффициентом конвективного теплообмена. На верхней и нижней поверхностях учитываются конвективный и лучистый теплообмен.

Нестационарное температурное поле определяется уравнением теплопроводности:

$$\rho c_{eff}(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [k(T)\nabla T] + q(x,y,z,t),$$

где T – температура, K; t – время, с; ρ – плотность материала, кг/м³; c_{eff} – эффективная удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $q(x,y,z,t)$ – объёмная плотность мощности лазерного источника, Вт/м³ [2].

Скрытая теплота фазовых переходов включается в эффективную теплоёмкость. Для описания нагрева используется движущийся эллипсоидальный гауссов источник:

$$q = \frac{2\eta_{eff}P}{\pi r_x r_y r_z} e^{-2\left[\frac{(x-x_s)^2}{r_x^2}+\frac{(y-y_s)^2}{r_y^2}+\frac{(z-z_s)^2}{r_z^2}\right]},$$

где P – номинальная мощность лазера, Вт; η – эффективная доля мощности, остающаяся в расчётной области; r_x, r_y, r_z – характерные размеры источника, мм.

Параметр η не трактуется только как оптическое поглощение, поскольку объединяет поглощение, геометрию энерговклада и потери энергии с удаляемым расплавом и паром [3].

Положение источника изменяется со временем в соответствии со скоростью перемещения режущей головки. Для оценки интенсивности тепловложения используется погонная энергия:

$$E_1 = \frac{60P}{\vartheta},$$

где E_1 – погонная энергия, Дж/мм; P – мощность, Вт; ϑ – скорость перемещения, мм/мин. Условием сквозного плавления принято достижение температуры ликвидуса на наиболее холодной точке по толщине листа. Дополнительно введён инженерный запас 50 K. Расчётная граница зоны термического влияния предварительно принята по изотерме 873 K.

2. Численная реализация

Расчёты выполнены в программном комплексе Malamute, построенном на конечно-элементной платформе MOOSE. Тепловая задача реализована средствами модуля Heat Transfer, а механическая часть – средствами Solid Mechanics. Пространственная дискретизация выполнена четырёхузловыми элементами. Сетка содержит 6800 элементов и 7011 узлов; по толщине расположено 40 элементов с шагом 0,02 мм. В центральной полосе шириной 20 мкм размер шага составляет 0,5 мкм, в соседних полосах – 1 мкм, после чего сетка постепенно укрупняется.

Временной шаг теплового расчёта составляет 1 мс. Расчёт продолжается до прохождения источником 0,8 мм виртуальной траектории, после чего дополнительно моделируется 30 мс охлаждения. Нелинейная система решается методом Ньютона, для линейной системы используется прямой решатель SuperLU_DIST.

До проведения параметрической серии выполнена проверка численной сходимости для режима 1300 Вт и 400 мм/мин. Сравнивались грубая, базовая и мелкая сетки, временные шаги 2,0; 1,0 и 0,5 мс, а также изменение эффективной доли мощности η на ±20%. Полученные проверки использовались для оценки численной погрешности и чувствительности результатов. При сравнении с экспериментом предлагается анализировать устойчивые тенденции и диапазоны, а не отдельные значения размеров зон, поскольку границы изотерм дискретны.

3. Матрица исследуемых режимов

Постоянными параметрами расчётной серии являлись волоконный тип лазера, частота следования импульсов 500 Гц, давление азота 7 бар, толщина листа 0,8 мм и положение фокуса −1 мм. Варьировались мощность 1300 и 1400 Вт и скорость 200, 300, 400, 500, 600 и 700 мм/мин. Погонная энергия для каждого сочетания рассчитывалась по выражению, приведённому выше. В таблице 1 представлена матрица режимов математического моделирования.

Из расчётной матрицы следует, что диапазон погонной энергии составляет от 111,4 до 420 Дж/мм. Таким образом, исследуемая область включает режимы интенсивного тепловложения при низких скоростях и область приближения к границе устойчивого прорезания при скорости 700 мм/мин.

