### Исследования и разработки моделей процессов

### с глубоким проникновением лазерного излучения

### в конденсированные среды

Исполнители работ:

А.Ф.Банишев, В.В. Васильцов, М.Г. Галушкин, В.С. Голубев, А.Н.Грезев, Н.В.Грезев,

А.К. Дмитриев, Е.А. Дубровина, В.А. Карасев, А.Г. Коновалов, А.П. Кубышкин, В.И. Леденев,

Ф.Х. Мирзоев, В.Я. Панченко, В.А.Ульянов, Е.В.Филиппова, О.Д.Храмова, В.П. Якунин,

#### АННОТАЦИЯ

В ИПЛИТ РАН выполнен цикл теоретических и экспериментальных исследований процессов с каналированным («кинжальным») проникновением интенсивного излучения CO<sub>2</sub>-лазера (10<sup>4</sup>-10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup>, 0,1÷5 кВт при длительности от 10<sup>-6</sup>с. до непрерывной) в конденсированные среды (твердые и жидкие металлы; органические материалы; биоткани). Работы проводились в связи с проблемой создания фундаментальных физических моделей процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, где особый интерес представляют процессы с каналированием лазерных пучков при их распространении в различных материальных средах. Исследования проводились в интересах оптимизации технологий лазерной лазерной обработки материалов (сварки и резки материалов больших толщин), а также лазерного иссечения биотканей при медицинских процедурах.

Основные приоритетные результаты ИПЛИТ РАН по исследованию механизмов процессов с каналированным проникновением лазерного излучения в конденсированные среды, состоят в следующем.

Проанализированы гидродинамические неустойчивости поверхности расплава разной природы, в диапазоне времен 10<sup>-6</sup>-10<sup>-2</sup> сек, вызываемые высокоинтенсивными потоками энергии от лазерного излучения и газовых струй Эти неустойчивости имеют принципиальное значение для механизмов переноса массы, баланса сил и энергии, сопровождающих процессы каналированного проникновения лазерного излучения в конденсированные среды.

Разработана качественная модель механизмов лазерной сварки при глубоком проплавлении материала с учетом гидродинамических автоколебаний формы жидких стенок канала, вызываемых макронеустойчивостями поверхности стенок, а также релаксационными пульсациями давления паров в канале, возникающими при испарении микрокапель расплава. Построена теоретическая модель неустойчивости формы жидких стенок глубокого парогазового канала при лазерной сварке металлов, учитывающая силы: капиллярную, гравитационную и давление паров расплава. Развита тепло-гидродинамическая теория самоорганизации пространственно-периодических структур рельефа поверхности расплава на стенках парогазовой каверны, образующейся при глубоком проникновении мощного лазерного излучения в конденсированные среды.

Проведены экспериментальные исследования и создана физическая модель лазерного канала в жидкой среде с учетом нестационарных автоколебаний параметров канала в условиях турбулентной конвекции, вызванной движениями канала, а также архимедовой и термокапиллярной сил. Показано, что при образовании и поддержании лазерных каналов в жидкостях и в биотканях генерируются акустические колебания, а также микрокапиллярные неустойчивости, сопровождающиеся автоколебательным выбросом капель и микрофрагментов вещества облучаемой среды.

Изучены процессы удаления расплава при лазерной резке, в принципе имеющие нестационарный, осциллирующий характер. Механизм удаления расплава связан с явлениями неустойчивостей фронта реза. Эти механизмы включают в себя процесс образования капель расплава, что ухудшает качество резки. Выявлены причины тепловых потерь при лазерной резке, обусловленные механизмами удаления расплава, зависящими от параметров процесса удаления расплава и, как следствие, приводящими к наличию оптимальных режимов резки (по энергетике и качеству обработки).

#### Публикации

Опубликовано свыше 40 статей и докладов в журналах и сборниках:

Препринты, сборники трудов и монографии ИПЛИТ РАН; «Известия РАН», «Квантовая электроника», «ЖТФ», «Перспективные материалы», «ФХОМ», «Механика жидкости и газа»; «Теплофизика высоких температур», «Journal of Russian Laser Research», «Proceedings SPIE», «Proceedings of LTL» (Bulgaria), «Proceedings of LTWMP» (Kiev)

#### Основные публикации

Современные лазерно-информационные и лазерные технологии: //Сборник трудов ИПЛИТ РАН. Под ред. В.Я.Панченко и В.С.Голубева. —М.: Интерконтакт Наука. 2005. —304 с. —ISBN 5 902063-12-4 Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В.Я. Панченко. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 704 с. — ISBN 978-5-9221-1023-5. Глубокое каналирование и филаментация мощного лазерного излучения

Под редакцией В.Я.Панченко

### ВВЕДЕНИЕ

Лазерная макрообработка материалов (резка, сварка, сверление отверстий, маркировка, модификация поверхности) в настоящее время достигла высокого уровня применения в индустрии

Непрерывно улучшаются параметры излучения индустриальных лазеров, предназначенных для лазерной обработки материалов: растет их мощность (до 10<sup>4</sup>–10<sup>5</sup> Вт) и энергетическая эффективность (до 20–50%), повышается оптическое качество лазерного пучка.

