

8. R. R. Baldwin, R. F. Simmons, R. W. Walker. Trans. Faraday Soc., 1966, **62**, 2486.
9. В. В. Азатян. Канд. дисс., ИХФ АН СССР, 1963.
10. Е. Н. Александров, В. В. Азатян. Докл. АН СССР, 1973, **210**, 1358.
11. В. Н. Кондратьев. Кинетика химических газовых реакций. М., Изд-во АН СССР, 1958, с. 479.
12. Н. М. Эмануэль, Е. Т. Денисов, З. К. Майзус. Цепные реакции окисления углеводородов в жидкой фазе. М., «Наука», 1965.
13. Е. Т. Денисов. Усп. хим., 1973, **42**, 361.
14. В. В. Азатян, В. В. Воеводский, А. Б. Налбандян. Кинетика и катализ, 1961, **2**, 341.
15. Е. Н. Александров. Канд. дисс., ИХФ АН СССР. М., 1974.
16. В. В. Азатян. Арм. хим. журнал, 1967, **20**, 577.
17. S. C. Kuzius, M. Boudart. Comb. Flame, 1968, **12**, 477.
18. В. В. Азатян, С. Б. Филиппов. Докл. АН СССР, 1969, **184**, 625.
19. В. Н. Кондратьев. Константы скорости газозных реакций. М., «Наука», 1970.
20. Von H. G. Wagner, J. Wolfigm. Angew. Chem., 1971, **83**, 561.
21. Н. Н. Семенов. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. М., Изд-во АН СССР, 1958.
22. D. L. Vaulch, D. D. Drgsdale a. o. Evaluated kinetic dataes for high temperature reactions. V. 1, London, 1972.
23. D. J. Cheng, P. L. Blackshear. J. Chem. Phys., 1972, **56**, 213.
24. C. J. Jachimowski, W. M. Houghton. Comb. Flame, 1971, **17**, 25.
25. О. В. Крылов. Катализ неметаллами. Л., «Химия», 1967.
26. В. В. Поповский. Докт. дисс., Томск, 1973.
27. В. В. Азатян, Н. Н. Семенов. Кинетика и катализ, 1972, **13**, 17.
28. В. В. Азатян, Е. Н. Александров, М. С. Хачатрян. ФГВ, 1973, **9**, 456.
29. Е. Н. Александров, А. И. Поройкова и др. Кинетика и катализ, 1973, **14**, 543.
30. В. В. Азатян, С. Б. Филиппов. Сб. «2-ой Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву». Черноголовка — Ереван. 1969, с. 141.
31. В. В. Азатян, М. Г. Нейгауз и др. Кинетика и катализ, 1974, **15**, 6.

УДК 536.46

ГАЗОЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛОВ

*Т. В. Быстрова, Г. И. Козлов, В. А. Кузнецов,
В. И. Лисицин, В. М. Тришкин
(Москва)*

Одно из новых направлений практического применения лазерной техники — газолазерная резка (ГЛР) различных материалов [1—9] — представляет собой совместное воздействие сфокусированного лазерного излучения и газовой струи на материал, приводящее к его плавлению (разрушению) и гидродинамическому удалению из зоны реза.

Отличительная особенность и в то же время преимущество ГЛР перед другими способами (кислородной и плазменной резкой) заключается в том, что при использовании лазера удается сконцентрировать всю мощность лазерного излучения на очень малой площади поверхности материала размером 0,1—0,3 мм и тем самым получить высокие плотности потока энергии порядка 10^6 Вт/см², что позволяет делать очень узкие резы с хорошим качеством кромок и малой зоной термического влияния.

РЕЖИМЫ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

Анализ газолазерной резки металлов показывает, что возможно существование нескольких режимов процесса в зависимости от мощности лазерного излучения, а также от реакционных и теплофизиче-

ских свойств металлов и их окислов. Например, при больших мощностях лазерного излучения вполне возможна чисто лазерная резка металлов. В самом деле, когда мощность поглощаемого поверхностью лазерного излучения будет значительно больше теплотерм из области фокусировки лазерного излучения, то подводимой лазерным лучом энергии к поверхности металла может оказаться достаточно не только для его плавления, но и для испарения. При этом если вблизи поверхности не образуется плазменного облака, экранирующего лазерное излучение, то нет никакой необходимости в использовании газовой струи. Резка в этом случае будет фактически осуществляться за счет испарения металла из области фокусировки лазерного луча. В случае же возникновения ионизованного облака необходимо использовать газовые струи, чтобы не допустить его образования. Но такая ситуация может возникнуть лишь при сравнительно больших мощностях лазерного излучения, превышающих 10 кВт.

