

УДК 51-74+621.791

МОДЕЛЬ КИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ С УЧЕТОМ ХИМИЧЕСКОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

М. А. Анисимова¹, А. Г. Князева^{2,3}¹Томский политехнический университет, 634050 Томск, anisimova_mawa@mail.ru²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск³Томский государственный университет, 634050 Томск

Предложена модель процесса кислородной резки металлической пластины, в которой учитываются нагрев внешним и внутренним источниками тепла, теплоотвод из зоны реза и уменьшение толщины разрезаемой детали. Модель реализована численно. Продемонстрированы возможности модели для описания различных режимов резки: поверхностной и разделительной, резки в кинетическом и диффузионном режимах. По результатам расчетов построено поле температуры, исследовано влияние параметров на изменение толщины детали и формы края реза. Результаты качественно согласуются с данными экспериментов.

Ключевые слова: кислородная резка, математическая модель, режимы резки, распределение температуры, реакция окисления.

DOI 10.15372/FGV20160107

ВВЕДЕНИЕ

В различных технологиях обработки и получения материалов проводится инициирование химических реакций подвижными источниками тепла разной физической природы. К таким технологиям можно отнести обработку материалов лазерным излучением [1], плазмой [2], сварку и резку металлов [3], управляемый синтез [4] и т. п. Особый интерес представляет процесс резки металлов, в котором химические превращения в зоне реза существенно влияют на результат. Различаются следующие технологии резки: лазерная, газолазерная и кислородная. Каждая из них имеет множество разновидностей, связанных с геометрией, свойствами разрезаемых деталей, способами подвода энергии и т. д. В общем случае под кислородной резкой понимают процесс местного интенсивного окисления струей кислорода металла, нагреваемого до температуры, близкой к температуре воспламенения, вдоль заданной траектории [5]. Процесс основан на способности некоторых металлов сгорать в струе технически чистого кислорода при температуре ниже температуры их плавления. Наиболее широкое применение эта технология находит для резки низкоуглеродистых сталей. Для нормального протекания процесса кислородной резки необходимо, чтобы температура плавления ок-

сидов металлов, образующихся при резке, была ниже температуры плавления самого металла [6]. Количество тепла, которое выделяется при сгорании металла в кислороде, должно быть достаточно большим, чтобы поддерживать процесс непрерывным. При этом теплопроводность металлов не должна быть слишком высокой, так как тепло, сообщаемое подогревающим пламенем, интенсивно отводится от места реза, вследствие чего процесс резки неустойчив и в любой момент может прерваться.

Кислородную резку применяют как заготовительную операцию при вырезке деталей под механическую обработку, а также для изготовления деталей без последующей механической обработки. Качество резки характеризуется шероховатостью поверхности реза, равномерностью ширины реза по всей толщине разрезаемого металла, степенью оплавления верхней кромки.

Различают поверхностную (срезается поверхностный слой металла), разделительную (металл разрезается на части) и копьевую (в металле прожигается глубокое отверстие) кислородную резку. Разделительная кислородная резка широко распространена при раскрое листов и резке профильного материала. Основное применение поверхностной кислородной резки — исправление брака литья и прокатки. Копьевая резка широко используется при обра-

ботке неметаллических материалов, например бетона.

Резка начинается с нагрева металла до температуры его воспламенения в струе кислорода. Источником тепловой подготовки металла может служить электрическая дуга, но более удобен подогрев пламенем. Подогрев разрезаемого металла обеспечивается соответствующим расположением подогревающего пламени и режущего кислорода. Возможны различные варианты их последовательного расположения [7]. В своей модели мы остановились на варианте, когда щелевое отверстие для подогревающего пламени расположено концентрично центральному отверстию для кислорода. В этом случае можно осуществлятьрезы с любым изменением направления.

Важными параметрами резки являются скорость перемещения струи по поверхности детали, скорость газа в струе, ее ширина, определяющая характерный размер области прогрева разрезаемого материала [5–7]. От скорости резки зависят устойчивость процесса и качество вырезаемых деталей. Малая скорость приводит к оплавлению разрезаемых кромок, а большая — к появлению непрорезанных до конца участков реза.

При кислородной резке протекают сложные физико-химические, тепловые и гидродинамические процессы, вызывающие изменение структуры и химического состава металла в узкой зоне, прилегающей к кромке реза. Для нее характерны следующие особенности. Во-первых, нагрев металла осуществляется двумя источниками тепла: внешним — подогревающим пламенем, внутренним — теплом, спонтанно генерируемым в реакционной зоне в результате превращения в теплоту некоторого количества химической энергии. Во-вторых, в реакционной зоне происходит непрерывное удаление расплавленного металла, шлаков и отходящих газов.

Это отличает кислородную резку от лазерной резки в среде кислорода. Моделированию лазерной резки посвящено большое число работ. Модели отличаются формой источника тепла и зависимостью свойств от температуры. Например, в [8] учитывается составной источник тепла, а в [9] — сложная траектория его движения. Можно отметить модели, описывающие физико-химические процессы в металле и расплаве у края реза [10]; модели газолазерной резки с описанием формы края реза [11] и т. д.