Одним из главных направлений современного развития лазерных технологий обработки материалов является обработка материалов большой толщины (от 20мм и выше), особенно в связи с задачами сварки в энергомашиностроении, резки и сварки в задачах утилизации крупнотоннажного энергетического, транспортного и оборонного оборудования, создания технологий дистанционной лазерной

резки и сварки материалов, включая выполнение этих процессов под водой, в задачах строительства или утилизации объектов морских оффшорных сооружений, а также подземных сооружений (тоннелей, скважин и шахт); при ликвидации чрезвычайных ситуаций; при разделке ядерно-энергетического, транспортного и оборонного оборудования.

При обработке материалов большой толщины требуется доставка интенсивного когерентного лазерного пучка в глубину материала, что осуществляется благодаря естественному процессу каналирования лазерного излучения в объеме материала

Исследование процессов с каналированным проникновением в конденсированные среды лазерных пучков с интенсивностью 10<sup>4</sup>-10<sup>7</sup> Вт/см<sup>2</sup> (при длительностях от 10<sup>-3</sup>с. до непрерывной) актуально в силу того, что далеко не полностью решены задачи создания физических моделей процессов лазерной сварки и резки при обработке материалов, а также проникновения лазерного излучения в жидкости. Решение этих задач диктуется необходимостью минимизации затрат ресурсов на проведение процесса, требованиями к качеству обработки и необходимостью создания алгоритмов для компьютерных систем адаптивного и интеллектуального контроля процесса;

К настоящему времени разработан ряд практических рекомендаций по достижению оптимальных параметров процессов лазерной обработки материалов и лазерного воздействия на биоткани с глубоким проникновением лазерного излучения. Эти рекомендации зачастую не обоснованы научно, что приводит к необходимости применять экспертные системы или опираться на интуицию и опыт практиков. Кроме того, компании, производящие лазерное технологическое и медицинское оборудование, не раскрывают найденные эмпирическим путем ноухау о выборе оптимальных параметров процессов.

Сложность создания адекватных фундаментальных моделей обсуждаемых процессов объясняется тем, что динамика образования и поддержания глубоких лазерных каналов включает в себя разной природы гидродинамические неустойчивости и колебания окружающего канал материала в жидкой фазе. Кроме того, в опубликованных моделях процессов практически никогда не указаны границы их применимости.

Состояние проблемы, предшествующее полученным в ИПЛИТ РАН и представленным в настоящем разделе новым результатам по исследованиям и разработкам моделей процессов с глубоким проникновением лазерного излучения в конденсированные среды, изложено в относительно ограниченном числе сводных публикаций.

В обзоре Бункина Ф.В. и Трибельского М.П. «Нерезонансное взаимодействие мощного оптического излучения с жидкостью» (УФН. 1980. Т. 130. № 2. С. 193–239) впервые обсуждается задача о нахождении энергетического порога каналированного проникновения лазерного пучка в жидкую среду. В монографии *Веденова А.А. и Гладуша Г.Г.* «Физические процессы при лазерной обработке материалов» (М.: Энергоатомиздат. 1985) впервые представлена качественная аналитическая модель поддержания глубокого квазистационарного лазерного канала в твердом теле при наличии расплава на стенках канала, даны качественные представления о некоторых механизмах переноса расплава при лазерной сварке с каналированным проникновением излучения, сообщаются результаты опубликованных в периодической литературе исследований некоторых неустойчивостей стенок канала. В сборнике. *Арутюняна Р.В. Баранова В.Ю., Большова Л.А., Малюты Д.Д., Себранта А.Ю.* «Воздействие лазерного излучения на материалы» (М.: Наука, 1989) рассмотрена задача о пробивке глубоких каналов импульсно-периодическим лазерным излучения, а также в режиме генерации поверхностных электромагнитных волн во растористью канала в режиме волноводного распространения излучения, а также в режиме генерации поверхностных электромагнитных волн на образующихся за счет капиллярно-испарительной неустойчивости рельефных структурах поверхности расплава.

В учебнике .*Григорьянца А.Г, Шиганова И.Н., Мисюрова А.И.* «Технологические процессы лазерной обработки» (М., Изд-во М ГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006 г.), кратко рассмотрены теоретические основы лазерной обработки и обобщены аналитические и численные методы анализа физических процессов при воздействии лазерного излучения на различные материалы, представлены технологии лазерной

термической обработки, легирования, оплавления, наплавки, сварки, резки и других процессов, без изложения результатов исследований и разработок, помещаемых в настоящем разделе.