Табл. 1. Матрица режимов математического моделирования

Мощность, Вт	**Скорость, мм/мин**	**E_l, Дж/мм**	**Расчётная классификация**
1300	200	390.0	сквозное плавление, запас
1300	300	260.0	сквозное плавление, запас
1300	400	195.0	сквозное плавление, запас
1300	500	156.0	сквозное плавление, запас
1300	600	130.0	сквозное плавление, запас
1300	700	111.4	нет сквозного плавления
1400	200	420.0	сквозное плавление, запас
1400	300	280.0	сквозное плавление, запас
1400	400	210.0	сквозное плавление, запас
1400	500	168.0	сквозное плавление, запас
1400	600	140.0	сквозное плавление, запас
1400	700	120.0	пограничный режим

4. Результаты моделирования

Результаты расчёта показывают закономерное влияние скорости перемещения источника. При её увеличении сокращается время взаимодействия лазерного излучения с материалом, вследствие чего уменьшаются максимальная температура, ширина расплавленной зоны и ширина прогретой области. Одновременно уменьшается время существования жидкой фазы, что имеет практическое значение для удаления расплава струёй азота.

При мощности 1300 Вт скорости 200-300 мм/мин характеризуются большим температурным запасом и наибольшей расчётной зоной термического влияния. В диапазоне 400-500 мм/мин сохраняется значительный запас сквозного плавления при уменьшении теплового воздействия (рис. 1, 2). При 600 мм/мин сквозное плавление ещё сохраняется, однако режим приближается к переходной области. При 700 мм/мин минимальная температура по толщине становится ниже температуры ликвидуса.

Для мощности 1400 Вт повышение мощности на 100 Вт смещает границу сквозного плавления в сторону больших скоростей (рис. 3). Скорости 400-600 мм/мин сохраняют уверенный температурный запас. При 700 мм/мин температура ликвидуса достигается, однако инженерный запас 50 К отсутствует, поэтому режим отнесён к пограничным.