Эти же эффекты обсуждаются в работе [12] по моделированию газолазерной резки металлов.

Двумерная тепловая модель процесса кислородной резки, учитывающая нагрев металла и гетерогенную кинетику формирования края реза, предложена в [13, 14]. Там же даны простейшие аналитические оценки и представлены предварительные расчеты. Математическая модель описывает форму края реза, глубину и ширину получаемой канавки. В [15] обнаружены режимы превращения в зоне реза, приводящие к значительному выгоранию металла и появлению зоны реза правильной формы.

В настоящей работе учтены возможные потери тепла и изучены режимы превращения в зоне реза, выявленные в [15].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Физические явления, сопровождающие кислородную резку, разнообразны [5–7]. Металл сгорает с выделением тепла, которое передается через образовавшийся шлак нижележащим слоям; происходит сгорание металла по всей толщине разрезаемого листа с образованием узкой щели (реза). В момент начала газовой резки подогрев осуществляется только подогревающим пламенем. Кроме этого, оно на всем протяжении реза подогревает переднюю верхнюю кромку разрезаемого металла впереди струи режущего кислорода до температуры воспламенения, обеспечивая тем самым непрерывность процесса. При резке кислородным кошем посторонний источник подогрева требуется только в начале процесса. Мощность подогревающего пламени зависит от толщины и химического состава разрезаемого металла и сплава. Чем меньше толщина разрезаемой стали, тем большую роль играет подогревающее пламя. Струя режущего кислорода должна вызывать непрерывное окисление по всей толщине разрезаемого металла, поэтому скорость перемещения резака должна соответствовать скорости окисления металла по всей толщине. Скорость окисления зависит от скорости истечения кислородной струи. Струя режущего кислорода должна обеспечивать равномерную ширину реза по всей толщине разрезаемого металла. Требуется путем математического моделирования установить, при каких условиях это возможно.

Предположим, что разрезаемая металлическая пластина имеет прямоугольную форму,

она достаточно тонкая, поэтому распределением температуры по ее толщине можно пренебречь. По поверхности пластины движется источник тепла с заданным распределением энергии.

С учетом описанных явлений и принятых предположений математическая модель будет включать уравнение теплопроводности в форме

$$hc\rho\frac{\partial T}{\partial t} = h\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)\right] - \alpha_{eff}(T - T_e) + q_e + q_h - \varepsilon_{eff}\sigma_0[T^4 - T_w^4],$$

где T — температура, c — теплоемкость, ρ — плотность, λ — коэффициент теплопроводности разрезаемого материала, $h = h(t, x, y)$ — толщина пластины, T_e — температура окружающей среды, $q_h = Q_h\frac{dh}{dt}$ — источник тепла вследствие гетерогенной реакции окисления, Q_h — суммарное тепловыделение вследствие химических реакций в зоне реза, α_{eff} — эффективный коэффициент теплоотдачи с поверхностей пластины по закону Ньютона — Рихмана, t — время, x, y — пространственные координаты, σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана, ε_{eff} — степень черноты, T_w — температура стенки. В общем случае теплофизические свойства зависят от температуры.

Пусть энергия в источнике тепла, которая складывается из энергии, подаваемой для предварительного подогрева, и энергии диссипации вследствие соударения струи с разрезаемой поверхностью, распределена по закону Гаусса:

$$q_e = q(t)\varphi(x, y, t),$$

$$\varphi(x, y, t) = \exp[-a^2(y^2 + (x - vt)^2)],$$

где $q(t)$ — максимальная плотность мощности источника, возможно, зависящая от времени, v — скорость движения струи вдоль разрезаемой пластины (в направлении оси OX), a^{-1} — эффективный радиус кислородной струи (a — «коэффициент сосредоточенности» струи) [5].

Изменение толщины пластины в зоне реза будем описывать кинетическим законом, включающим в себя, в отличие от кинетических законов для гетерогенных реакций [16], эффективные формально-кинетические параметры

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{k\beta_0}{k + \beta_0} = -\Phi(T) \text{ при } h \neq 0,$$

$$\frac{dh}{dt} = 0 \text{ при } h = 0.$$

Скорость гетерогенной реакции в диффузионном режиме β_0 соответствует скорости подвода окислителя. В рассматриваемом процессе кислородной резки эта величина определяется скоростью газа в кислородной струе. Скорость гетерогенной реакции в кинетическом режиме (k) [16] зависит от температуры и концентрации окислителя. В случае кислородной резки представим кинетический параметр k в виде

$$k = \varphi(x, y, t)k_0 \exp(-E/RT),$$

где k_0 — предэкспонент или константа скорости реакции, E — энергия активации суммарной реакции, R — универсальная газовая постоянная. Величины k_0, E, Q_h — эффективные характеристики совокупности физико-химических стадий процесса окисления в зоне реза.

На торцах пластины источники и стоки тепла отсутствуют:

$$x = 0, h_x: \lambda\frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad y = 0, h_y: \lambda\frac{\partial T}{\partial y} = 0.$$

В начальный момент времени

$$t = 0: T(x, y, 0) = T_0; \quad h(x, y, 0) = h_0.$$

В общем случае требуется определить условия, необходимые для начала резки, и исследовать возможные режимы процесса после его выхода на квазистационарный режим.

