

УДК 621.373.826

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРОНТА ПЛАВЛЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПЛЕНКИ РАСПЛАВА ПРИ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛОВ

О. Б. Ковалев, А. М. Оришич, А. П. Петров, В. М. Фомин,
П. В. Юдин, А. Н. Малов, Г. В. Ермолаев

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Проведены исследования продуктов лазерной резки металлов на автоматизированном лазерном технологическом комплексе. Представлены результаты модельных экспериментов, в которых вместо металла, переходящего в расплав, использовался легкоплавкий парафин, заполнявший узкую плоскую щель между двумя стеклянными пластинами и удаляемый с помощью струи нагретого воздуха. В предположении аналогии между физическими процессами плавления, разрушения и уноса газовой струей пленки жидкого парафина и процессами распыления расплава металла внутри реза в натуральных экспериментах получена оценка характерных размеров капель, образующихся при этом. Результаты моделирования качественно согласуются с результатами натуральных экспериментов. Показано, что качество лазерной резки металлов непосредственно зависит от характера распыления жидкого расплава и процесса его удаления.

Ключевые слова: лазерная резка, металл, плавление, струя газа, движение жидкой пленки, разрушение жидкости, шероховатость, грат, моделирование.

Введение. Современные СО₂-лазеры широко используются при лазерной обработке материалов (сверлении, сварке, резке). Технические достижения в этой области до сих пор ограничены и применимы только для изделий небольшой толщины из некоторых видов черных металлов (малоуглеродистой, нержавеющей и электротехнической сталей). Характер взаимодействия лазерного излучения с металлами зависит от его мощности, поглощательной и отражательной способностей металлов, а также от их теплофизических свойств. Считается, что поглощение световой энергии в металле осуществляется в тонком поверхностном слое электронами, которые передают свою энергию решетке при столкновениях, в результате чего металл нагревается.

Газолазерная резка осуществляется посредством локального плавления металла и удаления расплава газовой струей. Лазерная резка может осуществляться при непосредственном испарении материала [1]. Однако в этом случае требуется лазер с высокой плотностью мощности падающего излучения (более 10^{10} Вт/м²) и небольшим поддувом, чтобы обеспечить удаление паров металла. Известно, что для железа теплота плавления $H_m = 277$ кДж/кг, что намного меньше теплоты испарения $H_b = 6340$ кДж/кг. Поэтому более экономичным способом, не требующим высокой мощности лазера, является газолазерная резка, при которой металл локально, в пределах пятна сфокусированного излучения, нагревается до температуры плавления и уносится с помощью интенсивного поддува газовой струей.

В [1, 2] представлены основные аспекты газолазерной резки материалов, изложены существующие представления о структуре лазерного луча, характере его взаимодействия с поверхностью и механизме резки. Приведены сравнительные характеристики существующих технологий лазерной резки с использованием СО₂-лазеров, Nd:YAG-лазеров и экс-

мерных лазеров. Описаны критерии, характеризующие качество резки различными лазерными системами. Обсуждаются вопросы диагностики, оптимизации и контроля качества. В [3] представлена физическая модель удаления расплава из разреза газовым потоком и образования регулярной шероховатости. В [3, 4] приведены количественные оценки дефектов реза (шероховатости и грата), а также результаты экспериментальных исследований образцов резки электротехнической стали. Качество лазерной резки характеризуется шириной реза, отклонением от перпендикулярности боковых поверхностей реза к плоскости листа, величиной шероховатости поверхности и отсутствием или наличием грата (затвердевших капель расплава на нижней кромке разреза). В [5] проведен анализ физических процессов, которые имеют место при газолазерной резке металлов, и сформулированы проблемы их математического моделирования. Отмечается, что газолазерная резка металлов включает большое количество взаимосвязанных физических процессов: сверхзвуковое канально-щелевое течение газа; неустойчивое течение жидкой пленки расплава с образованием волн на поверхности жидкости, которые обусловлены силовым воздействием газа; теплоперенос за счет теплопроводности в твердом металле с пространственной подвижной границей; образование грата и полос шероховатости на боковых поверхностях.

Описание процессов осложнено необходимостью учета большого количества физических параметров (теплофизических свойств материала, параметров газовой струи, скорости резки, толщины пластины и параметров излучения). Скорость резки, параметры струи и излучения необходимо выбирать для того, чтобы обеспечить оптимальность и качество резки. В [5] предложен приближенный подход, в котором общая постановка задачи формулируется математически в виде сопряженных подзадач механики сплошных сред с подвижными границами. При определенных упрощающих предположениях удается получить решение этих подзадач в аналитическом виде. В результате получена оценка толщины пленки жидкого расплава и динамики ее нарастания по глубине реза в зависимости от скорости резки. Одной из причин образования грата и регулярной шероховатости на боковых поверхностях является нестационарное движение пленки расплава. В настоящее время существуют только гипотетические представления о характере движения пленки расплава внутри реза под действием газовой струи. В данной работе предпринята попытка экспериментального изучения взаимодействия струи газа с жидкой пленкой расплава внутри узкого канала.

