

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ГОРЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В КИСЛОРОДЕ ПРИ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ

Г. В. Ермолаев, О. Б. Ковалев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
ermolaev@itam.nsc.ru

Предложена физико-математическая модель циклического горения железа в потоке кислорода при кислородной газолазерной резке листового металла. Движение фронта горения происходит под действием сфокусированного лазерного излучения и гетерогенной реакции окисления железа в кислороде. Интенсивность горения лимитируется скоростью подвода кислорода из газовой фазы к поверхности металла, а движение границы раздела определяется локальным температурным режимом. В результате трехмерного численного моделирования на поверхности металла получены волнообразные структуры, линейные размеры которых зависят от скорости перемещения лазерного луча и параметров течения струи кислорода. Результаты моделирования объясняют механизм образования бороздчатой шероховатости при кислородной газолазерной резке малоуглеродистой стали и качественно согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: лазерная резка, кислород, сталь, циклическое горение, шероховатость, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема горения компактных образцов металла в неподвижной среде кислорода или в условиях струйного обтекания представляет определенный интерес для различных практических приложений. Механизмы воспламенения металлов имеют свои особенности [1], связанные с их высокой теплопроводностью, большим тепловым эффектом реакции и фазовым состоянием образующихся оксидов. Тепловой режим нагрева поверхности влияет на развитие процесса горения. Особенно сильно это проявляется в условиях локального нагрева поверхности металла [2]. При использовании сфокусированного лазерного излучения в качестве локального источника нагрева имеет место феномен критического размера нагреваемой области, ниже которого процесс затухает, а выше него горение распространяется на весь образец.

Лазерно-индуцированное горение является сопутствующим и определяющим процессом в технологиях лазерной обработки материалов. Одной из них является кислородная газолазерная резка листовых малоуглеродистых сталей. Главная особенность лазерной резки заключается в образовании на поверхности реза характерной шероховатости в виде периодических полосчатых структур (striation) — волнообразных выступов и впадин, которые в литературе часто называют бороздками, штрихами, узора-

ми (pattern) и т. п. С увеличением толщины материала ширина и глубина борозд возрастают, а качество поверхности ухудшается.

В ряде работ [3–10] изложены физические представления о механизмах, ведущих к образованию бороздчатой поверхности при кислородной газолазерной резке стали, которые основаны на теории циклического окисления железа в кислороде [3]. Химические реакции окисления возбуждаются в зоне теплового действия лазерного луча и сопровождаются периодическими циклами воспламенения, горения и затухания. Скорости реакций лимитируются тепло- и массообменными процессами в газовой и жидкой фазах и в твердом металле. С увеличением скорости передвижения луча относительно листа шероховатость уменьшается или полностью исчезает [4, 5]. При скорости резки ниже некоторого порогового значения шероховатость поверхности реза становится более выраженной с глубокими и крупными штрихами.

В работе [4] было выполнено физическое моделирование процессов, сопровождающих лазерную резку металлов излучением CO₂-лазера. В этой же работе с помощью скоростного фотографирования обнаружено, что при резке с кислородом со скоростью, меньшей линейной скорости горения металла, происходит интенсивное боковое горение, в результате чего на поверхности появляется волнистая структура. Химический анализ выдуваемых из

разреза частиц показал, что в их составе содержатся главным образом оксиды железа: FeO (50 ÷ 70 %) и Fe₂O₃ (до 20 %). Тот же эффект наблюдался при резке волоконным лазером [5]. При скорости резки, превышающей скорость движения фронта горения, шероховатость исчезает, так как отсутствует описанный выше механизм ее образования. Подобный механизм принципиально отличается от механизмов образования шероховатости при резке с инертным газом, наиболее подробно рассмотренных в [6].

Теоретическое описание механизма формирования борозд шероховатости в [5, 7–9] связывают с циклическостью процесса, который обусловлен периодическим нарастанием и уносом оксидной пленки. Описание явления уноса пленки авторами [7–9] не рассматривается. Период гидродинамической неустойчивости определяется по характерному размеру борозд шероховатости на образцах резки.

В [7] предпринята попытка создания численной модели циклического механизма образования шероховатости. Модель основана на том, что скорость реакции лимитируется переносом кислорода из газовой фазы к реагирующей поверхности. Для описания процессов теплопереноса в твердом металле рассматривается двумерное уравнение теплопроводности, записанное в криволинейной системе координат, которое решается методом конечных объемов. В расчетах [7] используются теплофизические характеристики нержавеющей стали, теплопроводность которой и выбранная температура воспламенения значительно ниже по сравнению с низколегированной сталью. Вследствие этого реакция, инициированная лазерным лучом, в [7] не затухала в окрестности переднего фронта горения. По этой причине авторам [7] пришлось искусственно устанавливать временной период распространения реакции.