При моделировании кислородной резки металлических пластин в первом приближении, когда интерес представляет параметрический анализ задачи с целью выявления основных закономерностей, можно пренебречь процессами в объеме (объемными реакциями, структурными фазовыми переходами и перераспределением элементов в зоне прогрева), зависимостью теплопроводности и теплоемкости от температуры, т. е. принять $c_p = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$.

Описанная математическая модель является многопараметрической, она содержит несколько характерных пространственных масштабов, времена и скорости протекания различных процессов: скорость эффективной реакции, скорость перемещения струи, скорость газа в струе, толщину пластины, характерный тепловой масштаб, эффективный

радиус струи и т. п. Эти величины существенно зависят от численных значений физических параметров. Удачный выбор безразмерных переменных позволяет существенно сократить число параметров, варьируемых при численном исследовании, и выделить безразмерные комплексы, удобные для обработки результатов расчетов и эксперимента. Более того, численные значения большинства физических параметров неизвестны или определены с большой погрешностью; данные разных авторов иногда различаются на порядок. В рамках конкретных значений безразмерных физических комплексов, приводящих к тому или иному режиму изучаемого процесса, физические величины могут изменяться в широких пределах. Параметрический анализ модели в безразмерных переменных позволяет установить различные режимы процесса кислородной резки, подобно тому, как это делается при изучении различных моделей теории зажигания [17].

2. БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ И ПАРАМЕТРЫ

В безразмерных переменных

$$\theta = \frac{T - T_*}{T_* - T_0}, \quad \xi = \frac{x}{x_*}, \quad \zeta = \frac{y}{y_*}, \quad \tau = \frac{t}{t_*}, \quad H = \frac{h}{h_0},$$

где x_* , y_* , t_* , T_* — характерные масштабы, задача принимает вид

$$H \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \delta^{-1} H \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} \right] -$$

$$- \text{Nu}(\theta + \theta_e) - B[(\theta + \sigma^{-1})^4 - (\sigma^{-1} - \theta_w)^4] +$$

$$+ \varphi_1(\xi, \zeta, \tau) + A \frac{dH}{d\tau},$$

$$\frac{dH}{d\tau} = \begin{cases} -\Phi_1(\theta), & H \neq 0, \\ 0, & H = 0, \end{cases}$$

$$\xi = 0, H_X: \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = 0; \quad \zeta = 0, H_Y: \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} = 0;$$

$$\tau = 0: \theta = -1.$$

Здесь

$$\varphi_1(\xi, \zeta, \tau) = \exp[-(\zeta^2 + (\xi - \omega\tau)^2)]$$

— подвижный внешний источник тепла;

$$\Phi_1(\theta) = \frac{\varphi_2(\theta)\varphi_1}{1 + \gamma\varphi_2(\theta)\varphi_1};$$

$$\varphi_2(\theta) = \exp \frac{\sigma\theta}{\beta(1 + \sigma\theta)}$$

— функции, характеризующие скорость изменения толщины в зоне реза и скорость суммарного химического тепловыделения.

Параметры модели:

$$\text{Nu} = \frac{t_*\alpha_{eff}}{h_0c\rho}; \quad B = \frac{\varepsilon_{eff}\sigma_0t_*}{h_0c\rho}(T_* - T_0)^3;$$

$$\omega = avt_*; \quad \delta = \frac{a^{-2}c\rho}{t_*\lambda} = \left[\frac{1/a}{\sqrt{\alpha t_*}} \right]^2;$$

$$A = \frac{Q_h}{c\rho(T_* - T_0)}; \quad \sigma = \frac{T_* - T_0}{T_*};$$

$$\beta = \frac{RT_*}{E}; \quad \gamma = \beta_0^{-1}k_0 \exp \left[-\frac{E}{RT_*} \right];$$

$$\theta_e = \frac{T_* - T_e}{T_* - T_0}; \quad \theta_w = \frac{T_* - T_w}{T_* - T_0}$$

(α — коэффициент температуропроводности).

В качестве масштабов выбраны: характерный размер струи $x_* = y_* = a^{-1}$; время t_* , в течение которого окисляется слой толщиной h_0 :

$$t_* = \frac{h_0}{k_0} \exp \frac{E}{RT_*};$$

температура T_* , до которой нагревается инертный материал толщиной h_0 за время t_* за счет внешнего источника мощностью q_0 :

$$T_* - T_0 = \frac{q_0t_*}{h_0c\rho}.$$

В соответствии с этим определяется физический смысл безразмерных комплексов. Например, $A = \frac{Q_h}{c\rho(T_* - T_0)} \equiv \frac{Q_h}{q_0t_*/h_0}$ — отношение тепла, выделенного (поглощенного) химической реакцией, к теплу, запасенному в пластине толщиной h_0 при ее равномерном нагреве