Результаты натуральных экспериментов. Для получения экспериментальных данных по качеству реза и размерам частиц, образующихся в продуктах газолазерной резки, проводились исследования на автоматизированном лазерном технологическом комплексе с мощностью лазера до 5 кВт. Излучение, близкое к ТЕМ₀₀-моду, фокусировалось линзой с фокусным расстоянием $F = 190$ мм на поверхность разрезаемого материала. Диаметр пятна излучения в каустике линзы составлял порядка 150–200 мкм. На рис. 1 приведена фотография грата, появляющегося при изменении режима движения реза вблизи угла, где происходит торможение и уменьшение скорости. На рис. 2 показаны типичные “штрихи” (регулярная шероховатость), возникающие на поверхности реза.

Как показывают опыты, при газолазерной резке стальных листов толщиной $h \geq 5$ мм удаление расплава сопровождается ярким свечением расплавленных мельчайших частиц в двухфазной газовой струе, истекающей из образующегося разреза. Если двухфазная струя содержит мелкие частицы конденсированной фазы, то качество реза получается удовлетворительным. Если же частицы крупные и характер истечения пульсирующий с периодическим выбросом крупных капель или сгустков расплава, то качество реза плохое (наличие грата, полос шероховатости и т. п.). Таким образом, качество реза непосредственно зависит от характера распыления расплава и процесса его удаления. На рис. 3 представлены фотографии частиц конденсированной фазы, отображенных в двухфазной струе, а на



Рис. 1. Образование грата на тыльной стороне реза при газолазерной резке листа из электротехнической стали (толщина листа $h = 0,5$ мм, мощность лазера $W = 800$ Вт, скорость резки $U = 9$ м/мин, давление $p = 0,6$ МПа, рабочий газ — азот)

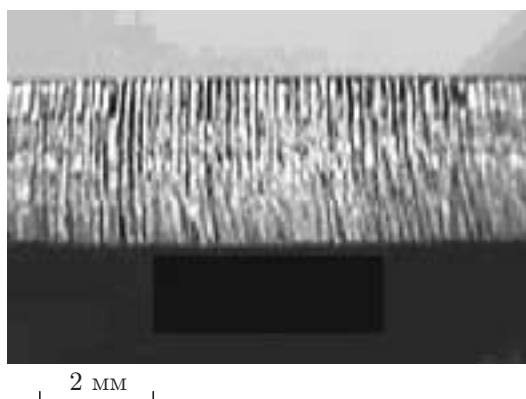


Рис. 2. Полосы шероховатости на боковой кромке реза при газолазерной резке листа из малоуглеродистой стали ($h = 4$ мм, $W = 900$ Вт, $U = 1,7$ м/мин, рабочий газ — кислород)

рис. 4 — распределения частиц по размерам. Видно, что почти все частицы имеют сферическую форму, при этом их размеры уменьшаются с понижением скорости резки и мощности излучения. Большинство частиц имеют размеры порядка 80–150 мкм, что значительно меньше (иногда в несколько раз) ширины реза.

Результаты модельных экспериментов. Локальность действия излучения, высокие термические нагрузки в сочетании с малой шириной реза создают большие трудности при визуализации процессов образования и удаления расплава из разреза в натуральных экспериментах по газолазерной резке металлов. Для исследования взаимодействия газовой струи с расплавом в узком канале проведены специальные эксперименты на модельной установке, блок-схема которой приведена на рис. 5. Воздух из баллона через электрический подогреватель подавался в сопловой узел, подобный газолазерному резаку. Струя воздуха истекала из конфузторного сопла, установленного непосредственно над щелью шириной 1 мм между двумя протяженными стеклянными пластинами, заполненной застывшим парафином. С помощью механизма перемещения МП-100 модель перемещалась с некоторой скоростью, при этом положение сопла над щелью не менялось. Роль жидкого металла выполнял парафин, который плавился при взаимодействии со струей воздуха, нагретой до температуры выше 100 °С, и выдувался из щели. Этот процесс регистрировался видеока-