В работе [8] предполагалось, что скорость химической реакции ограничена скоростью диффузии кислорода в слое оксида железа. Согласно [8] реакция замедляется и затем прекращается по мере нарастания слоя оксида, который удаляется газовым потоком. Здесь впервые предпринята попытка описать линейные размеры шероховатости. Для этого использована аппроксимация формы реза частями эллипса [8].

В работе [9] предложена интегральная аналитическая модель образования шероховатости

в предположении, что оксидный слой, который препятствует диффузии кислорода, нарастает по параболическому закону и разрушается циклически за счет гидродинамической неустойчивости. Скорость реакции на начальном этапе контролируется диффузией кислорода в газе. Период нарастания и удаления оксидного слоя оценивали по наблюдениям положения передней кромки. Использованные кинетические константы реакции подбирались так, чтобы период и амплитуда колебания температуры соответствовали экспериментально полученным в работе [4].

В работе [5] описан процесс образования шероховатости с помощью аналитической модели двумерного стационарного теплопереноса в твердой пластине и упрощенной модели диффузионного массопереноса в пленке жидкого оксида. Считалось, что горение прекращается в момент времени, когда энергии экзотермической реакции становится уже недостаточно для дальнейшего плавления металла. Механизм удаления образовавшегося оксидного слоя не рассматривался, а без этого повторное инициирование реакции невозможно.

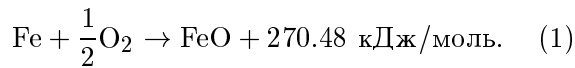
В работе [10] показано, что периодические циклы горения, инициированные энергией лазерного луча, затухают из-за понижения температуры фронта вследствие большого теплоотвода в твердый металл. Интенсивность реакции повышается при полном проплавлении оксидной пленки. Плавление пленки сопровождается потерей ее защитных свойств. Температура плавления оксида является естественной границей реакции, интенсивность которой в этом случае считается не зависящей от температуры и определяется скоростью подвода кислорода из газовой фазы к поверхности металла.

В [10] предложена двумерная постановка задачи, температурное поле рассчитывается без учета отвода тепла в глубину листа, при этом течение жидкой пленки не рассматривалось. Циклы воспламенения, горения и затухания моделировались естественным образом без привлечения каких-либо искусственных ограничений или данных экспериментов. Применимость модели ограничена толщиной металла, сопоставимой с диаметром луча.

В данной работе предпринята попытка обобщения ранее предложенной модели [10] на трехмерный случай.

ОКИСЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗА В ПОТОКЕ КИСЛОРОДА

Процесс окисления железа в кислороде, согласно диаграмме состояния системы Fe—O₂, предполагает послойное образование оксидов железа (Fe_mO_n) на границе контакта. Рост толщины твердого слоя оксидов происходит по параболическому закону [11], а скорость реакции в этом случае мала, поскольку процесс лимитируется диффузией кислорода в слое. Считается, что при температуре выше 680 °С преимущественно образуется оксид FeO, основной реакцией при этом является



Ситуация кардинально меняется при переходе оксидного слоя в жидкое состояние [12–14]. В этом случае обычно говорят, что оксидный слой теряет свои защитные свойства. В жидком слое, с одной стороны, возникает конвективное перемешивание, а с другой — в несколько раз может увеличиться коэффициент диффузии реагентов, что дает более свободный доступ кислороду к чистому железу.

В условиях механического (силового) воздействия на расплав со стороны газа и вызванной этим динамики расплава механизм окисления железа не поддается строгому физико-химическому описанию. При лазерной резке толщина жидкой пленки регулируется газодинамикой струи и может быть настолько мала, что ее диффузионное сопротивление становится много меньше диффузионного сопротивления пограничного слоя в газе. На этот факт указывает высокая чувствительность качества поверхности лазерного и газопламенного реза к чистоте кислорода [15, 16]. Заметим, что содержание примеси более 0.5 % в техническом кислороде, используемом для лазерной резки, уже недопустимо, так как существенно ухудшается качество поверхности реза.

Согласно диаграмме состояния системы Fe—O₂ [17] будем предполагать, что на поверхности жидкого слоя, контактирующего с кислородом, молярная концентрация кислорода $C_{eq}(T)$ соответствует равновесной молярной концентрации образования FeO при данной температуре T . При этом весь избыток кислорода, подводимый к этой поверхности из газовой фазы за счет конвекции и диффузии, мгновенно расходуется на образование оксида FeO. Если температура T на границе раздела веществ оксид — металл ниже температу-

ры плавления FeO (1644 К), то считается, что энерговыход реакции окисления пренебрежимо мал. Таким образом, лимитирующим фактором здесь будет перенос кислорода из струи газа, что подтверждается экспериментальными данными [15, 16].