Основные безразмерные параметры

T_*	Nu	B	ω	δ	A	σ	β	γ
700	$5 \cdot 10^{-8} \div 0.1$	$15 \cdot 10^{-9} \div 1.7 \cdot 10^{-3}$	>1	$10^{-3} \div 0$	$1.34 \div 6.5$	0.571	$0.01 \div 0.029$	$0 \div 10^{14}$
900		$5.2 \cdot 10^{-9} \div 5.7 \cdot 10^{-3}$	≈ 1	$0 \div 7.5$	$0.9 \div 4.3$	0.667	$0.013 \div 0.037$	$0 \div 10^{17}$
1100		$1.23 \cdot 10^{-8} \div 0.014$	<1	$0 \div 10^3$	$0.67 \div 3.2$	0.727	$0.016 \div 0.046$	$0 \div 10^{19}$

за время t_* , а γ — отношение скорости реакции в кинетическом режиме к скорости реакции в диффузионном режиме, δ — отношение эффективного радиуса струи к расстоянию, на которое вещество прогревается теплопроводностью за время t_* .

3. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Задачу решали численно по неявной разностной схеме с использованием расщепления по координатам и линейной прогонки.

Граничные условия аппроксимировали со вторым порядком по пространственным координатам, для чего величины в точках, прилегающих к поверхностям, разлагали в ряд Тейлора относительно граничных точек по малым шагам пространственной сетки, которые в общем случае могут быть различными.

Программу тестировали на примере простейшей инертной задачи и задачи с химическим источником. Проверялись непротиворечивость результатов и сходимости при уменьшении параметров разностной сетки.

Чтобы оценить область изменения безразмерных параметров модели, в качестве разрезаемого материала принята сталь, свойства которой изменяются в следующих диапазонах [18]: плотность $\rho \approx 7760 \div 7900$ кг/м³, теплоемкость $c \approx 462 \div 500$ Дж/(кг·К), теплопроводность $\lambda \approx 14.5 \div 48$ Вт/(м·К). В соответствии с литературными данными энергия активации реакции окисления сталей меняется в широких пределах [19]: $E \approx 200 \div 530$ кДж/моль (в зависимости от присутствующих других элементов). Так как образующиеся продукты реакции точно не известны и в модели не рассматриваются подробные химические превращения, то тепло эффективной (или суммарной) гетерогенной реакции окисления тоже варьируется в широких пределах $Q_h \approx 270 \div 1200$ кДж/кг в зависимости от состава стали [6, 7, 19]. Эффективный коэффициент теплоотдачи [20] $\alpha_{eff} \approx 10 \div 200$ Дж/(м²·с·К), степень черноты [21] $\varepsilon_{eff} \approx 0.075 \div 0.83$. Скорость пе-

ремещения источника по поверхности пластины $v \approx 0.025 \div 0.13$ м/с, скорость газа в струе $4 \div 9$ м/с [5–7, 22], радиус струи $1 \div 2.5$ мм.

Универсальная газовая постоянная $R = 8.31$ Дж/(моль·К); толщина пластины $h_0 = 0.005$ м; постоянная Стефана — Больцмана $\sigma_0 = 5.77 \cdot 10^{-8}$ Дж/(с·м²·К⁴), начальная температура $T_0 = 300$ К. Полагая, что $t_* \approx 10^{-4} \div 10$ с, $k_0 \approx 10^7 \div 10^{30}$, найдем область изменения основных параметров. Результаты представлены в таблице.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Влияние химического источника тепла на распределение температуры

Температурные поля, полученные по модели без учета химического источника тепла ($A = 0$, $H = \text{const}$) (рис. 1, а) и по модели с учетом химического источника тепла при изменении толщины пластины в зоне реза (рис. 1, б), свидетельствуют о том, что с течением времени форма изолиний температуры перестает изменяться. После достаточно короткой нестационарной стадии процесс выходит на квазистационарный режим, причем форма изолиний и максимальная температура различны в разных вариантах модели.

В модели только с внешним источником тепла поле температуры оказывается типичным для чисто тепловых моделей сварки и резки [23]. Имеется лишь один экстремум температуры в области максимума энерговыделения за счет внешнего нагрева.

При учете как внешнего, так и внутреннего (химического) источников тепла, а также при изменении толщины пластины в процессе резки поле температуры становится неоднородным: наблюдаются локальные экстремумы. Это связано с тем, что, с одной стороны, внешним источником в области реза прогревается слой меньшей толщины, т. е. температура там растет. С другой стороны, с уменьшением толщины связано снижение химического тепловы-