При мощностях лазерного излучения порядка 1 кВт область взаимодействия лазерного излучения с некоторыми металлами оказывается только слабо раскаленной, так что температура поверхности в области фокусировки оказывается ниже температуры плавления. Этому, в частности, способствуют и очень высокие значения коэффициентов отражения металлов. В этом случае для осуществления процесса резки необходимо в область фокусировки лазерного луча направить струю окисляющего газа. Подача кислорода в зону раскаленного металла способствует развитию экзотермической реакции горения металла, а выделяющаяся при этом энергия увеличивает температуру в зоне реза, а образующийся в ходе процесса окисления на поверхности реза слой окислов приводит к уменьшению коэффициента отражения и, соответственно, к увеличению доли поглощенной поверхностью энергии лазерного луча. Это ведет к еще большему увеличению температуры поверхности реза. Кроме химического действия, газовая струя выполняет важную гидродинамическую функцию, выдувая расплавленный металл и его окислы из области резки.

Процесс окисления металла и гидродинамика истечения металла и его окислов из области резки определяются агрегатным состоянием образующихся окислов. Если температура плавления окислов выше температуры плавления металла, то возможны режимы, когда жидкая прослойка металла покрывается твердым слоем окислов. Это характерно, например, для сталей с высоким содержанием хрома и никеля, окислы которых имеют температуру плавления около 2000° С.

Приведенный выше анализ процесса резки относится к случаю, когда вклад лазерного излучения и химического источника в энергетику газолазерной резки одного порядка. Однако, если энергия, выделяемая в ходе процесса горения, оказывается достаточной для самоподдерживающегося распространения фронта экзотермической реакции по металлу, процесс резки возможен с помощью струи окисляющего газа и в отсутствие лазерного излучения, при этом лазерный луч нужен только для инициирования процесса резки.

Таким образом, возможны три вида лазерной резки:

1) при больших мощностях лазерного излучения резку можно осуществлять только за счет энергии лазерного луча;

2) при средних мощностях лазерного излучения реализуется режим собственно газолазерной резки, когда существен вклад в энергетику процесса и лазерного излучения и химического источника;

3) возможна также резка за счет экзотермической реакции горения металлов под действием струи реагирующего с металлом газа; лазерное излучение только инициирует процесс.

Вся совокупность сложных физико-химических процессов, протекающих при ГЛР, в настоящее время еще не ясна и полностью не

изучена. Это затрудняет создание полной модели этого процесса. Трудности усугубляются отсутствием надежных экспериментальных данных по кинетике и механизму химических процессов, коэффициентам диффузии различных компонент через слой образующихся окислов, зависимости коэффициентов отражения от температуры и состояния поверхности материала.

Экспериментальному изучению ГЛР посвящены работы [1—4]. Теоретические модели, предложенные в [3, 4], основаны на задании температуры поверхности реза из физических соображений и на экспериментальном определении глубины окисления металла. Такие модели не могут объяснить зависимость скорости резания от расхода в кислородной струе. В [5] показано, что тепловые затраты на прогрев металла от начальной температуры до температуры поверхности реза зависят от положения поверхности реза и его физико-химических свойств. Чтобы жидкий расплав металла и его окислов удалялся потоком газа из зоны реза, на срезе должен существовать слой конечной толщины, перегретый по сравнению с температурой плавления металла и его окисла. Толщина этого слоя и его перегрев определяются воздействием газовой струи на зону разреза.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема установки по исследованию процесса резки представлена на рис. 1. Источником лазерного излучения служил мощный газоразрядный лазер 11, работающий на смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$. Мощность лазерного луча, диаметр которого 50 мм, достигала 980 Вт, а расходимость луча была порядка 10^{-3} рад. Лазерный луч при помощи линзы 6 фокусировался в пятно диаметром 0,5 мм на поверхности разрезаемого образца листового материала 3, который крепился к специальному вращающемуся столу. Скорость вращения образца и, соответственно, скорость резки могла варьироваться как с помощью электродвигателя 1 с редуктором 2, так и путем изменения радиуса, на котором осуществлялась резка. В ходе экспериментов проводился непрерывный контроль за мощностью лазерного луча. Для этого часть энергии лазерного излучения (примерно 8%) отводилась из пучка с помощью плоскопараллельной пластины 7 и линзы 8 и регистрировалась предварительно проградуированным терморadiационным датчиком 10. Непосредственно перед датчиком интенсивность луча дополнительно ослаблялась с помощью обтюратора 9. Фокусирующая лазерный луч линза 6 крепилась в специальной головке 5, имеющей штуцер для подачи рабочего газа и сопло 4 диаметром 0,6 мм, через которое к разрезаемой поверхности подводились коаксиально лазерное излучение и рабочий газ.