Для расчета массовой скорости окисления железа, которая полностью контролируется диффузией в газовой фазе, воспользуемся теорией Д. А. Франк-Каменецкого [18], согласно которой молярный поток кислорода к поверхности через пограничный слой в газе описывается уравнением Стефана

$$J_{ox} = \frac{\text{Sh}D}{d} \frac{P_0}{\gamma RT_0} \ln \left(\frac{1 - C_{eq}(T)}{1 - C} \right), \quad (2)$$

где D — коэффициент диффузии кислорода в газовой смеси; P_0 , T_0 — полное давление и температура газа в канале; R — универсальная газовая постоянная; d — ширина канала; $C_{eq}(T)$ — равновесная молярная концентрация кислорода, зависящая от температуры; C — молярная концентрация кислорода в струе газа; γ — показатель адиабаты; Sh — число Шервуда. Для турбулентного течения в канале $\text{Sh} = 0.023\text{Re}^{0.8}\text{Sc}^{0.4}$ [18], где $\text{Re} = U_0 d / \nu_0$ — число Рейнольдса, $\text{Sc} = \nu_0 / D$ — число Шмидта. Здесь ν_0 , U_0 — кинематическая вязкость и скорость газа. Аналогичное описание скорости окисления железа в потоке кислорода предложено в [16].

ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 представлена схема лазерной резки металла. Мощное лазерное излучение (I) фокусируется на поверхность листа. Соосно с лучом в зону действия излучения подается струя кислорода с некоторым содержанием нейтральной примеси (II). Кислород из газовой струи потребляется поверхностью металла за счет гетерогенной химической реакции окисления железа, в результате которой образуется жидкий продукт — оксид железа FeO. Поглощенное излучение и энергия экзотермической реакции разогревают металлическую поверхность до температуры плавления. На фронте реза образуется пленка расплава металла (III), покрытая слоем жидкого оксида (IV), которая движется под действием газового потока (II) и выносится из области реза. Потребление кислорода сопровождается интенсивным его оттоком из газовой фазы в жидкую пленку, нейтральная

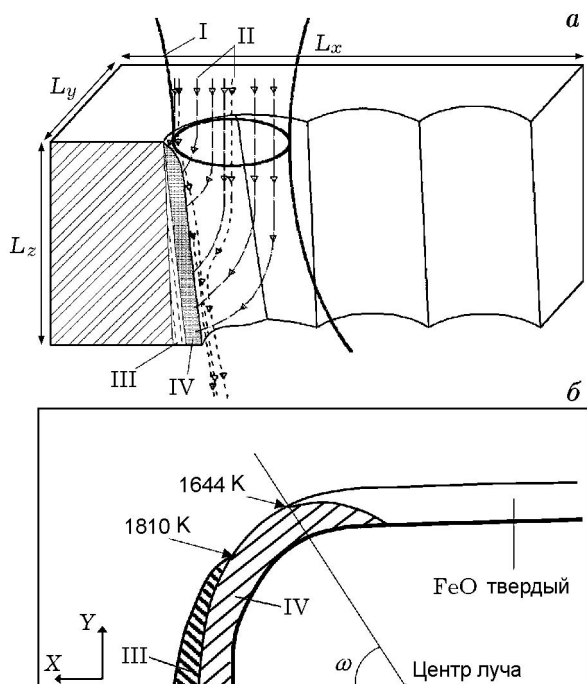


Рис. 1. Схема процессов, протекающих при кислородной газолазерной резке металла:

a — общая картина процессов с образованием шероховатости, *b* — структура жидкого слоя на поверхности реза в зоне действия лазерного излучения; I — лазерный луч, II — струя кислорода с нейтральной примесью, III — расплав металла, IV — расплав оксида металла

примесь остается около поверхности жидкой пленки, накапливается и затрудняет дальнейший доступ кислорода к фронту реза. Чтобы прореагировать с несвязанным железом, кислород, поглощаемый жидкой пленкой из струи газа, проникает через слой оксида за счет диффузии. Лазерный луч при этом непрерывно передвигается с некоторой постоянной скоростью V_c , образуя канал лазерного реза, качество которого (шероховатость, ширина и форма) зависит от большого количества физических параметров. В секторе, ограниченном углом ω (см. рис. 1, *b*), температура материала может быть максимальной, оксидный слой при этом может находиться в жидком состоянии. В пределах сектора ω расплавленный оксидный слой утрачивает свои защитные свойства. Это выражается в том, что локально возрастает скорость диффузионного переноса кислорода к чистому железу, кислород напрямую может контактировать с жидким или твердым металлом, что приводит к росту интенсивности химической реакции окисления и увеличению скорости го-

рения.

Математическое описание картины явления требует рассмотрения в трехмерной постановке ряда взаимосвязанных задач. Решение этих задач в настоящее время затруднено в силу отсутствия развитых методов численного решения сопряженных задач механики сплошных сред и физики лазерного излучения [19].