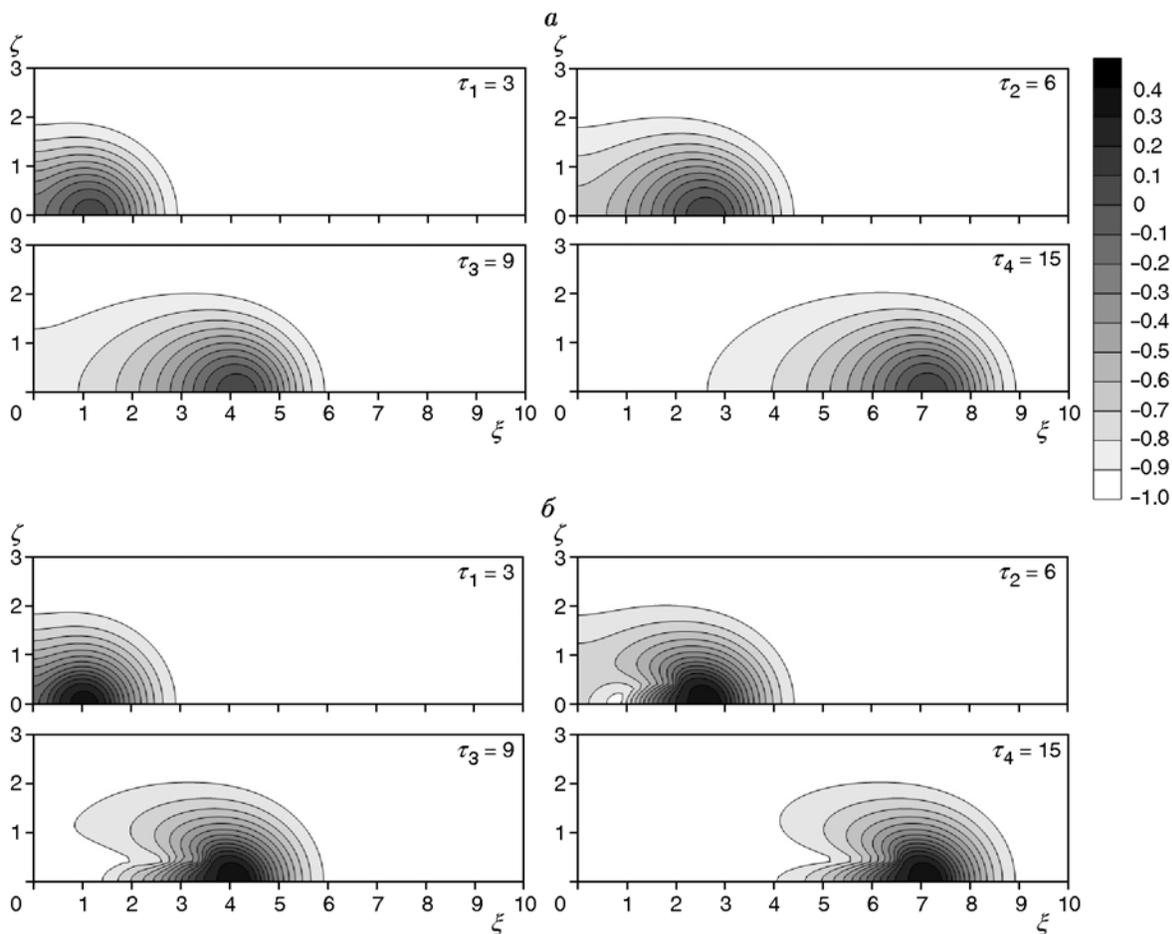


Рис. 1. Изолинии температуры в различные моменты времени для инертной задачи (а) и задачи с учетом химического источника тепла (б) ($A = 1.2$, $\gamma = 2$, $\beta = 0.05$, $Nu = 0.2$, $B = 0.1$, $\sigma = 0.7$, $\delta = 154$, $\omega = 0.5$)

деления, что, напротив, приводит к уменьшению температуры.

В любом случае форма изолиний и размер области, где температура превышает температуру плавления или температуру, условно принимаемую за температуру подключения реакции (о зажигании в принятом в [17] смысле не всегда можно говорить, поскольку не всегда имеются типичные для этого явления особенности), зависит от параметров ω и δ , т. е. от радиуса струи и скорости ее движения вдоль разрезаемой детали.

Неоднородный характер поля температуры соответствует наблюдаемому в экспериментах [8]; области пониженной температуры вблизи источника мы связываем с уменьшением толщины пластины в зоне реза вследствие окисления и уноса продуктов реакции (суммарно описываемым кинетическим уравнени-

ем). Без учета химического тепловыделения и уменьшения толщины поле температуры остается гладким.

На зависимости максимальной температуры от времени (рис. 2) виден перегиб, соответствующий подключению химической реакции, что делает процесс кислородной резки подобным процессу зажигания энергетических материалов [17]. Чем больше β , тем менее заметен перегиб, что соответствует вырожденным режимам зажигания (которым свойственны большое выгорание и слабовидимый перегиб на температурной кривой). Перегиб на температурной кривой заметен и в пространственных распределениях температуры по осям (на рисунках не показано).