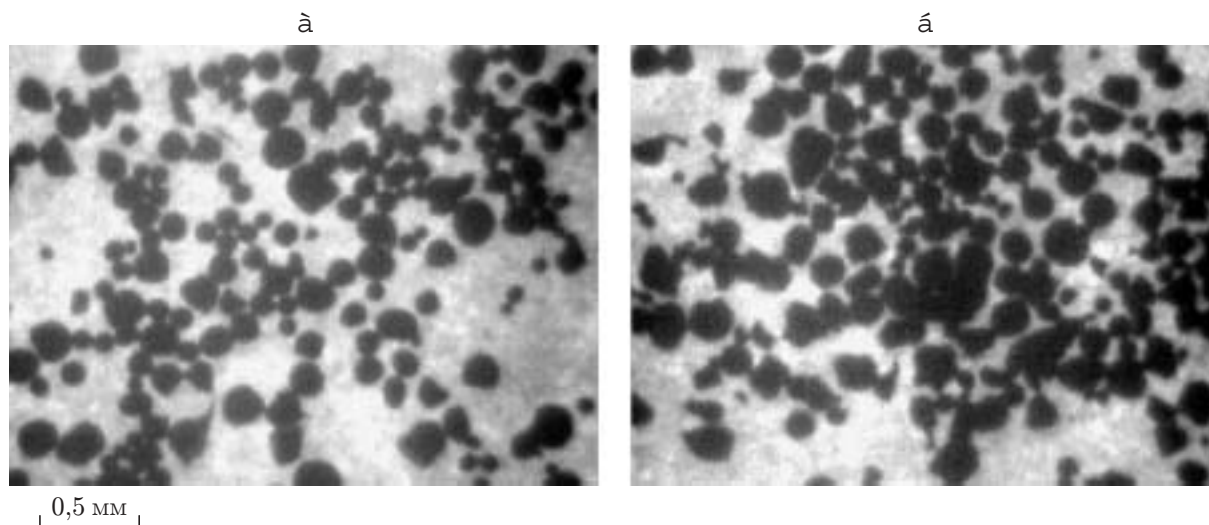


Рис. 3. Частицы конденсированной фазы, выносимые из разреза двухфазной струей, в натурном эксперименте с использованием лазерного технологического комплекса при газолазерной резке листа из нержавеющей стали ($h = 2$ мм, $p = 0,8$ МПа, $W = 2,5$ кВт):
 а — $U = 3$ м/мин; б — $U = 4$ м/мин

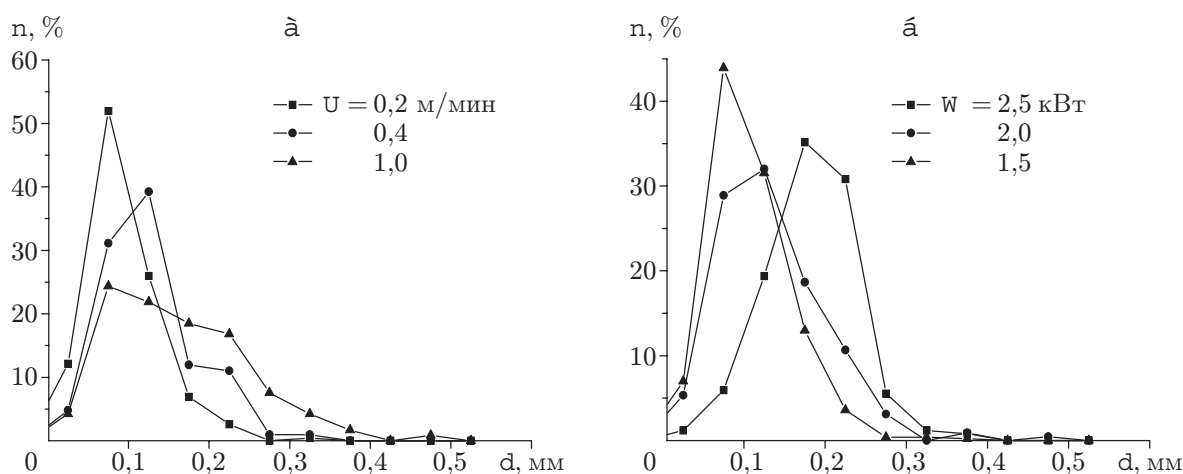


Рис. 4. Распределения частиц конденсированной фазы по размерам при различных условиях резки:
 а — $h = 3$ мм, $W = 2,5$ кВт, $p = 1,1$ МПа; б — $h = 2$ мм, $U = 3$ м/мин, $p = 0,8$ МПа

мерой, а видеосигнал записывался в память персонального компьютера. Съёмка велась в отраженном свете от импульсной лампы ИШ-5, работающей от блока питания с частотой съёмки. Моменты вспышек определялись кадровыми синхроимпульсами, выделенными из видеосигнала блоком синхронизации.

Согласно [6] парафин — кристаллическое вещество, представляющее собой смесь предельных углеводородов с температурой плавления порядка 50 °С. В табл. 1 представлены теплофизические свойства парафина [6] и нержавеющей стали [7]. Картина плавления парафина зависит от скорости перемещения модели и параметров горячей воздушной струи. На рис. 6–8 приведены кинокадры, сделанные с интервалом $0,125$ с, показывающие динамику фронта плавления парафина в различных условиях, а также особенности течения