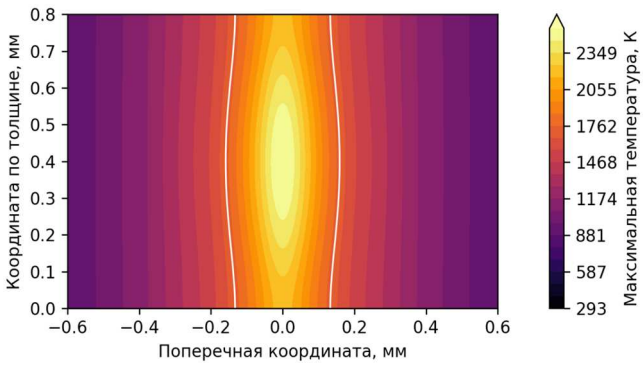


Рис. 1. Поле максимальной температуры для режима 1300 Вт и 400 мм/мин

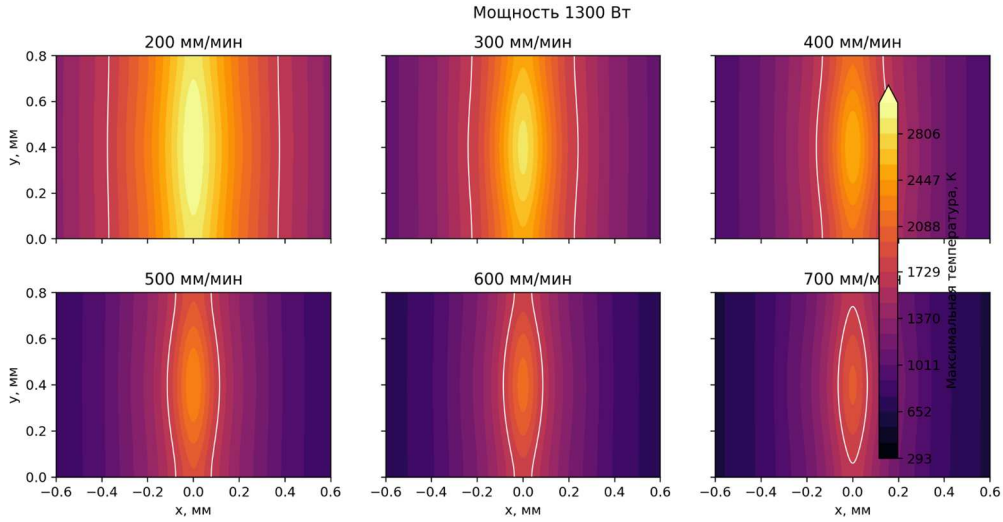


Рис. 2. Поля максимальной температуры при мощности 1300 Вт

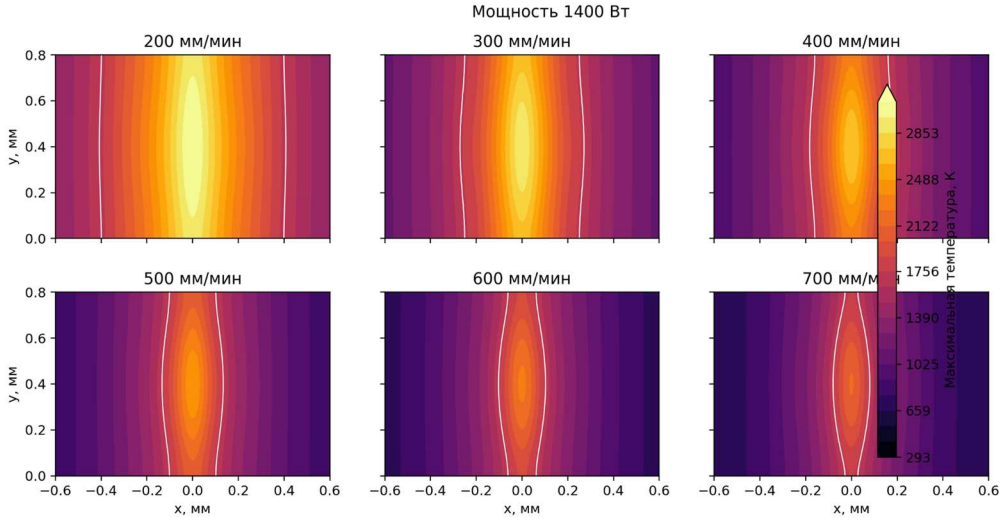


Рис. 3. Поля максимальной температуры при мощности 1400 Вт

Особое значение имеет переходная область 600–700 мм/мин. Для 1300 Вт расчётный запас относительно ликвидуса изменяется от +70,6 до −23,1 K. Для 1400 Вт он изменяется от +175,1 до +43,7 K. Это указывает на необходимость экспериментальной проверки обеих мощностей именно в этой области скоростей. В таблице 2 представлен расчётный запас температуры относительно ликвидуса.

Табл. 2. Расчётный запас температуры относительно ликвидуса

P, Вт	v, мм/мин	Минимальный температурный запас, K	Интерпретация
1300	600	70,6	сквозное плавление с запасом
1300	700	−23,1	ликвидус не достигается по всей толщине
1400	600	175,1	сквозное плавление с запасом
1400	700	43,7	пограничный режим; запас 50 K отсутствует

5. Термомеханическая оценка

После определения температурного поля для представительного режима 1300 Вт и 400 мм/мин выполнен связанный термомеханический расчёт стадии нагрева и охлаждения. Полная деформация представлена суммой упругой, пластической и температурной составляющих. Пластическое течение описывалось критерием Мизеса с изотропным упрочнением. Минимальные кинематические ограничения введены на нижних угловых узлах для исключения перемещения расчётной области как жёсткого тела.