В нескольких зарубежных книжных изданиях, посвященных технологии лазерной обработки материалов (LIA Handbook of Laser Materials Processing / Ed. John F.Ready. Orlando. FL: Publ. LIA, 2001; W. Steen «Laser Material Processing», Springer Verlag, 1991; W.W.Duley, «Laser Welding», John Wiley & Sons, inc. NY – 1998) кратко обсуждаются экспериментальные факты о каналированном проникновении лазерного излучения в материалы и упрощенная концепция физической модели этого процесса, состоящая в предположении о стационарном балансе энергии и импульса, без учета возможных гидродинамических неустойчивостей расплава на стенках канала и возможном релаксационном характере процесса.

Издание «Современные лазерно-информационные и лазерные технологии. Сборник трудов ИПЛИТ РАН». (Интерконтакт- Наука, М.2005г.) включает в себя подробное изложение части результатов ИПЛИТ РАН, представленных в настоящем разделе.

В настоящем разделе представлены основные результаты фундаментальных исследований авторского коллектива ИПЛИТ РАН, позволившие существенно продвинуться в решении проблемы создания физических моделей процессов каналированного проникновения пучка мощного квазинепрерывного лазерного излучения в конденсированную среду:

• Проанализированы модели переноса расплава при лазерной сварке с глубоким каналированным проплавлением материалов лазерным излучением, в том числе рассмотрен механизм релаксационного переноса расплава, учитывающий неустойчивости поверхности расплава в парогазовом канале и испарение микрокапель.

• Разработана тепло-гидродинамическая теория самоорганизации пространственно-периодических структур рельефа поверхности расплава на стенках парогазовой каверны, образующейся при глубоком проникновении мощного лазерного излучения в конденсированные среды; предсказана и теоретически исследована возможность возникновения на расплавленных стенках цилиндрической каверны неустойчивости нового типа - винтовой неустойчивости, инициирующей появление длинноволнового спиралевидного движения расплава вокруг оси каверны.

• Рассмотрены гидродинамические аспекты эффекта концентрационного расслоения гетерогенных конденсированных систем из несмешивающихся компонентов при воздействии мощных лазерных пучков в режиме их каналированного проникновения в среду, в частности, в процессе лазерной сварки.

• Изучены процессы удаления расплава при резке материалов излучением непрерывного лазера, в принципе имеющие нестационарный, осциллирующий характер. Выполнен физический анализ механизмов удаления расплава, в том числе связанных с явлениями неустойчивостей фронта реза. Эти механизмы включают в себя капиллярные явления, гидродинамические неустойчивости и процессы образования капель расплава, что ухудшает качество резки. Выявлены причины тепловых потерь при лазерной резке, обусловленные механизмами удаления расплава, зависящими от параметров процесса удаления расплава и, как следствие, приводящими к наличию оптимальных режимов резки (по энергетике и качеству обработки).

• Проведены экспериментальные исследования процесса проникновения сфокусированного пучка лазерного излучения киловаттного уровня мощности в конденсированные среды (жидкости, биоткани, имитаторы биотканей). Создана физическая модель лазерного канала в жидкости с учетом нестационарных автоколебаний параметров канала в условиях турбулентной конвекции, вызванной движениями канала, а также архимедовой и термокапиллярной сил. Показано, что при образовании и поддержании лазерных каналов в жидкостях генерируются капиллярные неустойчивости, а также акустические колебания.

Данный раздел состоит из трех частей:

- Нестационарные гидродинамические явления при лазерной сварке с каналированным проникновением излучения в материал
- Формирование глубоких каналов при воздействии интенсивного лазерного пучка на конденсированные среды
- Механизмы удаления расплава при лазерной резке материалов

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ С КАНАЛИРОВАННЫМ ПРОНИКНОВЕНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ В МАТЕРИАЛ

Успехи в развитии мощных индустриальных лазеров стимулировали применение лазерных технологий в обработке материалов больших толщин. Эти применения требуют, как правило, глубокого каналированного проникновения лазерного пучка в материалы. Явления, сопровождающие глубокое проникновение лазерного излучения в ходе обработки материалов, остаются все еще малоизученными и качественно (физически), и численно. Это особенно касается лазерной сварки (ЛС) с глубоким проплавлением, когда основные характеристики процесса определяет гидродинамическое поведение слоев расплава и ванны расплава (**Рис.1**) Физические процессы, определяющие глубокого парогазового канала и перенос расплава при лазерной сварке, в принципе неустойчивы и нелинейны, они носят автоколебательный характер (**Рис.1**) что приводит к образованию различных дефектов и неоднородностей сварного шва (поры, несплошности, непровары).