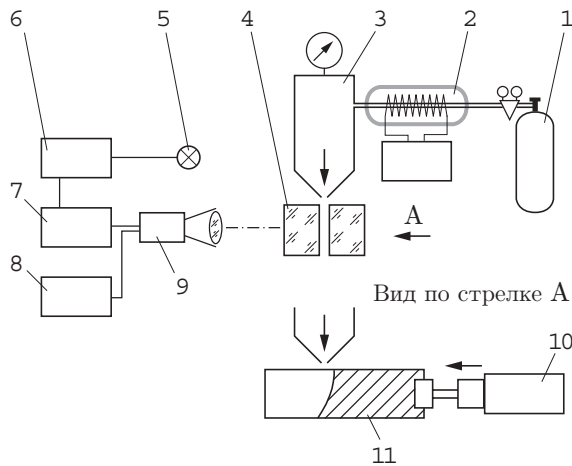


Рис. 5. Блок-схема модельной установки: 1 — баллон сжатого воздуха; 2 — электрический подогреватель; 3 — модель соплового узла лазерного резака; 4 — стеклянная пластина; 5 — импульсная лампа ИШ-5; 6 — блок питания лампы; 7 — блок синхронизации; 8 — компьютер; 9 — видеокамера; 10 — привод подвижки МП-100; 11 — парафин

Таблица 1

Параметр	Материал	
	Парафин [6]	Нержавеющая сталь AISI 304 [6, 7]
ρ_s , кг/м ³	900	6900 (1397 °C); 6610 (1727 °C)
c_p , кДж/(кг · К)	1,58 (–20 ÷ 3 °C); 2,98 (60 °C)	0,477 (17 °C); 0,707 (1397 °C); 0,810 (1457 °C)
λ_s , Вт/(м · К)	0,123 (30 °C)	31,5
$\mu \cdot 10^3$, Н/(с · м ²)	4,0 (40 °C); 2,6 (60 °C); 1,8 (80 °C); 1,4 (100 °C); 1,09 (150 °C)	2,8 (1397 °C)
σ , Н/м	0,0404	1,87*; 0,9**
T_l , °C	54	1397
H_l , кДж/кг	147	272
k_l , м ² /с	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$5,68 \cdot 10^{-6}$

Примечание. В скобках указана температура, при которой определено приведенное значение параметра материала.

* Значение σ в вакууме.

** Значение σ в воздухе.

и разрушения пленки расплава. Когда давление воздуха в сопловой камере небольшое (порядка 0,3 МПа), течение пленки расплава сопровождается образованием волн на поверхности жидкости (рис. 6). С увеличением давления до 0,5 МПа на фронте плавления возникает уступ и происходит срыв жидкости с образованием одиночных капель (рис. 7). При дальнейшем росте давления (до 0,7 МПа) наблюдается увеличение уступа, смещенного к выходу реза, и разрушение пленки жидкого парафина в режиме распыления в виде широкой полосы (рис. 8).

Модели разрушения жидкой пленки и образования капель. В [3, 4] предполагается, что расплав образуется под действием перемещающегося лазерного луча и течет на фронте реза в виде тонкой пленки, увлекаемой газовым потоком. При этом регулярная структура шероховатости формируется за счет периодического срыва потоком газа капель расплава с верхней кромки фронта реза. Эти капли, первоначально удерживаемые капиллярными силами, срываются под действием градиента давления на входе в рез и скатываются вниз по тонкой пленке расплава. Для оценки размеров образующихся капель

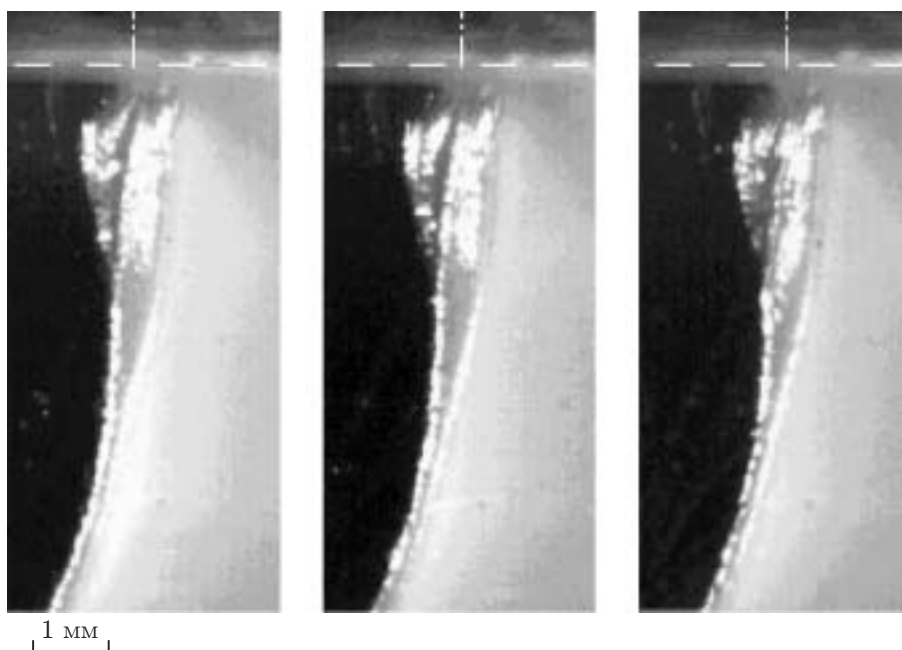


Рис. 6. Кадры киносъемки с интервалом 0,125 с начальной стадии плавления парафина с образованием волн на поверхности тонкой пленки расплава, стекающей под действием горячего воздуха:
 светлая область — твердый парафин, темная — полость, занятая воздушной струей;
 штрихпунктирная линия — положение оси сопла, штриховая — верхняя граница стеклянных пластин