Рассмотрим ряд предположений, которые без утраты общности значительно упрощают постановку изучаемой проблемы:

- параметры течения смеси газов и их концентрации считаются постоянными;
- массовая скорость J_{Ox} окисления железа в потоке газа, содержащем кислород, определяется из соотношения (2);
- в жидкой пленке протекает экзотермическая химическая реакция окисления железа (1) с образованием оксида железа FeO и выделением большого количества тепла;
- в жидкой пленке прослойка жидкого железа, примыкающего к твердому металлу, тонка по сравнению со слоем жидкого оксида, так как в условиях конвективной диффузии (за счет обдува газовым потоком) интенсивность химической реакции существенно повышается;
- теплофизические свойства жидкой пленки приравниваются к свойствам расплавленного оксида железа;
- приток энергии на поверхности металла осуществляется за счет лазерного излучения и теплового эффекта реакции в жидком слое;
- отвод тепла от поверхности формирующегося реза происходит за счет теплопроводности материала;
- материал в твердом и жидком состояниях является изотропным с гомогенными свойствами;
- радиационные, конвективные и тепловые потери считаются малыми по сравнению с теплоотводом в твердый металл [6];
- эффектами паро- и плазмообразования пренебрегается.

С учетом перечисленных выше предположений в данной работе рассматривается задача в трехмерной постановке, но без учета движения жидкой пленки. Здесь предполагается, что толщина пленки настолько мала, что конвективный перенос незначителен, течение пленки поэтому не рассматривается. Жидкая пленка считается неподвижной, задается лишь ее толщина.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В силу симметрии задачи на рис. 2 приведено горизонтальное сечение половины рассматриваемой области. Луч движется вдоль оси OX со скоростью V_c , оставляя за собой область Ω_0 , которая свободна от металла и занята газом. Эта область, которая собственно и является лазерным резом, возникает в результате удаления жидких продуктов, образующихся под действием излучения и кислорода. Подвижная криволинейная граница Γ_0 является искомой поверхностью лазерного реза. Область Ω_1 непосредственно занята твердым металлом. Между областями Ω_0 и Ω_1 имеется слой Ω_2 жидкого или уже застывшего материала. Расширение канала реза происходит только за счет плавления исходного металла.

Математическое описание физических процессов, протекающих в областях $\Omega_0, \Omega_1, \Omega_2$, предлагается рассматривать в следующей сложносопряженной постановке:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_1 \nabla T_1), \quad (x, y, z) \in \Omega_1, \quad (3)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_2 \nabla T_2) + Q, \quad (x, y, z) \in \Omega_2, \quad (4)$$

$$\lambda_{1s} \frac{\partial T_1}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1+0} - \lambda_{2m} \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1-0} = \rho_{1m} H_1 \frac{\partial \Gamma_1}{\partial t}, \quad (5)$$

$$T_1(t, x, y, z) = T_2(t, x, y, z) = T_{1m}, \quad (x, y, z) \in \Gamma_1,$$

$$\lambda_{2s} \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2+0} - \lambda_{2m} \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2-0} = \rho_{2m} H_2 \frac{\partial \Gamma_2}{\partial t}, \quad (6)$$

$$T_2(t, x, y) = T_{2m}, \quad (x, y, z) \in \Gamma_2,$$

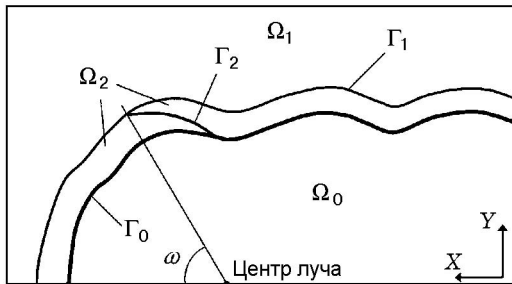


Рис. 2. Схема расчетной области:

Ω_0 — газ, Ω_1 — металл в твердом состоянии, Ω_2 — жидкий или твердый слой продуктов реакции; Γ_0 — искомая граница лазерного реза, Γ_1 — фронт плавления металла, Γ_2 — граница плавления оксида

$$z = 0, \quad 0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y: \quad (7)$$

$$\lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial z} = q_z, \quad j = 1, 2,$$

$$z = L_z, \quad 0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y: \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_j}{\partial z} = 0, \quad j = 1, 2,$$

$$x = 0; \quad L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad 0 \leq z \leq L_z: \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_j}{\partial x} = 0, \quad j = 1, 2,$$

$$y = 0; \quad L_y, \quad 0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq z \leq L_z: \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_j}{\partial y} = 0, \quad j = 1, 2,$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_{\Gamma_0} = (\vec{q} \cdot \vec{n}), \quad \vec{n} = \frac{\nabla \Gamma_0}{|\nabla \Gamma_0|}, \quad (11)$$

$$(x, y, z) \in \Gamma_0,$$

$$\vec{q} = (0, 0, q_z), \quad q_z = A(\beta) I(t, x, y), \quad (12)$$

$$Q = \frac{2\mu_{\text{Fe}} Q_c}{\delta} J_{ox} (1 - H(\omega)), \quad (13)$$

$$I(t, x, y) = \frac{W}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-x_0-V_c t)^2 + y^2}{2\sigma^2}\right). \quad (14)$$