Критерии зажигания можно выбрать различным образом. Например, это может быть время, когда суммарное тепловыделение хими-

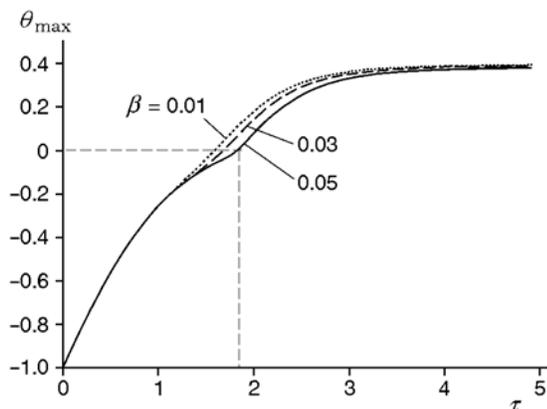


Рис. 2. Влияние параметра β на изменение максимальной температуры в процессе резки ($A = 1.2$, $\gamma = 2$, $Nu = 0.2$, $B = 0.1$, $\sigma = 0.7$, $\delta = 15$, $\omega = 0.5$)

ческой реакции превышает суммарное тепло от внешнего источника нагрева (это определение не соответствует вынужденной резке или резке, непосредственно регулируемой внешним нагревом). Это также может быть время, соответствующее перегибу на зависимости $\theta_{\max}(\tau)$ (замечание остается тем же). Для нас предпочтительнее в качестве времени зажигания или времени подключения химических реакций принять время начала уменьшения толщины пластины в зоне реза (это можно определить лишь условно). Этот вариант позволяет вводить и изучать численные характеристики процесса в любых режимах резки. Условимся считать временем зажигания подвижным источником или временем начала кислородной резки время уменьшения на 3 % толщины разрезаемой пластины в точке максимальной температуры θ_{\max} . Эта характеристика зависит от всех параметров модели, например (рис. 3), увеличивается с ростом β (изменение β может быть связано с изменением энергии активации реакции, вызванной, в свою очередь, изменением состава стали) и ростом скорости движения струи (что обусловлено уменьшением максимальной температуры и, соответственно, замедлением реакции).

4.2. Режимы кислородной резки

Модель позволяет изучать разные режимы процесса резки, которые наблюдаются экспериментально и качественно описаны выше. Так, рис. 4,а иллюстрирует образование канавки в режиме поверхностной резки, а рис. 4,б,в де-

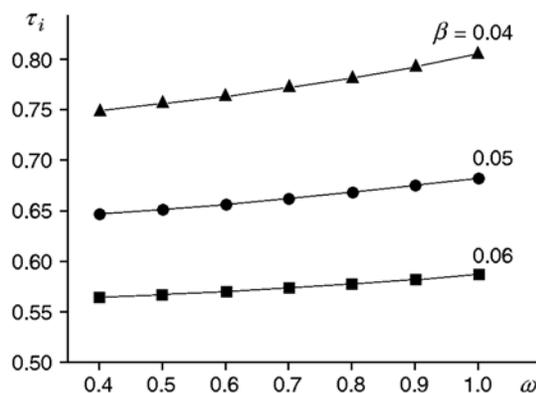


Рис. 3. Время иницирования процесса резки в зависимости от скорости движения источника тепла при различных значениях параметра β ($A = 1.2$, $\gamma = 2$, $Nu = 0.2$, $B = 0.1$, $\sigma = 0.7$, $\delta = 15$)

монстрируют характер края реза в режиме разделительной резки. Форма отверстия в режиме копьевой резки (рис. 4,з) зависит от соотношения параметров γ , β и δ . Так, при $A = 1.2$, $\gamma = 2$, $\beta = 0.05$, $Nu = 0.2$, $B = 0.1$, $\sigma = 0.7$ и $\delta > 2$ получаем практически идеальное отверстие одинакового радиуса по всей толщине пластины (на рисунках не показано). При $\delta < 2$ отверстие имеет конусообразную форму и его радиус зависит от δ : при малом радиусе струи $1/a \leq \sqrt{\alpha t_*}$ тепло успевает рассеиваться из зоны реза за счет теплопроводности.

Заметим, что стационарный процесс как поверхностной, так и разделительной кислородной резки может протекать в разных режимах. В случае, когда скорость реакции лимитируется скоростью подвода окислителя, что соответствует параметру $\gamma_1 > 1$, форма края реза получается пологой (см. рис. 4,б). В другом режиме (скоростном, рис. 4,в) подвод кислорода осуществляется быстро, быстрое окисление приводит к крутому краю реза и, соответственно, к узкой зоне термического влияния. В этом режиме процесс идет намного быстрее, но сопровождается большим выгоранием металла в зоне реза.

По результатам расчетов, помимо максимальной температуры, можно получить и другие характеристики. Например, для оценки степени изменения свойств металла в окрестности кромки реза полезной является ширина зоны термического влияния, которую можно определить по температуре, ниже которой