К моменту 2000 мс максимальная температура снизилась до 298,3 K, поэтому напряжённое состояние рассматривалось как остаточное. Максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу составило 299,6 МПа, нормальные напряжения изменялись от −58,7 до 27,8 МПа. Полученные значения являются предварительной оценкой, поскольку механические свойства материала заданы приближённо, а расчёт выполнен в приближении плоской деформации. Для окончательной верификации требуется учитывать реальную схему закрепления образца и уточнённые температурные свойства.

6. Формирование программы экспериментальной проверки

Математическое моделирование в данной работе рассматривается не как замена эксперимента, а как средство его рационального планирования. На основании расчёта предлагается проверить обе мощности на всех скоростях 200, 300, 400, 500, 600 и 700 мм/мин. Режимы 200-300 мм/мин предназначены для оценки области избыточного тепловложения; 400-500 мм/мин рассматриваются как основная рабочая область; 600 мм/мин – как верхняя область устойчивого плавления; 700 мм/мин – как граница перехода к неполному прорезанию.

В эксперименте целесообразно регистрировать наличие и устойчивость сквозного прорезания, ширину реза на входной и выходной поверхностях, шероховатость стенки реза Ra, глубину изменённого слоя по металлографическому шлифу, ширину ЗТВ, распределение микротвёрдости, наличие грата, наплывов и следов повторного затвердевания. Сопоставление должно выполняться независимо: расчётный запас относительно ликвидуса следует сравнивать с устойчивостью реза, расчётную ширину расплавленной зоны – с измеренной шириной реза, а изотерму 873 K – с экспериментально определённой ЗТВ.

Заключение

Разработана квазитрёхмерная конечно-элементная модель лазерной резки листовой стали 12Х18Н10Т толщиной 0,8 мм в программном комплексе Malamute на платформе MOOSE. Модель учитывает движение гауссова источника, температурную зависимость свойств, плавление и испарение, конвективный и лучистый теплообмен.

Выполнено независимое моделирование 12 сочетаний мощности 1300 и 1400 Вт со скоростями 200-700 мм/мин без использования экспериментальных значений шероховатости и глубины изменённого слоя. Установлено, что увеличение скорости закономерно снижает погонную энергию, максимальную температуру и продолжительность существования жидкой фазы. Увеличение мощности расширяет область сквозного плавления в сторону больших скоростей.

Основной рабочей областью по результатам расчёта является диапазон 400-600 мм/мин. Режим 700 мм/мин необходимо рассматривать как переходный: при 1300 Вт сквозное плавление по расчёту не достигается, а при 1400 Вт режим остаётся чувствительным к неопределённости параметров. Полученные результаты позволяют сформировать целенаправленную программу экспериментальной проверки и определить направления последующей верификации тепловой модели.

Список литературы

1. Капалин Н.Ю., Бердников О.О., Реченко Д.С., Лопатин Б.А. Влияние скорости перемещения лазерной режущей головки при обработке сплава 12Х18Н10Т на качество получаемой поверхности // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2026. – Т. 26, №1. – С. 78-86. – DOI: 10.14529/engin260107.
2. Екимова М.Ю., Тесленко Е.А. Применение полного факторного плана для расчета уравнений регрессии с использованием ЭВМ // Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, Знаменск, 11-12 апреля 2024 года. – Астрахань: Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, 2024. – С. 53-56.
3. Кожухарь О.Ю., Скичко А.С. Влияние положения констант в уравнениях математических моделей на методологию их поиска // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. – 2022. – №24. – С. 105-112.

Сведения об авторах:
Капалин Николай Юрьевич – аспирант;
Бердников Олег Олегович – аспирант;
Реченко Денис Сергеевич – д.т.н., доцент, и.о. ректора;
Каменов Ренат Уахитович – к.т.н., начальник НИЛ. «Механическая обработка и технологии управления поверхностным слоем».