Экспериментальное изучение количественных характеристик (максимальной скорости ГЛР и ширины реза) проводилось на различных металлах в зависимости от мощности лазерного луча, толщины разре-

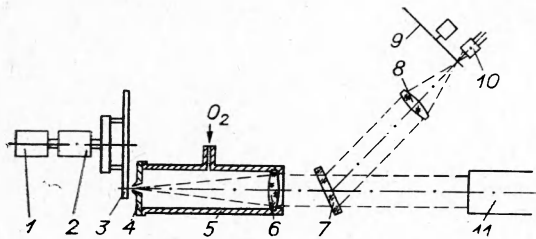
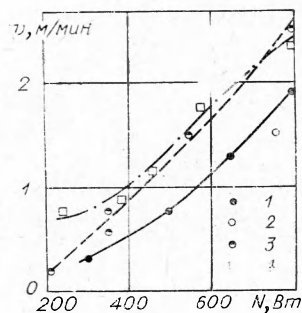


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Рис. 2. Зависимость скорости резки от мощности лазерного излучения.



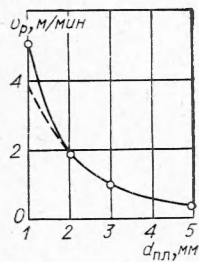


Рис. 3. Зависимость скорости резки от толщины образца.

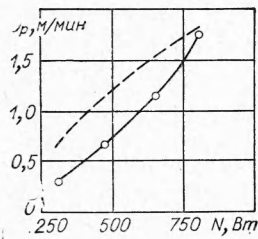


Рис. 4. Зависимости скорости резки от мощности лазерного излучения при расходе кислорода 30 л/мин.

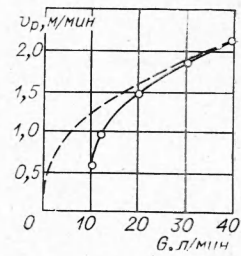


Рис. 5. Зависимость скорости резки от расхода кислорода.

заемых образцов и расхода кислорода. На рис. 2 представлена зависимость скорости резки от мощности лазерного излучения для нержавеющей стали (1X18H9T) при толщине образца 2 мм (1), хромоникельтитанистой стали с медью (ВНС-2) толщиной 1,5 мм (3) и сплава на никелевой основе (ЭИ-602) толщиной 1,0 мм (4). Для хромоникельмолибденовой стали (СН-3) на рисунке 2, 2 приведена одна точка, полученная при мощности лазерного излучения 750 Вт и толщине металла 2,5 мм. Опыт показывает, что для материалов, близких по своим теплофизическим свойствам, скорость резки остается очень близкой при различных условиях.

Экспериментальные зависимости максимальной скорости от определяющих параметров для нержавеющей стали приведены на рис. 3—5 (сплошные линии).

На рис. 3 дана зависимость скорости резки нержавеющей стали от толщины металла для мощности лазерного излучения 800 Вт и расхода кислорода 30 л/мин. Как следует из графика, имеет место сильная зависимость скорости резки от толщины материала, при этом для толщины 1 мм скорость ГЛР достигает ~ 5 м/мин.