Здесь $T_k(t, x, y, z)$ — искомые температуры; $\rho_k(t, x, y, z, T_k)$, $c_k(t, x, y, z, T_k)$ и $\lambda_k(t, x, y, z, T_k)$ — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности в областях Ω_k ($k = 1, 2$); T_{1m} , T_{2m} — температуры плавления железа и оксида железа; H_1 , H_2 — удельные теплоты плавления железа и оксида железа соответственно; Q_c , J_{ox} — удельный тепловой эффект и скорость химической реакции окисления железа в кислороде (выделение тепла происходит в секторе, ограниченном углом ω , в котором жидкий оксид соседствует с металлом); $H(\omega)$ — функция Хевисайда; δ — толщина жидкого слоя; μ_{Fe} — молекулярная масса железа; $I(t, x, y)$ — плотность мощности излучения; $A(\beta)$ — коэффициент поглощения излучения; W — мощность излучения; σ — дисперсия пучка; x_0 — начальное положение центра пучка

и струи кислорода, перемещающихся вдоль оси OX ; β — угол падения излучения (угол между осью OZ и направлением нормали к поверхности реза в данной точке).

Параметры газа в области Ω_0 (давление P_0 , температура T_0 , скорость U_0 , молярная концентрация кислорода C) постоянны. В области $\Omega_1 \cup \Omega_2$ рассматривается двухфазная задача Стефана (3)–(6) с двумя внутренними подвижными границами: $\Gamma_1(t, x, y, z) = 0$ — поверхность твердого металла (при ее изменении температура на ней постоянна и равна температуре плавления T_{1m}). Считается, что при плавлении металл превращается сразу в оксид, $\Gamma_2(t, x, y, z) = 0$ — поверхность плавления оксида с температурой плавления T_{2m} . На внутренних подвижных границах рассматриваются условия Стефана (5), (6). Задача осложнена тем, что внешняя граница области $\Omega_1 \cup \Omega_2$ имеет подвижный участок $\Gamma_0(t, x, y, z) = 0$, контактирующий с газом и излучением. На этом участке записываются условия (7), (11), которые учитывают приток тепла в пятне лазерного излучения.

Начальные условия для температуры по подобластям Ω_1 и Ω_2 в момент времени $t = 0$ задаются в согласованном виде: $T_1(0, x, y, z) = T_2(0, x, y, z) = T_0 = 300$ К.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для решения поставленных выше сопряженных задач тепло- и массообмена с криволинейной свободной границей области Γ_0 , которая представляет собой искомую поверхность лазерного реза, применялся метод фиктивных областей [20] и эффективный алгоритм численного решения двухфазных задач Стефана [21] с использованием методики сглаживания скачка энтальпии и коэффициентов переноса в уравнении теплопроводности на границе плавления Γ_1, Γ_2 [22]. Численный метод решения [22] основан на явной центральной интегроинтерполяционной разностной схеме, имеющей второй порядок точности по пространственным координатам и первый порядок точности по времени. Указанные методы [20–22] позволяют проводить расчеты без явного выделения подвижных границ $\Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2$. Адаптация указанных методов к рассматриваемой выше задаче в случае двумерной постановки подробно описана в [10].

Размеры расчетной области выбирались таким образом, чтобы за время перемещения

луча температура на ее границах в плоскости XOY не успевала существенно измениться. Задавалась равномерная сетка по каждому из трех направлений. Минимальные размеры расчетной области составляли $L_x = 4.5$ мм, $L_y = 1.5$ мм, что соответствовало числу узлов сетки 1500 и 500. Изменение температуры на границах области за время расчетов не превышало 50 К. Толщина материала L_z выбрана равной 1 мм, что уже достаточно для учета трехмерных эффектов, но вместе с тем еще допустимо использование упрощенного описания пленки. Число шагов сетки по толщине пластины L_z варьировалось и составляло 50 и 100. Начальная форма канала реза задавалась вырезом с вертикальными стенками длиной 1 мм и шириной, равной диаметру луча, и закругленной передней кромкой. Центр луча находился в точке $x_0 = 875$ мкм и совпадал с центром закругления передней кромки. Наличие в правой части (4) и (13) дополнительного локального источника тепла Q накладывает ограничение на расчетный шаг по времени. Для обеспечения устойчивого счета число Куранта выбиралось равным 0.05.

В табл. 1 приведены значения физических параметров, которые использовались в расчетах. Теплофизические характеристики веществ указаны в табл. 2.