Рис.1 Процессы, определяющие поддержание глубокого парогазового канала и перенос расплава при лазерной сварке с глубоким каналированным проникновением лазерного пучка в материал, в принципе неустойчивы и нелинейны. Явления неустойчивости фронта плавления, микрокапиллярных волн и отрыва микрокапель, которые вызывают всплеск давления паров расплава и образование турбулентных затопленных струй, играют определяющую роль в механизме переноса жидкого металла с переднего фронта парогазового канала в ванну расплава Знание фундаментального механизма лазерной сварки с глубоким проплавлением необходимо для того, чтобы предложить пути улучшения применения этого процесса в индустрии, а также для расширения диапазона его режимов. Раскрытие этого механизма углубляет понимание механизмов других процессов с интенсивными потоками энергии (лазерная резка и наплавка, электронно-лучевая обработка, электродуговая сварка).

Известные в литературе (напр., монография *A.A.Bedenoвa* и *Г.Г.Гладуша*, монография *W.W.Duley*) стационарные модели процесса ЛС позволяют описать качественно и практически количественно зависимость глубины канала и ширины сварного шва от основных параметров процесса (мощности лазерного излучения, скорости сварки), но не дают границ значений этих параметров, в пределах которых процесс устойчив и энергоэффективен. Кроме того, эти модели не дают физического механизма переноса расплава с фронтальной стенки канала в ванну расплава для всех возможных диапазонов параметров процесса ЛС.

В работах группы *В.А.Лопоты* (1980-1990гг.) предложена концепция нестационарной модели процесса ЛС: этот процесс в принципе неустойчив и носит периодический релаксационный характер (что было подтверждено экспериментально). Выдвинута гипотеза, что во времени процесс ЛС состоит из двух периодически повторяющихся фаз: медленной фазы проплавления передней стенки канала, за время которой (~10<sup>-3</sup>с) образуется пленка расплава; в конце этой фазы температура поверхности пленки достигает величины температуры интенсивного испарения, в канале появляется пар металла с избыточным давлением порядка нескольких атм, и давление этого пара за время ~10<sup>-4</sup>с выталкивает (фаза "смыва") пленку расплава с передней стенки. в ванну расплава; синхронно пар истекает через входной кратер канала, температура передней стенки опускается до температуры плавления, и снова начинается медленная фаза нагрева.

Физическая модель процесса ЛС, основанная на данной концепции, могла бы в принципе объяснить механизм перемещения расплава с передней стенки канала на заднюю; найти долю энергетических потерь на испарение; поставить вопросы о физических процессах, ограничивающих параметры устойчивого режима ЛС. Концепция не раскрывает физического механизма «взрывных» всплесков давления, сопутствующих неустойчивостей поверхности расплава и возможности образования микрокапель в объеме парогазового канала.

В исследованиях ИПЛИТ РАН была поставлена цель выяснить гидродинамические механизмы неустойчивостей поверхности и объема расплава, перемещения расплава и динамического равновесия стенок канала, раскрыть механизм всплесков давления, явлений образования капель расплава и их испарения, относительную роль сил поверхностного натяжения и термокапиллярных сил.

В результате разработана качественная модель механизма ЛС в условиях воздействия непрерывного лазерного пучка интенсивностью  $10^5$ - $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> на металлы при мощности пучка ~ $10^3$ - $10^4$  Вт и при скоростях ЛС ~ $10^{-1}$ - $10^2$  см/с. Модель отвечает на вопросы о механизме переноса расплава от фронтальной стенки канала к ванне расплава и о механизме динамического равновесия жидких стенок канала. Модель учитывает, что система парогазовый канал-ванна расплава (**Рис.2**) в принципе неустойчива, существует лишь в результате динамического равновесия сил давления пара и поверхностного натяжения, скоростного напора движущихся струй расплава и, при достаточно глубоких каналах – гравитационного гидростатического давления.



Учет неустойчивостей поверхности и объема расплава позволяет объяснить нестационарные явления процесса ЛС (вспышки давления пара на выходе из канала, колебания «корня шва» и ванны расплава, «чешуйки» на поверхности шва), уточнить баланс энергии процесса ЛС и раскрыть механизмы переноса расплава. Механизм генерации всплесков давления паров в канале связывается с интенсивным испарением капелек микронного размера, отрывающихся от поверхности расплава вследствие развития микронеустойчивостей.

Из рассмотрения термогидродинамических неустойчивостей процесса ЛС следует, что перенос расплава происходит за счет двух видов релаксационных нестационарных механизмов, сменяющих друг друга при росте скорости ЛС.