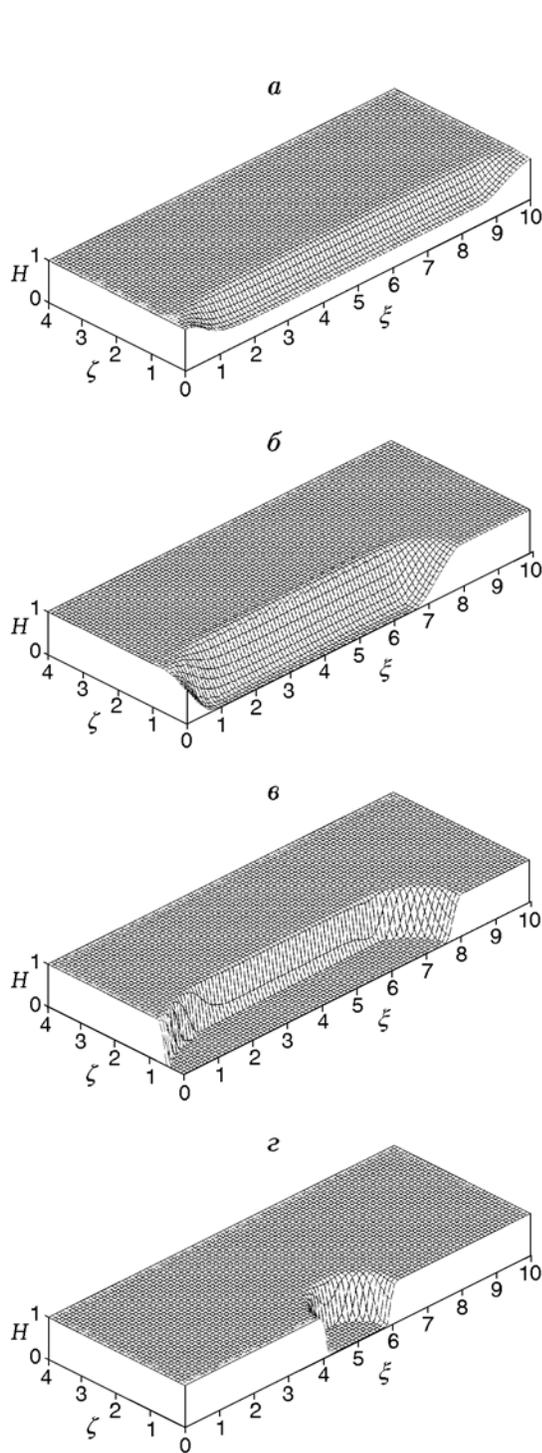


Рис. 4. Изменение формы края реза вдоль линии движения источника тепла при поверхностной (а), разделительной (б, в) и копьевой (з) кислородной резке:

$\omega = 0.5$, кроме рис. 4,в, где $\omega = 0$; $\gamma = 2$, кроме рис. 4,в, где $\gamma = 0.6$; $\beta = 0.05$, $\sigma = 0.7$, $\delta = 15$

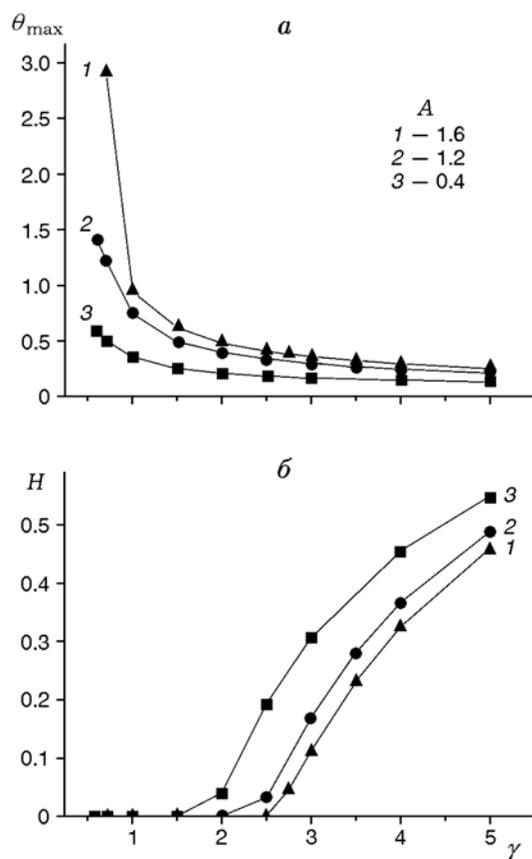


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры (а) и глубины реза (б) в стационарном режиме кислородной резки от параметра γ при различных значениях параметра A ($Nu = 0.2$, $B = 0.1$, $\beta = 0.05$, $\sigma = 0.7$, $\delta = 15$, $\omega = 0.5$)

не видно изменений в структуре. В модели эта температура может быть задана явно и являться свойством материала. Другой характеристикой будет ширина канавки при поверхностной резке или ширина реза при разделительной резке.

Каждый из выделенных режимов можно характеризовать зависимостями максимальной температуры, глубины реза, ширины зоны термического влияния от физических параметров модели и от параметров, характеризующих особенности технологии. Примеры таких зависимостей даны на рис. 5. Естественно, в скоростном режиме ($\gamma > 1$) стационарная температура выше, чем в медленном режиме (рис. 5,а), при любой мощности химического тепловыделения. Чем выше температура, тем глубже разделительная канавка (рис. 5,б). По кривым $H(\gamma)$ можно выделить критическое значение параметра γ , зависящее от режима

гетерогенной реакции окисления, при котором происходит переход от разделительной резки к поверхностной.