Для правильного построения модели газолазерной резки необходимы экспериментальные зависимости максимальной скорости резки от определяющих параметров — мощности лазерного излучения и расхода газовой струи. Зависимость от мощности излучения представлена на рис. 4 для нержавеющей стали толщиной 2 мм при расходе кислорода 30 л/мин. Она оказалась почти линейной и свидетельствует о существенном влиянии мощности лазерного излучения на максимальную скорость газолазерной резки. Казалось бы, при таких условиях скорость газовой струи не должна оказывать сильного влияния на максимальную скорость резки. Однако рис. 5, где приведена зависимость максимальной скорости резки для нержавеющей стали толщиной 2 мм

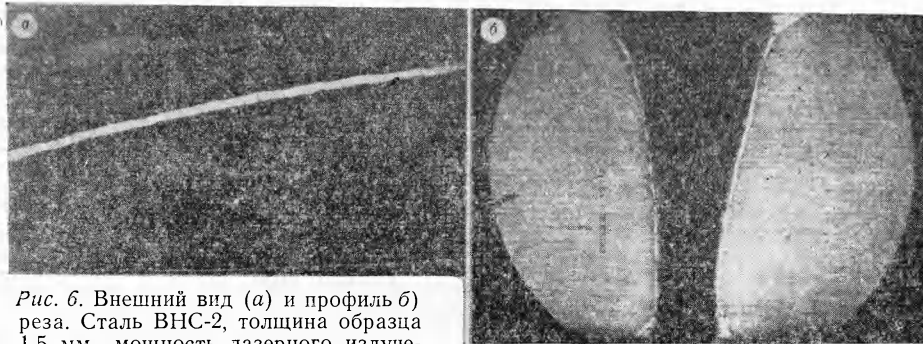


Рис. 6. Внешний вид (а) и профиль (б) реза. Сталь ВНС-2, толщина образца 1,5 мм, мощность лазерного излучения 750 Вт, скорость резки 1,0 м/мин.

и мощности лазерного луча 800 Вт от расхода кислорода, приведенного к нормальным условиям, показывает, что это не так. При малых расходах кислорода металл и продукты реакции не выдуваются, так что для заданных величин мощности лазерного излучения и толщины металла существует минимальное значение расхода кислорода, ниже которого резка на полную толщину невозможна. При дальнейшем увеличении расхода кислорода происходит резкое увеличение максимальной скорости резки. Эти экспериментальные данные указывают на необходимость дополнения тепловых моделей ГЛР [3, 4] зависимостью окисляющего и гидродинамического действия газовой струи от условий, складывающихся в процессе резания.

Что касается качества реза, то следует прежде всего отметить, что профиль реза имеет, как правило, сходящуюся форму. Внешний вид реза для нержавеющей стали представлен на рис. 6, а, а типичный профиль реза на рис. 6, б. Для постоянной толщины металла и мощности лазерного излучения ширина реза значительно уменьшается с увеличением скорости резки, при этом также уменьшается высота выплесков (грата) на передней и задней поверхности металла. На рис. 7 приведена зависимость ширины реза S со стороны входа лазерного луча в рез (кривая B) и со стороны выхода (кривая B') в зависимости от скорости резки.

Было проведено несколько серий экспериментов по лазерной резке титанового сплава ОТ-4 толщиной 6 мм. При мощности лазерного излучения 375 Вт скорость резки составляла 3,6 м/мин. Целью этих экспериментов являлось определение влияния кислородной газолазер-

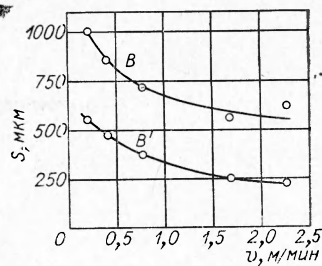


Рис. 7. Зависимость ширины реза от скорости резки. Сталь 1X18H9T, толщина образца 2 мм, мощность лазерного излучения 750 Вт



Рис. 8. Микроструктура края реза. Титановый сплав ОТ-4-1, толщина образца 6 мм, мощность лазерного излучения 375 Вт.

а) пленка окалины и белый альфированный слой; б) зона крупноглычатой структуры α -фазы.

ной резки на микроструктуру титана в зоне термического влияния реза. Были получены фотографии микроструктуры шлифов, сделанные в поперечном сечении по отношению к плотности реза. На краю шлифа (рис. 8) видна тонкая пленка окалины, представляющая собой структуру с высокой концентрацией кислорода, и белый альфированный слой, имеющий зернистое строение. Толщина пленки окалины равна 0,004 мм, альфированного слоя 0,08 мм. Толщина же всей зоны термического влияния, характеризуемого крупногочечатой структурой α -фазы, составляет 0,4 мм.