Таблица 1
Значения исходных физических параметров

Параметр	Значение	Источник
Тепловой эффект реакции Q_c , кДж · кг ⁻¹	4 800	[9]
Коэффициент диффузии D , м ² · с ⁻¹	$1.82 \cdot 10^{-4}$	
Вязкость кислорода η , Па · с	$20.7 \cdot 10^{-6}$	
Плотность кислорода при нормальных условиях, кг · м ⁻³	1.3	—
Скорость газа, м · с ⁻¹	250	
Коэффициент поглощения α	0.3	
Мощность излучения, Вт	1 000	
Дисперсия лазерного луча σ , мкм	62	
Толщина листа, мм	1	
Доля кислорода в смеси, % ат.	99.7	
Толщина слоя оксида δ , мкм	20	

Таблица 2

Теплофизические параметры материала

Характеристика материала	Железо твердое	Оксид		
		твердый	жидкий	
Теплопроводность, Вт · м ⁻¹ · К ⁻¹	98 - 0.073T, T < 1 042 К 12.4 + 0.0125T, T > 1 042 К	2.1	14.2	[24]
Плотность, кг · м ⁻³	8 070 - 0.73T	5 700	4 200	[25]
Теплоемкость, Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹	396 + 0.233T	868	—	[23]
Температура плавления, К	1 810	1 640		[17]
Скрытая теплота плавления, Дж · кг ⁻¹	272	435		

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты численного решения задачи (3)–(14) представлены на рис. 3–5. Распределение температуры в горизонтальном сечении расчетной области плоскостью z = 0 приведено на рис. 3. На межфазной границе металл — газ наблюдается появление типичной бороздчатой формы лазерного реза.

Расчет проводился без учета конвекции, толщина пленки задавалась постоянной и равной 20 мкм. Наблюдается сгущение изолиний температуры на передней кромке реза в жидком слое и твердом металле. Локальное повышение температуры до 2 400 К объясняется воз-

действием излучения, тепловыделением за счет реакции окисления и отсутствием конвективного теплопереноса.

Трехмерный профиль поверхности реза представлен на рис. 4. Формирование такого

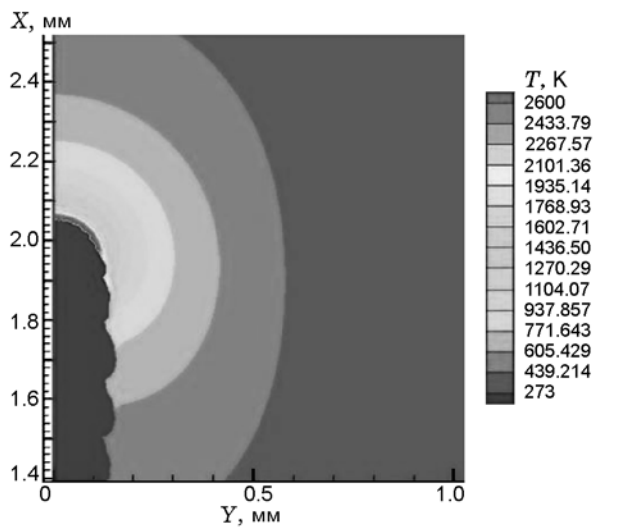


Рис. 3. Изолинии температуры в горизонтальном сечении расчетной области, находящемся в 200 мкм от поверхности листа, в момент времени 49.3 мс, скорость резки 20 мм/с

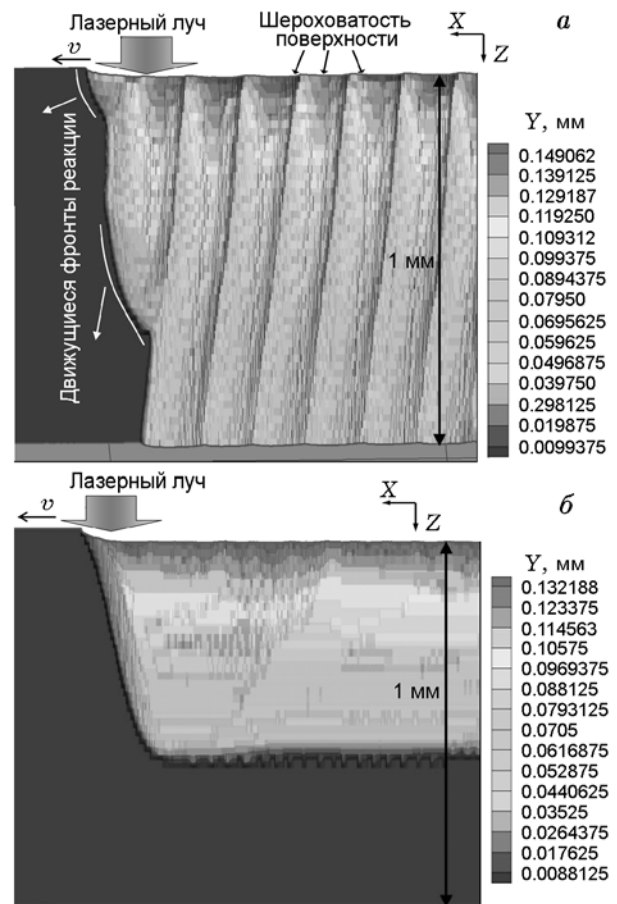


Рис. 4. Профиль поверхности лазерного реза: скорость резки: а — 20 мм/с, б — 40 мм/с

волнообразного профиля поверхности реза наблюдается, когда скорость резки низкая, в данном случае $V_c = 20$ мм/с. Периодически повторяющийся цикл воспламенения, горения и затухания начинается в тот момент времени, когда луч, двигаясь по оси OX с постоянной скоростью, надвигается на верхнюю кромку реза (рис. 5, *a*). Инициированная на верхней кромке волна горения начинает распространяться в металле во всех направлениях, как это видно на примере радиального распространения верхней зоны горения на рис. 5, *б*.