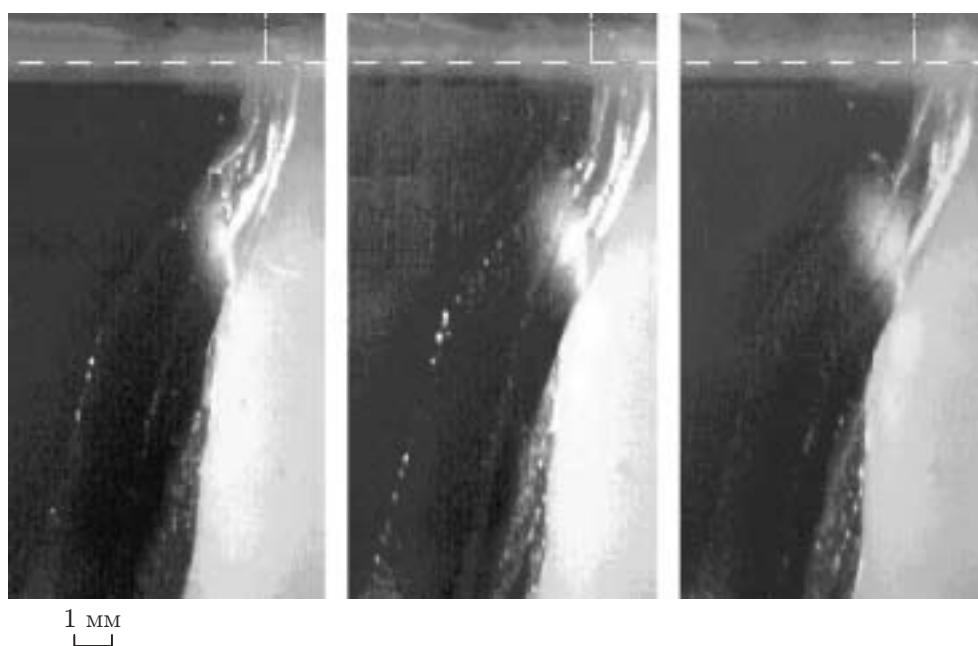


Рис. 7. Кадры киносъемки процесса разрушения пленки жидкого парафина и образования капель (интервал между кадрами и обозначения те же, что на рис. 6)

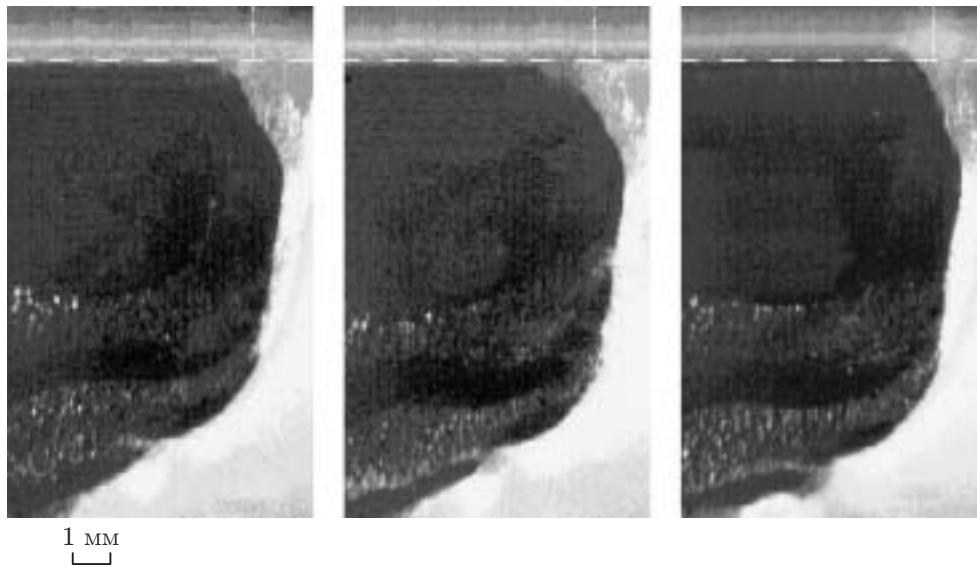


Рис. 8. Кадры киносъемки процесса разрушения пленки жидкого парафина в режиме распыления (интервал между кадрами и обозначения те же, что на рис. 6)

в [3] предложена формула

$$d = 2(\sigma d_b(1 - M^2)/(p\gamma M^2))^{1/2}, \quad M < 1. \quad (1)$$

Здесь d — диаметр капли; σ — поверхностное натяжение жидкого расплава; d_b — диаметр луча; M — число Маха в газе; p — давление газа; γ — показатель адиабаты. В модели [3] не предполагается, что разрушение жидкого расплава и образование капель могут происходить внутри реза. Экспериментальная проверка формулы (1) не проводилась.