При относительно малых скоростях ЛС должна возникать неустойчивость вида "движущаяся ступенька расплава" (Рис.2) на (фронтальной) передней стенке канала, зарождающаяся периодически снаружи (на верхней поверхности образца перед входом в канал). Температура поверхности расплава на передней стенке в этом режиме ЛС ниже температуры кипения. Процесс периодического возникновения ступенек в верхней части канала обусловлен постоянным «надвиганием» пучка лазерного излучения на поверхность материала перед входом в канал, при котором температура этой поверхности достигает температуры кипения раньше, чем поверхность слоя расплава на передней стенке канала. При движении ступеньки (под действием давления отдачи паров)

вглубь канала происходит удаление слоя расплава с передней стенки в заднюю часть ванны, в виде двух пристеночных затопленных струй, смещающихся вниз вместе со ступенькой, что является механизмом переноса расплава. Процесс носит периодический характер с частотой  $f \approx 10-10^3 \text{ c}^{-1} f$ , пропорциональной скорости ЛС. Заметим, что в экспериментах (группы *А.Г.Григорьянца, A.Matsunawa*) регистрировались движущиеся ступеньки на фронтальной стенке канала.

При повышенных скоростях ЛС поверхность расплава на передней стенке канала достигает температуры кипения раньше, чем поверхность образца перед каналом (т.е. перед движущимся лазерным лучом). На передней стенке канала за время ~10<sup>-5</sup>-10<sup>-6</sup> с развивается капиллярно-испарительная микронеустойчивость с длинами волн порядка 10<sup>-3</sup>см, приводящая к отрыву микрокапель с поверхности и их инжекции в объем парогазового канала (**Puc.3**).



Рис. 3 Отрыв капель с поверхности расплава в парогазовом канале в релаксационном режиме лазерной сварки с глубоким каналированным проникновением излучения в материал Капли испаряются в поле лазерного излучения, создавая всплеск давления пара, приводящего к вытеснению расплава с передней стенки канала в ванну расплава и к радиальному отталкиванию поверхности задней стенки канала. В результате происходит импульсный «смыв» расплава с передней стенки канала в ванну расплава (**Рис.4**), причем этот процесс происходит периодически с частотой  $f \sim 10^3$ -

10<sup>4</sup> с, приблизительно пропорциональной квадрату скорости ЛС

Релаксационнопериодический характер ЛС процесса лолжен приводить к всплескам давления паров В пространстве над каналом и колебаниям вынужденным объема ванны расплава (с  $\sim 10^2 \div 10^3$  c<sup>-1</sup>). частотами

соответствующим резонансным модам капиллярных колебаний этого объема. Как следствие этих колебаний, на



Рис.4 Механизм лазерной сварки с периодическим вытеснением расплава. Течение расплава происходит периодически от фронтальной стенки канала вокруг полости канала в ванну расплава

затвердевшей поверхности расплава сварного шва должны наблюдаться периодические «чешуйки».

Релаксационное импульсно-периодическое поведение ряда физических параметров, сопровождающих процесс ЛС (давление пара на выходе из канала, свечение плазмы, форма поверхности расплава) наблюдалось в ряде экспериментов (групп Y.Arata, G.Herziger, A.Matsunawa, ИПЛИТ РАН) (кинограммы канала, регистрограммы периодических выбросов пара и плазмы)]; частоты и длительность этих импульсов, длины волн возмущений близки к оценочным значениям, соответствующим модели капиллярных колебаний объема ванны расплава.

Выполнен специальный оценочный анализ осуществимости лазерной сварки материалов за счет механизма термокапиллярного переноса расплава при глубоком каналированном проникновении излучения. Показано, что такой механизм возможен лишь при выполнении специфических требований к теплофизическим свойствам вещества материала. Известные свойства металлов не удовлетворяют этим требованиям, но это не относится к материалам типа кварца, стекол, керамик и полимеров.

к

Разработана самосогласованная теоретическая модель, учитывающая поведение нестационарных тепло гидродинамических процессов в расплавленном слое и кинетику испарения металла с поверхности расплава, исследована неустойчивость парогазового канала с различной (цилиндрической, конической) конфигурацией, образующейся при воздействии на конденсированные системы мощного лазерного излучения в режиме глубокого проникновения в среду. При интенсивности лазерного излучения на уровне  $\approx 10^5 - 10^6$  Bt/cm<sup>2</sup>, характерной для режимов глубокого проплавления, эта неустойчивость обусловлена испарительно-капиллярным механизмом обратной связи, при котором рост возмущений на свободной поверхности расплава поддерживается связанной с ним пространственно - временной модуляцией испарительного давления. Нелинейная стадия развития длинноволновых возмущений на поверхности приводит к формированию на стенках парогазового канала стационарных бегущих нелинейных волновых движений конечной амплитуды. Доказана возможность возникновения на расплавленных стенках цилиндрической каверны неустойчивости нового типа винтовой неустойчивости, инициирующей появление длинноволнового спиралевидного движения расплава вокруг оси каверны. (Спиралевидные структуры затвердевшего расплава на стенках каверны были обнаружены (Рис.5) в экспериментах ИПЛИТ РАН).