Так как задача имеет выделенную вертикальную ось OZ , то волна горения, двигаясь первоначально с опережением луча в плоскости верхней поверхности листа, в определенный момент достигает зоны непрогретого металла, радиальное движение волны горения замедляется и далее полностью прекращается (рис. 5, *в*). Часть волны горения, направленная в глубину листа, продолжает двигаться параллельно фронту реза, где металл хорошо прогревается излучением (рис. 5, *г*). Возможно одновре-

менное существование двух волн горения. На рис. 5, *д* показано, что первая волна еще не успела распространиться на всю глубину реза, как луч уже переместился и инициировал на поверхности новую волну горения. Цикличность процесса обеспечивает регулярное образование борозд шероховатости (рис. 5, *е*).

Подобную цикличность в динамике светящихся областей наблюдали в работе [4] при скоростной киносъемке верхней поверхности листа в процессе кислородной газолазерной резки низкоуглеродистой стали. Картина радиального распространения ярко светящейся зоны горения на поверхности периодически сменялась смещением светящейся области в глубину канала лазерного реза [4].

Если скорость перемещения луча (скорость резки) превышает линейную скорость горения металла, то борозды шероховатости не успевают формироваться, поверхность реза в этом случае остается гладкой. На рис. 4, *б* можно видеть сравнительно гладкую поверхность реза. Скорость резки составляла 40 мм/с, что превышает скорость волны горения.

Результаты проведенного моделирования подтверждают, что шероховатость поверхности при газолазерной резке с кислородом образуется вследствие циклов горения. Показано, что область распространения волны горения определяется тепловым балансом на фронте реза.

В условиях лазерной резки листов средней толщины диаметр лазерного луча и скорость его передвижения по поверхности металла находятся в докритической области [2], когда инициированная реакция затухает. При уменьшении скорости резки, что характерно для листов толщиной 10 мм и более, диаметр лазерного луча становится больше критического, энергия, выделяющаяся на фронте реакции, не компенсируется теплопотерями в металл и становится достаточной для поддержания высокой температуры при дальнейшем распространении фронта реакции. Реакция прекращается при выходе фронта за границы кислородной струи. Нарушение процесса резки, связанное с переходом реакции в самостоятельный режим распространения, хорошо известно как «автогенный» режим и нежелательно, так как характеризуется плохим качеством поверхности реза.

Различные режимы теплового распространения реакции являются основополагающими

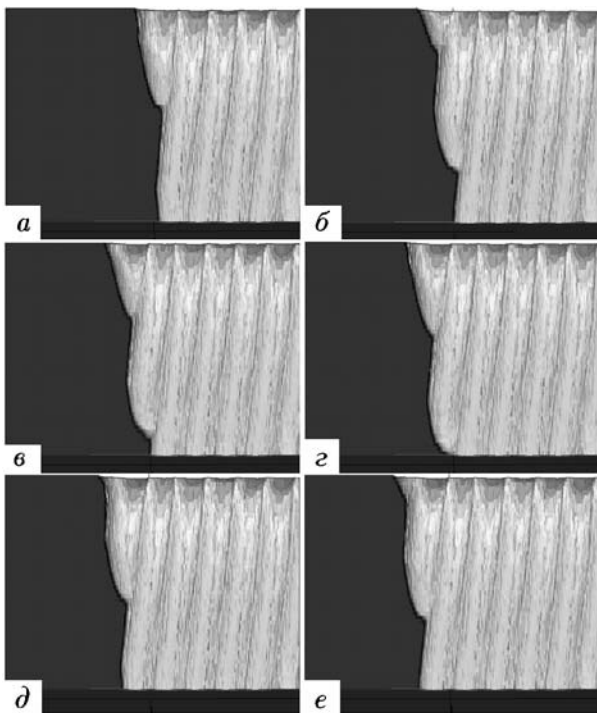


Рис. 5. Динамика формирования профиля поверхности реза при скорости резки 20 мм/с:

профили поверхности приведены последовательно в моменты времени, мс: *a* — 49.3, *б* — 52.4, *в* — 54.2, *г* — 55.1, *д* — 56.8, *е* — 57.7

эффектами для формирования канала реза при кислородной резке стали.