Проблема распыления жидких пленок газовой струей и предсказания размеров капель, срывающихся с поверхности пленки, до сих пор остается актуальной, чрезвычайно сложной и не поддающейся строгому описанию. Исследованию устойчивости течения и разрушения жидких пленок посвящено большое количество работ (см. [8, 9] и библиографию к ним).

Характеристики течения пленок и процесса их разрушения зависят от многих параметров. Внутренними причинами неустойчивости являются различного рода начальные возмущения, вызывающие появление волн на поверхности. Такие волны принято называть капиллярными [10]. Внешние причины неустойчивости обусловлены воздействием на поверхность пленки аэродинамических сил, величина которых зависит от скорости движения пленки, плотности и скорости сопутствующего потока газа. Такие волны называют волнами ускорения [11]. Аэродинамические силы стремятся деформировать и разорвать пленку, а вязкость жидкости препятствует этому. Метод малых возмущений, широко используемый в механике при решении задач об устойчивости движения пленок жидкости [9, 12, 13], не позволяет достоверно оценить размеры образующихся капель. При исследовании дробления жидкости в потоке газа часто используют критерий Вебера $We = \rho_g(V_g - V_p)d/\sigma$, где ρ_g , V_g — плотность и скорость газа; σ — поверхностное натяжение жидкости; V_p , d — скорость и диаметр капли.

В [14] на основе работы [15] для оценки размера капель в отсутствие скачков уплотнения при распылении жидкостей в пневматических форсунках получена формула

$$d = \chi \left(\frac{1}{V_g} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l}} \right)^{1,2} L^{0,4} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0,2}, \quad (2)$$

где d — диаметр, мкм; χ — безразмерный эмпирический коэффициент, значение которого в [16] полагалось равным 12; V_g — скорость воздуха, м/с; σ — поверхностное натяжение, Н/м; ρ_l — плотность жидкости, кг/м³; ρ_g — плотность газа, кг/м³; L — максимально возможный масштаб турбулентных пульсаций, равный ширине или диаметру узкого сечения газового канала, м. В [16] отмечается, что результаты экспериментов по дроблению жидкостей распылительными форсунками не согласуются с расчетом по критерию Вебера.

Согласно [17] формула (2) позволяет оценить средний по Заутеру диаметр капель, сорванных с поверхности жидкой пленки, обдуваемой спутным потоком газа. Эксперименты [17] проводились при давлении, близком к атмосферному, на установке, представляющей собой горизонтальную пластину, обдуваемую струей воздуха параллельно ее поверхности, при трех значениях скорости струи: $V_g = 30, 42, 62$ м/с. Вода подавалась на пластину из плоской щели шириной 0,5 мм. Средний по Заутеру диаметр капли определялся по формуле $d = \sum n_i d_i^3 / \sum n_i d_i^2$, где d_i — текущий диаметр капли; n_i — число капель диаметра d_i . В [17] показано, что экспериментальные значения d хорошо согласуются с рассчитанными по формуле (2), при этом значение коэффициента χ полагалось равным 8,5.

Рассмотрим подробнее два возможных режима разрушения жидкой пленки в узком канале реза на основе представленных на рис. 6–8 кадров кино съемки. Первый режим имеет место, когда на поверхности жидкости появляются волны, амплитуда которых сравнима с толщиной пленки (см. рис. 6). До тех пор пока поверхность фазового перехода твердое тело — жидкость остается гладкой, пленка не разрушается. Разрушение наблюдается, когда на твердой поверхности появляются неоднородности в виде выступов или уступов. Пленка срывается с выступа в виде струи и мгновенно распадается на капли примерно одинакового размера, которые движутся друг за другом по одной траектории, увлекаемые газовым потоком (см. рис. 7). Второй режим реализуется, когда при повышении давления увеличивается силовое воздействие газа. В этом режиме с поверхности жидкости срываются капли различных размеров, и разрушение пленки протекает в режиме распыла (см. рис. 8).

Будем полагать, что разрушение пленки и образование капель происходят вследствие появления волн на поверхности жидкости. Рассмотрим волны ускорения [11], обусловленные силами аэродинамического сопротивления. При этом влияние капиллярных волн (возникающих за счет поверхностного натяжения) не учитывается, поскольку их вклад в энергию незначителен по сравнению с волнами ускорения. Считается, что амплитуда волн на поверхности пленки к моменту срыва сравнима с толщиной пленки. Образование капель сферической формы примерно одинакового размера, двигающихся по одной траектории (см. рис. 3), происходит в момент срыва пленки, так что объем каждой капли составляет половину объема тела, полученного при вращении косинусоиды волны вокруг

оси, проходящей через ее минимумы. Объем $v = \pi \int_{-\lambda/2}^{\lambda/2} y^2 dx = 0,5\pi\lambda A^2$ ($y = A \cos(\pi x/\lambda)$ —