Проведенное исследование механизмов неустойчивостей лазерного парогазового канала с формированием упорядоченных структур, порогов их появления по интенсивности лазерного пучка, частот осцилляций поверхности и объема конденсированной среды позволяет выработать рекомендации по выбору оптимальных режимов обработки перспективных материалов с использованием мощных лазерных пучков.

Рассмотрена физическая модель образования слоистых структур при лазерной сварке с глубоким проплавлением гетерогенных материалов. Модель объясняет образование слоев центробежным «разбеганием» либо «стягиванием» микрочастиц примеси размером ~10<sup>-4</sup>-10<sup>-3</sup> см. Этот центробежный эффект должен проявляться в вихревых течениях в ванне расплава, со скоростями ~10<sup>2</sup>см/с, генерируемых гидродинамическими неустойчивостями. В случае непрерывного режима лазерного излучения при непрерывном сканировании пучка вдоль поверхности материала в расплаве могут существовать нестационарные периодически повторяющиеся трехмерные вихревые течения, объясняемые инжекцией затопленных струй расплава с передней стенки парогазового канала, вызванной движущимся вдоль этой стенки уступом из материала расплава. После затвердевания гетерогенного расплава в сварном шве фиксируются слои нерастворимой примеси, имеющие вид полос, поперечных оси лазерного пучка, соответствуют опубликованным (И.Н.Шиганов) что экспериментальным данным.

Отметим те физические явления, на возможность которых в исследованиях

**ИПЛИТ РАН было впервые обращено внимание** при рассмотрении процесса ЛС с глубоким каналированным проникновением лазерного пучка в материал:

-Микрокапиллярные неустойчивости поверхности расплава типа Кельвина-Гельмгольца ("ветровая), термокапиллярная и капиллярноиспарительная.

-Отрыв микрокапель от поверхности расплава из-за развития капиллярных микронеустойчивостей, последующее испарение капель и вследствие этого – появление быстро нарастающего давления пара в канала. Это обеспечивает динамическое равновесие задней стенки канала, приводит к импульсному нестационарному смыву (передавливанию) слоя расплава с передней стенки канала в ванну расплава и к вынужденным капиллярным колебаниям объема ванны расплава.

-Образование и движение ступеньки расплава на передней стенке канала, сопровождающееся "свипирующим" вдоль боковых стенок канала переносом расплава в ванну расплава с впрыском затопленных турбулентных струй в объем ванны. Это явление должно вызывать вынужденные капиллярные колебания, а также стохастические колебания объема расплава и стенок канала, приводящие к осцилляциям оси канала и формы его сечения.

-Новые виды неустойчивостей лазерного парогазового канала с формированием упорядоченных структур, в частности, винтовой неустойчивости, инициирующей появление длинноволнового спиралевидного движения расплава вокруг оси каверны.

-Физическая модель образования при лазерной сварке с глубоким проплавлением слоистых структур компонентов в застывающем расплаве

### ФОРМИРОВАНИЕ ГЛУБОКИХ КАНАЛОВ

# ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА НА КОНДЕНСИРОВАННЫЕ СРЕДЫ

Результаты экспериментальных исследований и предварительная разработка самодостаточной физической модели процесса проникновения квазинепрерывного пучка лазерного излучения в непрозрачную для него жидкую среду подтверждают возможность возникновения и поддержания квазистационарного осциллирующего глубокого канала. Усредненные макропараметры канала могут быть качественно описаны моделью, основанной на законах турбулентного переноса движения и энергии, что позволяет определить баланс энергии канала, его глубину в квазистационарном случае и скорость прорастания его головки в фазе развития после включения лазерного пучка.

Изучение каналов, образуемых при проникновении сфокусированных пучков лазерного излучения в жидкие среды, важно не только для фундаментальной физики, но и для практических применений лазеров: при лазерной обработке материалов, а также в хирургических операциях.

С целью разработки физической модели лазерного канала в жидкости и сопоставления ее с экспериментальными фактами, в ИПЛИТ РАН выполнен цикл экспериментальных исследований и разработаны адэкватные эксперименту качественные теоретические оценки моделей процесса проникновения сфокусированного пучка непрерывного и длинноимпульсного CO<sub>2</sub>-лазера киловаттного уровня мощности (от 0,3 до 3,5 кВт) в водную среду. Регистрировались во времени внешний вид канала (покадровая съемка цифровой камерой), акустическая эмиссия из зоны канала, а также поле скоростей в окружающей канал жидкости. Исследованы: энергетические пороги возникновения, фаза роста лазерного канала на временах 10<sup>-3</sup>–10<sup>-1</sup> с и фаза поддержания канала на квазистационарных временах порядка нескольких секунд. Сделан вывод, что параметры обеих фаз (скорость роста, глубина, диаметр канала) определяются в основном интенсивностью турбулентного конвективного теплообмена между стенками канала и окружающей жидкостью. Определенную роль играют также затраты энергии лазерного пучка на испарение жидкости. Механизмы конвекции вызываются тремя разными причинами: ускорением жидкости в моменты продвижения дна канала под действием силы реакции отдачи паров, эффектом всплывания нагретой жидкости, термокапиллярной силой.