Таким образом, из приведенного экспериментального материала следует, что газолазерная резка металлов обеспечивает не только высокие скорости резки, но по сравнению с другими методами дает возможность получать резы значительно меньшей ширины при хорошем качестве краев реза, с малой зоной термического влияния.

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ГАЗОЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ И СОПОСТАВЛЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Приближенный анализ термогидродинамической модели газолазерной резки, проведенный в работе [5], показывает, что скорость резания v может быть найдена путем приравнивания толщины жидкого расплава δ , получаемой при раздельном решении тепловой и гидродинамической задачи.

Решение тепловой задачи с источником тепла, сосредоточенным на внешней границе жидкого расплава, приводит к выражению для температуры поверхности реза T_s .

$$T_s - T_* = (T_n - T_*) \exp(v\delta/\kappa), \quad (1)$$

где

$$T_s - T_* = (q + q_x - q_n) / c\rho v, \quad T_* = T_0 - Q_n / c; \quad (2)$$

T_0 , T_n — начальная температура и температура плавления металла; κ — коэффициент температуропроводности; c — теплоемкость; ρ — плотность; Q_n — теплота плавления металла; q — плотность лучистого потока тепла; q_x — плотность потока тепла от химической реакции окисления металла; q_n — плотность потока тепла, характеризующего теплопотери из области реза.

Приближенное решение гидродинамической задачи определения толщины жидкого расплава сводится к выводу уравнения материального баланса, показывающего, что масса металла, перешедшего в расплав, в случае стационарного процесса резания должна быть равна массе расплава, выдуваемого из области реза:

$$v\rho d = u\delta\rho. \quad (3)$$

Здесь d — толщина разрезаемой пластины, u — среднее значение скорости выдуваемого расплава. Величина $u = \tau\delta/2\mu$ (μ — динамическая вязкость жидкого расплава) определяется напряжением трения τ , которое возникает при воздействии газовой струи с поверхностью жидкого расплава и которое можно оценить по формуле Блазиуса [10]

$$\tau = 0,332 (\mu_g \rho_g u_g^3 / d)^{1/2}, \quad (4)$$

где μ_g , ρ_g , u_g — соответственно динамическая вязкость газа в струе, плотность газа и скорость газового потока.

Приравнивая толщину расплава, полученную из выражений (1) и (3) с учетом (2), находим следующее трансцендентное алгебраическое уравнение относительно скорости резания v :

$$(2\mu v^3 d / \kappa^2 \tau)^{1/2} = \ln[(q + q_x - q_n) / c\rho v (T_n - T_*)]. \quad (5)$$

Скорость тепловыделения от химической реакции окисления металла q_x и толщина жидкого расплава δ определяются формулами [5]:

$$q_x = (k\tau\delta\rho_0/\gamma d\mu)^{1/2} \cdot Q, \quad \delta = (2\mu v d/\tau)^{1/2}, \quad (6)$$

где Q — теплота горения металла; γ — отношение массы окисла к массе металла, из которого образовался окисел; ρ_0 — плотность окисла; k — константа, связанная с механизмом окисления металла, которая находилась из сопоставления расчетных и экспериментальных данных по одной экспериментальной точке.

Оценить теплопотери из области реза q_n , среди которых преобладают кондуктивные потери через боковую поверхность зоны прогрева и расплава металла, не представляет трудностей. Заметим, что при увеличении скорости резания уменьшается время контакта разогретой области с холодным металлом, расположенным по обеим сторонам реза, и соответственно уменьшаются тепловые потери в направлении, перпендикулярном направлению резания. Таким образом, газолазерная резка на высоких скоростях повышает коэффициент полезного использования мощности лазерного излучения.

Сопоставление результатов расчета по формуле (5) с экспериментальными данными приведено на рис. 3, 4, 5, где теоретические зависимости представлены штриховыми кривыми. Отметим, прежде всего, качественное согласие основных экспериментальных зависимостей с расчетными.

Остановимся на качественной картине процесса газолазерной резки, следующей из анализа формул (1) — (6).