Все предыдущие результаты получены при анализе полной задачи. Если теплотери по закону Стефана — Больцмана не принимать во внимание [15], характер изолиний температуры и ее значения будут иными. Без учета теплотери при остальных неизменных параметрах к моменту времени $\tau_4 = 15$ стационарный режим установиться не успеваеет. Максимальная температура в окрестности движущегося источника значительно превосходит температуру вдали от зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена кинетическая модель процесса кислородной резки металлов, позволяющая описывать известные режимы формирования края реза. Установлено, что неоднородный характер поля температуры в зоне реза, наблюдаемый экспериментально, имеет химическую природу и связан с уменьшением толщины разрезаемой детали. При формулировке подобных задач можно говорить о начале процесса резки как о времени зажигания подвижным источником тепла, а также о критических параметрах, обеспечивающих начало процесса и переход от одного режима к другому, что представляет интерес с практической точки зрения. Дальнейшее развитие модели может быть связано с учетом плавления, явным моделированием изменения фазовой структуры края реза, а также с учетом детальной кинетики химических реакций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kai Chen, Lawrence Yao Y.** Interactive effects of reactivity and melt flow in laser machining // High Temp. Mater. Proces. — 2000. — N 4. — P. 227–252.
2. **Moarrefzadeh A.** Numerical simulation of workpiece thermal profile in plasma arc cutting (PAC) process // WSEAS Trans. Appl. Theor. Mech. — 2011. — V. 6, iss. 4.
3. **Ardelean F. A.** Study regarding modern cutting technologies // Nonconvent. Technol. Rev. — 2011. — N 1.
4. **Амосов А. П., Боровинская И. П., Мержанов А. Г.** Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов. — М.: Машиностроение-1, 2007.
5. **Антонов И. А.** Газопламенная обработка металлов. — М.: Машиностроение, 1976.
6. **Соколов И. И.** Газовая сварка и резка металлов: учебник. — М.: Высш. шк., 1978. — (Профтехобразование. Сварка. Резка).
7. **Петров Г. Л., Буров Н. Г.** Технология и оборудование газопламенной обработки металлов. — Л.: Машиностроение, 1970.
8. **Bo Zhou, Yu-jun Liu, Soon-Keat Tan.** Efficient simulation of oxygen cutting using a composite heat source model // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 2013. — V. 57, iss. 1. — P. 304–411.
9. **Kaijin Huang, Dawen Zeng, Changsheng Xie, Desheng Xu.** Numerical simulation of three-dimensional (3D) unsteady state temperature field in circumferential laser oxygen cutting of pipes // J. Mater. Sci. Technol. — 2003. — V. 19, suppl. 1. — P. 147–150.
10. **Kai Chen, Lawrence Yao Y., Vijay Modi.** Numerical simulation of oxidation effects in the laser cutting process // Intern. J. Adv. Manuf. Technol. — 1999. — V. 15. — P. 835–842.
11. **Ermolaev G. V., Kovalev O. B.** Simulation of surface profile formation in oxygen laser cutting of mild steel due to combustion cycles // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2009. — V. 42. — P. 1–10.
12. **Ковалев О. Б., Оришич А. М., Фомин В. М., Шулятьев В. Б.** Сопряженные задачи механики сплошных сред в процессах газолазерной резки металлов // ПМТФ. — 2001. — Т. 42, № 6. — С. 106–116.
13. **Киль И. Е., Князева А. Г.** Тепловая модель процесса кислородной резки металлической пластины // Механика летательных аппаратов: тр. Всерос. конф. молодых ученых, ФТФ, ТГУ, апрель 2002. — Томск: Изд-во ТГУ, 2002. — С. 32–34.
14. **Киль И. Е., Князева А. Г.** Численное исследование тепловой модели процесса кислородной резки металлической пластины / Моделирование процессов в синергетических системах: тр. междунар. конф. «Байкальские чтения по моделированию процессов в синергетических системах», Максимиха, оз. Байкал, 18–23 июля 2002, Улан-Удэ. — Томск: Изд-во ТГУ, 2002. — С. 45–478.
15. **Анисимова М. А., Князева А. Г.** Влияние химического источника тепла на распределение температуры в процессе кислородной резки металлов // Перспективные материалы в технике и строительстве (ПМТС-2013): материалы Первой Всерос. науч. конф. молодых ученых с междунар. участием, 21–25 октября 2013 г., Томск, Россия. — С. 166–168.
16. **Франк-Каменецкий Д. А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987.
17. **Виллюнов В. Н.** Теория зажигания конденсированных веществ. — Новосибирск: Наука, 1984.
18. **Коротких А. Г.** Теплопроводность материалов: учеб. пособие. — Томск: Изд-во ТПУ, 2011.

19. **Jurasz Z., Adamaszek K.** Influence of alloy elements on activation energies of valve steels oxidized at high-temperatures // METAL 2005. — http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_05/papers/17.pdf.
20. **Крейт Ф., Блэк У.** Основы теплопередачи. — М.: Мир, 1983.
21. **Михеев М. А., Михеева И. М.** Основы теплопередачи. — Изд. 2-е, стереотип. — М.: Энергия, 1977.
22. **Справочник** молодого газосварщика и газорезчика: справ. пособие для ПТУ / Н. И. Никифоров, С. П. Нещумова, И. А. Антонов. — М.: Высш. шк., 1990.
23. **Рыкалин Н. Н.** Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1951.

*Поступила в редакцию 3/IX 2014 г.,
в окончательном варианте — 19/V 2015 г.*