Для объяснения результатов измерения геометрических параметров канала выдвинута гипотеза об испарении в поле лазерного излучения микрокапель, отрывающихся от жидких стенок канала в результате развития капиллярно-испарительной неустойчивости, и в последующей передаче стенкам канала энтальпии конденсации и импульса скоростного напора радиального потока пара, идущего из приосевых зон канала.

Поскольку лазерный канал представляет собой квазистационарный объект с флюктуирующими глубиной и формой на частотах ~ 1-10<sup>2</sup> c<sup>-1</sup>, были рассмотрены такие нестационарные явления, как капиллярный и гидростатический коллапс, акустическая эмиссия.

Исследование пороговых интенсивностей лазерного излучения возникновения канала в свободной воде показало, что существует два порога:



Рис.6. Геометрия и поле течений при появлении лунки в результате облучения поверхности воды квазинепрерывным лазерным пучком. -Порог начала образования лунки (**Рис.6**) на поверхности жидкости, связанный с достижением температуры кипения на поверхности:  $\cong 10^2 - 10^3$  Bt/cm<sup>2</sup>, что практически соответствует уровню мощности  $10^{-1}$ -1 Bt.

-Порог появления «глубокого» канала (глубина канала превышает его диаметр):  $\cong 10^4$ - $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, практически соответствующий уровню мощности 10- $10^2$  Вт (**Рис.7**).

Для объяснения наблюдавшейся величины порога начала образования лунки предложена модель, согласно которой нужно принимать во внимание интенсивный турбулентный конвективный теплообмен за счет термокапиллярного течения вокруг лунки, имеющего форму тороидального вихря (**Рис.6**).

Для объяснения наблюдавшихся величин порога появления «глубокого» канала (**Puc.7**) и его диаметра (существенно превышающего диаметр фокального пятна), предложена модель, основанная на гипотезе об испарении микрокапель в поле лазерного излучения.

Согласно этой модели величина порога определяется условием преодоления лапласова давления давлением скоростного напора на поверхность жидкости потока пара от микрокапель, испаряющихся в поле лазерного излучения. Капли возникают в результате отрыва горбов поверхностных капиллярных волн, генерируемых механизмом капиллярно-испарительной неустойчивости. Известная в литературе

(Бункин Ф.В., Трибельский М.П) модель порога появления «глубокого» канала, основанная на концепции преодоления лапласова давления



### Рис.7. Эскиз геометрии и поля скоростей

давлением отдачи паров, предполагает, что радиус бразующегося канала равен радиусу фокального пятна дает величину порога, на порядок меньшую экспериментально наблюдавшейся величины.

Экспериментально исследована начальная фаза развития лазерного канала и предложена физическая модель этой фазы. Было найдено, что начальная фаза (до времен~ $10^{-2}-10^{-1}$ с) характеризуется скоростью роста глубины канала, замедляющейся от величины ~ $10^3$  см/с (при временах ~ $0-10^{-3}$  с) до величин  $\approx 10^2-10$  см/с

Сделаны оценки скорости роста глубины канала после включения лазерного пучка, исходя из предположения о конвективном турбулентном теплоотводе из канала обтекающим потоком жидкости, возникающим вследствие «расталкивания» частиц жидкости внедряющимся в нее каналом. Скорость движения его дна определяется давлением отдачи паров у дна и турбулентным конвективным теплообменом боковых стенок канала с окружающей жидкостью. Турбулентные течения жидкости вокруг канала обусловлены развитием направленного вниз течения под дном канала.

Для оценки диаметра развивающегося канала, а также баланса энергии и импульса боковых жидких стенок канала, была использована гипотеза о вылете микрокапель со стенок канала за счет капиллярноиспарительной неустойчивости, последующем их испарении в поле лазерного излучения и поступлении радиально направленного от оси

потока пара на стенки, поддерживающего баланс сил и энергий. Капельно-испарительный механизм возникновения давления паров на стенки и дно канала и потока импульса отдачи капель, срывающихся с поверхности жидкости на дне канала, позволяет интерпретировать ход зависимости глубины канала от мощности лазерного пучка для времен  $<10^{-2}$  с (**Рис.8**). Значения скоростей движения дна канала ( $\sim10^3 - 10^2$  см/с), наблюдавшиеся экспериментально и соответствующие гидродинамической капельно-испарительной модели, существенно превышают значения скоростей геометрического абляционно-испарительного перемещения границы фаз жидкость-пар. Замедление скорости движения дна канала связано с ростом энергетических затрат на поддержание стенок канала.