Увеличение скорости резки при изменении мощности лазерного луча приводит к увеличению потока расплавленного металла через единицу площади поверхности плавления в расплав, поэтому толщина жидкого расплава возрастает ($\delta \sim v^{1/2}$). Рост скорости резки и толщины жидкого расплава приводит к увеличению температуры поверхности реза и, следовательно, затрат тепла на процесс резки. (см. формулу (1)). Но, с другой стороны, с возрастанием толщины жидкого расплава увеличивается скорость стекания окисной пленки, что приводит к уменьшению ее толщины и, следовательно, к увеличению тепловыделения от химической реакции окисления металла ($q_x \sim \delta^{1/2} \sim v^{1/4}$). Это усиливает воздействие мощности лазерного излучения на скорость резки.

Такая качественная картина процесса газолазерной резки соответствует случаю, когда толщина жидкого расплава и тепловыделения от химической реакции зависят от изменяющегося параметра только через скорость резки, а не явно. Если же имеется еще и явная зависимость, как, например, от толщины пластины или расхода газа в струе, то описанные закономерности могут измениться.

Увеличение расхода газа в струе увеличивает напряжение трения, а следовательно, и скорость стекания жидкого расплава. Рост скорости истечения приводит к уменьшению толщины жидкого расплава и толщины окисной пленки, что в свою очередь, снижает затраты тепла на прогрев расплава и увеличивает скорость химической реакции. В результате с увеличением расхода в газовой струе скорость резки монотонно растет.

В заключение рассмотрим влияние толщины обрабатываемого металла на скорость резки. Расчеты показывают, что влияние толщины разрезаемого металла на скорость резки связано с зависимостью от толщины материала, плотности лучистого потока ($q \sim d^{-1}$) и плотности потока тепла от химической реакции окисления металла $q_x \sim d^{-3/4}$. При изменении d от 10^{-1} до $5 \cdot 10^{-1}$ см q и q_x уменьшаются от $15,3 \cdot 10^3$ и $3,8 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^3$ и 10^3 кал/(см²·с) соответственно. Температура поверхности жидкого расплава при этом уменьшается примерно от 2300 до 1600° С.

Такое соотношение между q и q_x , казалось бы, указывает на поправочный вклад тепловыделения от окисления в процесс ГЛР. Однако при оценке роли химических источников необходимо помнить, что поглощение лазерного излучения поверхностью чистого металла в несколько раз меньше, чем у окислов, так что окисляющее воздействие кислородной струи имеет существенное значение.

Проведенное сопоставление расчетных и экспериментальных данных по зависимости скорости резки от определяющих параметров свидетельствует лишь о качественном их согласии. Для дальнейшего развития теории и представлений о модели процесса газолазерной резки необходима постановка специальных экспериментов, направленных на выяснение деталей механизма процесса ГЛР.

Поступила в редакцию
10/VII 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. A. B. Sullivan, P. F. Houldcroft. Brit. Weld. J., 1967, 46, 8.
2. Г. Б. Бубякин, Г. Р. Левинсон и др. Технологическое применение газовых лазеров. Л., ЛНДНТП, 1970.
3. T. Higuchi, T. Migawara a. o. Mitsubishi Denki, 1971, 45, 10.
4. В. П. Бабенко, В. П. Тычинский. Квантовая электроника, 1972, 5 (11).
5. Т. В. Быстрова, В. Б. Либрович, В. И. Лисицин. ФГВ, 1973, 9, 5.
6. Laser cutting machine applied to cutting and areasing form production. Conv. Industry, 1970, June, p. 3.
7. Optics and Laser Technology. 1971, 3, 2.
8. Didgest of technical paper. JEEE. J. Quantum Electronics, 1971, QE — 7, 6.
9. Laser beam being used to cut costs inventories and cloth. Laser Weekly. 1971, 22 March, p. 2.
10. Л. Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. М., 1970.

УДК 662.215.1

ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ВО ФРОНТЕ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

А. П. Ершов, П. И. Зубков, Л. А. Лукьянчиков
(Новосибирск)

Измерение электрических свойств вещества в детонационной волне привлекает все большее внимание исследователей, прежде всего как метод получения информации о структуре этой области, который в принципе может дать хорошее временное и пространственное разрешение. В данной работе рассматривается вопрос об измерении электропроводности. Несмотря на значительное количество исследований в этой области [1—8], в большинстве из них не преодолены трудности, возникающие из-за быстрого изменения измеряемой величины (характерная зона имеет протяженность порядка 1 мм и движется со скоростью 5—8 км/с), которые приводят к большим систематическим ошибкам.

В настоящей работе показано, что известные методы измерения профиля электропроводности не учитывают этих изменений и пригодны