уравнение косинусоиды; A, λ — амплитуда и длина волны). Если считать, что объем образующихся капель равен половине объема v , то из соотношения $\pi d^3/6 = 0,25\pi\lambda A^2$ легко вычисляется диаметр капель $d = (1,5\lambda A^2)^{1/3}$. Согласно [10] изменение со временем амплитуды волны, которая образуется на поверхности жидкости при наличии постоянно действующей аэродинамической силы, описывается уравнением

$$\frac{dA}{dt} = A \left(\frac{\pi\beta\rho_g(V_g - V_l)^2}{\lambda\rho_l V_l} - \frac{8\pi^2\mu_l}{\rho_l\lambda^2} \right),$$

где $0 < \beta \leq 1$ — параметр парусности; V_l, μ_l — скорость и вязкость жидкости; t —

Таблица 2

Формула	Значения параметров	d , мкм
$d = 2 \left(\frac{\sigma d_b (1 - M^2)}{p \gamma M^2} \right)^{1/2}$	$\sigma = 0,95$ Н/м, $d_b = 700$ мкм, $M = 0,54$, $p = 0,88$ МПа, $\gamma = 1,4$	62,6
$d = \chi \left(\frac{1}{V_g} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l}} \right)^{1,2} L^{0,4} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0,2}$	$\chi = 8,5$, $V_g = 187$ м/с, $\sigma = 0,95$ Н/м, $\rho_l = 6610$ кг/м ³ , $L = d_b = 700$ мкм, $\rho_g = 10,6$ кг/м ³	15,6
$d = \left(\frac{12\pi k_1^2}{\beta} \frac{\mu_l V_l h^2}{\rho_g (V_g - V_l)^2} \right)^{1/3}$	$\beta = 0,5$, $k_1 = 1,8$, $\mu_l = 2,8 \cdot 10^{-3}$ Н/(с · м ²), $V_l = 60$ м/с, $V_g = 187$ м/с, $\rho_g = 10,6$ кг/м ³ , $h = 60$ мкм	107,0

время. Критическое значение длины волны λ_{cr} наиболее быстро растущего возмущения определим из условия $dA/dt = 0$. В результате получим $\lambda_{cr} = 8\pi\mu_l V_l / (\beta\rho_g(V_g - V_l)^2)$. Амплитуда волны A должна быть связана с толщиной пленки. Если предположить, что $A = k_1 h$ (h — средняя толщина пленки расплава; $1 < k_1 < 2$ — параметр), то для диаметра образующихся капель получим формулу

$$d = \left(\frac{12\pi k_1^2}{\beta} \frac{\mu_l V_l h^2}{\rho_g (V_g - V_l)^2} \right)^{1/3}. \quad (3)$$

Результаты расчетов. Результаты расчетов по формулам (1)–(3) приведены в табл. 2. Следует отметить, что формулы (1)–(3) различаются не только по структуре, но и по физическим параметрам, входящим в них.

Характерный диаметр одиночных капель, которые образуются в верхней части фронта реза и затем скатываются по пленке расплава, определяется по формуле (1). В (1) не учитываются мощность излучения и свойства расплава металла. Полученное значение $d = 62,6$ мкм отличается от средних размеров капель в натуральных экспериментах (см. рис. 3).

Эмпирическая формула (2) дает оценку размеров капель, срывающихся с самой пленки (с гребней волн), поэтому значения диаметра капель очень малы ($d = 15,6$ мкм). Формулу (2) можно использовать при расчете среднего диаметра капель, образующихся в режиме распыления пленки.

Наконец, в формуле (3) учтено достаточно много факторов, главными из которых являются параметры газа (ρ_g, V_g), жидкости (μ_l), и, что особенно важно, косвенно учтены параметры излучения и скорость резки, от которых зависят скорость V_l и толщина h жидкой пленки. Значение $d = 107$ мкм удовлетворительно согласуется с результатами натуральных экспериментов. Формулу (3) предлагается использовать для оценки разрушения пленки в режиме одиночных частиц.

Для расчета плотности и скорости газа в щели, а также скорости движения жидкой пленки и ее толщины использовался метод [5].

Обоснование модельных экспериментов. Газолазерная резка металлов представляет собой совокупность сложных взаимосвязанных физических процессов, поэтому исследовать этот процесс в целом в настоящее время не представляется возможным.

Целью данной работы являлось изучение в модельном эксперименте взаимодействия струи газа с жидким расплавом материала внутри узкого канала, геометрически подобного лазерному резу. Для этого предложена схема установки, представленная на рис. 5, при разработке которой учитывались следующие соображения. Требовалось создать условия, при которых возможно взаимодействие трех фаз, когда материал переходит из твердого состояния в жидкое с четко выраженной границей фазового перехода и механически разрушается газовой струей. Геометрические характеристики щелевого разреза, сопла и