ВЫВОДЫ

Предложена физико-математическая модель, описывающая появление шероховатости при кислородной газолазерной резке металла. Модель основана на циклическом несамостоятельном горении железа в кислороде и позволяет описывать динамику поведения и размеры областей горения в зависимости от скорости резки, геометрии гауссова пучка и концентрации примесей в струе кислорода.

Показано, что область распространения реакции определяется тепловым балансом на фронте реза.

В результате численного моделирования получены трехмерные профили и линейные размеры шероховатости в зависимости от скорости резки и динамики стекающей жидкой пленки.

Полученные профили поверхности реза и описанные выше механизмы развития горения и образования шероховатости при кислородной газолазерной резке малоуглеродистой стали качественно согласуются с экспериментальными данными [4, 5].

ЛИТЕРАТУРА

- Брейтер А. Л., Мальцев В. М., Попов Е. И. Модели воспламенения металлов // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 4. — С. 558–570.
- Карлов Н. В., Кириченко Н. А., Лукьянчук Б. С. Лазерная термохимия, основы и применения. — М.: Центрком, 1995.
- Steen W. M., Watkins K. Laser Material Processing. — London: Springer-Verlag, 2003.
- Miyamoto I., Maruo H. Mechanism of Laser Cutting. — 1988. — (Препринт Международного института сварки, IITW Doc. NIE-LCWG-88.011).
- Sobih M., Crouse P. L., Li L. Elimination of striation in laser cutting of mild steel // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2007. — V. 40. — P. 6908–6916.
- Dowden J. The Theory of Laser Materials Processing. — Springer-Verlag, 2009.
- Ivarson A., Powell J., Kamalu J., Magnusson C. The oxidation dynamics of laser cutting of mild steel and the generation of striations on the cut edge // J. Mater. Processing Technol. — 1994. — V. 40. — P. 359–374.
- Chen K., Yao Y. L., Modi V. Numerical simulation of oxidation effect in the laser cutting process // The Intern. J. Advanced Manufacturing and Technol. — 1999. — V. 15. — P. 835–842.
- Joardar A., Tsai H. L. Striation phenomena in oxygen-assisted cutting of steels // NSF Workshop on Unsolved Problems and Research Needs in Thermal Aspects of Material Removal Processes, 2003 June 10–12, Stillwater, OK.
- Ermolaev G. V., Kovalev O. B., Orishich A. M., Fomin V. M. Mathematical modelling of striation formation in oxygen laser cutting of mild steel // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2006. — V. 39. — P. 4236–4244.
- Chen R. Y., Yen W. Y. D. Review of the high-temperature oxidation of iron and carbon steels in air or oxygen // Oxidation of Metals. — 2003. — V. 59, N 5/6. — P. 433–468.
- Антонов И. А. Газопламенная обработка металлов. — М.: Машиностроение, 1976.
- Болобов В. И. Условия воспламенения железа и углеродистой стали в кислороде // Физика горения и взрыва. — 2001. — Т. 37, № 3. — С. 52–57.
- Johnson A. A., Von Fraunhofer J. A., Jannet E. W. Combustion of finned steel tubing during stress relief heat treatment // J. Heat Treatment. — 1986. — V. 4, N 3. — P. 265–271.
- Chen S. L. The effect of gas composition on CO₂ laser cutting of mild steel // J. Mater. Processing Technol. — 1998. — V. 73. — P. 147–159.
- Wells A. A. The iron oxygen combustion process // Brit. Welding J. — 1955, September. — P. 392–400.
- Левинский Ю. В. Р-Т-Х диаграммы состояния двойных металлических систем. — М.: Металлургия, 1990. — Т. 1.
- Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплообмен в химической кинетике. — М.: Наука, 1987.
- Gross M. S., Black I., Muller W. H. Determination of the lower complexity limit for laser cut quality modelling // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. — 2004. — V. 12. — P. 1237–1249.
- Kovalev O. B., Larkin N. A., Fomin V. M., Yanenko N. N. The solution of nonhomogeneous thermal problem and the stefan single phase problem in arbitrary domains // J. Computer Methods in Appl. Mechanics and Eng. — 1980. — V. 22. — P. 259–271.
- Будак Б. М., Соловьева Е. Н., Успенский А. Б. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задач Стефана // Журн. вычислит. математики и мат. физики. — 1965. — Т. 5, № 5. — С. 828–840.
- Самарский А. А., Моисеенко Б. Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. вычислит. математики и мат. физики. — 1965. — Т. 5, № 5. — С. 816–827.
- Зиновьева В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. — М.: Металлургия, 1989.

24. **Лепинских Б. М., Белоусов А. А.** Транспортные свойства металлических и шлаковых расплавов. — М.: Металлургия, 1995.
25. **Steinberg T. A., Kurtz J., Wilson D. B.**, The solubility of oxygen in liquid iron oxide during the combustion of iron rods in high-pressure oxygen // *Combust. Flame.* — 1998. — V. 113. — P. 27–37.

Поступила в редакцию 10/VI 2009 г.