параметры газовой струи полностью соответствовали натурной установке. Для визуализации процесса взаимодействия струи с жидкостью внутри разреза использовались стеклянные стенки. Как известно, под действием лазерного луча стекло разрушается. Однако если металл заменить легкоплавким парафином, то тепловую нагрузку на систему можно снизить, подавая тепло для плавления парафина с помощью горячей струи воздуха. При этом следует учитывать, что струя не только проникает в щель, но и взаимодействует со стеклом. Однако низкая теплопроводность стекла и парафина в некоторой степени локализует подвод тепла аналогично лазерному лучу. Физические характеристики парафина значительно отличаются от характеристик металла практически по всем показателям (см. табл. 1), поэтому невозможно достичь полного подобия процессов в парафине и металле. Однако можно предполагать, что частичная аналогия все же имеет место. В [5] представлены результаты математического моделирования газолазерной резки металлов. Уравнения, записанные в безразмерном виде, содержат числа Прандтля, Стефана, Пекле и другие безразмерные комплексы. За счет выбора скорости и ширины реза можно получить одинаковые числа Пекле, что обеспечивает почти полное подобие распределений температуры. При этом толщины слоя расплава различаются в 1,5–2 раза. В силу того, что формула (2) содержит отношения параметров σ/ρ_l и ρ_l/ρ_g (причем последнее отношение возводится в малую степень 0,2), расчетные значения d для металла и парафина различаются лишь в три раза при одинаковой скорости и плотности газа. Так, для металла $d = 15,6$ мкм, а для парафина $d = 5,2$ мкм (см. табл. 1).

Замечания и выводы. Экспериментально показано, что качество лазерной резки непосредственно зависит от характера распыления жидкости газовой струей.

Проведена визуализация процессов плавления и образования жидкого расплава материала в узком канале и его удаления газовой струей применительно к газолазерной резке металлов. Показано, что удаление расплава сопровождается разрушением жидкой пленки и образованием капель, размеры которых зависят от свойств жидкости, толщины пленки и параметров газовой струи. Разрушение жидкой пленки происходит внутри реза в режиме образования одиночных частиц при срыве пленки с уступа и режиме распыления на множество мелких капель, которые движутся, увлекаемые газом в ядре потока, и со стенками канала не взаимодействуют.

Предложены аналитические зависимости для расчета и оценки размеров капель. Формулы (2), (3) могут рассматриваться как “точечные”, т. е. выполняющиеся в каждой точке на границе раздела жидкость — газ, что позволяет использовать их при численном моделировании гидрогазодинамических течений в канале разреза.

Дальнейшее развитие изложенного метода моделирования заключается в приближении свойств модельного материала к свойствам металла, что позволит оптимизировать процессы реальной резки металлов.

Авторы выражают признательность В. Б. Шулятьеву за обсуждение результатов и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pawell J.** CO₂-laser cutting. L.: Springer-Verlag, 1993.
2. **Gropp A., Hutfless J., Schubert S., Geiger M.** Laser beam cutting (invited paper) // Optic. Quant. Electron. 1995. V. 27. P. 1257–1271.
3. **Макашов Н. К., Асмолов Е. С., Блинков В. В. и др.** Газогидродинамика резки металлов непрерывным лазерным излучением в инертном газе // Квантовая электрон. 1992. Т. 19, № 9. С. 910–915.

4. **Леденев В. И., Карасев В. А., Якунин В. П.** О связи капиллярных явлений и дефектообразовании при газолазерном разделении металлов // Изв. РАН. Сер. физ. 1999. Т. 63, № 10. С. 2047–2052.
5. **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.
6. **Таблицы физических величин:** Справ. / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
7. **Strömbeck P., Kar A.** Self-focusing and beam attenuation in laser materials processing // J. Phys. D. Appl. Phys. 1998. V. 31. P. 1438–1448.
8. **Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Новиков Б. В. и др.** Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977.
9. **Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрайбер И. Р.** Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1983.
10. **Ламб Г.** Гидродинамика. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1947.
11. **Адельберг М.** Средний размер капель, образующихся при распаде струи жидкости, впрыскиваемой в высокоскоростной газовый поток // Ракет. техника и космонавтика. 1968. Т. 6, № 6. С. 187–193.
12. **Vicanek M., Simon G., Urbassek H. M., Decker I.** Hydrodynamical instability of melt flow in laser cutting // J. Phys. D. Appl. Phys. 1987. V. 20. P. 140–145.
13. **Babchin A. J., Frenkel A. L., Levich V. G., Sivashinsky G. I.** Nonlinear saturation of Rayleigh — Taylor instability in thin films // Phys. Fluids. 1983. V. 26, N 11. P. 3159, 3160.
14. **Левич В. Г.** Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959.
15. **Колмогоров А. Н.** О дроблении капель в турбулентном потоке // Докл. АН СССР. 1949. Т. 66, № 5. С. 825–828.
16. **Яблоник Р. М., Маркович Э. Э.** О структуре формулы для среднего размера капель в пневматической форсунке // Изв. вузов. Энергетика. 1966. № 6. С. 72–74.
17. **Маркович Э. Э., Гугучкин В. В., Васильев Н. И.** Параметры капель, сорванных с жидкой пленки. Черкассы, 1988. Деп. в Краснодар. политехн. ин-те (Отд-нии НИИТЭХИМа) 06.05.87, № 484-ХП-87.

Поступила в редакцию 30/VI 2003 г.