Для времен >>10<sup>-1</sup>с глубина и диаметр канала начинают соответствовать квазистационарной модели, учитывающей в качестве основного механизма теплоотвода турбулентную конвекцию в объеме жидкости.

Оценка величин скорости движения дна канала и растущей глубины канала, основанная на капельно-испарительной модели, дает удовлетворительное согласие с результатами выполненных в ИПЛИТ РАН экспериментов (**Puc.8**), а также аналогичных экспериментов (*Jansen E.D*), опубликованных в литературе.

Экспериментально исследован квазистационарный лазерный канал в жидкостях (вода, глицерин)и предложена его физическая модель



Рис.8. Глубина (*h*) канала в воде (*P* – мощность лазерного излучения в течение импульса). Длительность импульсов излучения CO<sub>2</sub>-лазера: 5 мс. Частота повторения импульсов: 0,5 Гц. Диаметр фокального пятна: 0,4 мм. Расчетная кривая «модель» основана на гипотезе о движении дна канала под действием давления пара, эмитируемого микрокаплями, возникающими в объеме канала вследствие капиллярноиспарительной неустойчивости, а также действии импульса отдачи капель, отрывающихся от дна канала (п.2.5). Погрешность измерения величины  $h: \langle (\Delta h)^2 \rangle^{\frac{1}{2}} \cong 1$  мм. Экспериментальные наблюдения квазистационарных каналов в жидкости (в основном – в воде), образуемых при проникновении сфокусированного пучка СО<sub>2</sub>-лазера мощностью от 50 вт до 5 кВт, проводилось всего лишь в нескольких работах [*Козлов Г.И, Спивак А.В., Cybulski A.*]

С целью разработки оценочной модели лазерного канала в жидкости и более надежного сопоставления ее с экспериментальными фактами, нежели на основе опубликованной литературы, в ИПЛИТ РАН были проведены специальные экспериментальные исследования квазистационарного канала, в которых производилась покадровая видеосъемка цифровой камерой и термопарные измерения поля температур окружающей канал жидкости. Компьютерная обработка последовательных во времени фотоснимков картины канала с окружающей жидкостью с пузырьками позволила начертить траектории их движения и измерить распределение скоростей в турбулентно конвектирующей жидкости (**Рис.7**). Глубина и диаметр квазистационарного канала флюктуировали с частотами в диапазоне 1 -10<sup>-1</sup>с. Глубина канала в воде возрастала до значений ~1÷5 см при мощностях до 0,5-3,5 кВт. Средний диаметр канала на порядок величины превосходил диаметр сфокусированного лазерного пучка.

В случае вязкой жидкости (глицерин) глубина канала была в несколько раз больше, причем стенки канала были значительно стабильнее, чем в случае воды.

### Предложена физическая модель, позволяющая оценить усредненные во времени значения глубины и диаметра квазистационарного канала

Согласно модели, глубина и диаметр канала определяются турбулентным конвективным теплообменом канала с окружающей жидкостью. Модели канала, учитывающие гидростатическое равновесие стенок канала с давлением отдачи паров и потери энергии только на испарение, не позволяют оценить по порядку величины наблюдавшиеся экспериментально средние во времени геометрические параметры канала. Доводом в пользу утверждения, что при мощностях излучения 1 – 3 кВт преобладают потери энергии на теплопроводность в жидкости, а не на испарение через входное отверстие канала, являются результаты измерений

глубины стационарного канала в глицерине. В этом случае глубина канала на порядок величины больше, чем в случае воды. Это следует объяснить существенно большей вязкостью глицерина, что должно приводить к практически ламинарному характеру конвекции с соответствующим сильным уменьшением интенсивности теплоотвода вглубь жидкости.

Квазистационарное конвективное течение жидкости в виде тороидального вихря (**Рис.8**), окружающего канал, образуется либо за счет архимедовой подъемной силы (при глубине канала свыше ~1 см и мощности лазерного излучения свыше 0,1 кВт), либо за счет термокапиллярной силы – при малых значениях мощности и, соответственно, глубины канала.

Дана также оценка средней скорости турбулентной конвекции жидкости, дающая качественное согласие с данными эксперимента (10-10<sup>2</sup> см/с). Предполагалось, что скорость конвекции определяется балансом сил: движущей (подъемная сила Архимеда и сила термокапиллярного увлечения поверхностного слоя) и тормозящей – силы турбулентной вязкости.

Эксперименты показали, что средний диаметр канала на порядок величины превышает диаметр лазерного пучка. (Рис.9). Объяснение



**Рис.9.** Глубина (*h*) и выходной диаметр (*D*) канала в воде при росте мощности излучения лазера, (*P*).

этому факту можно дать с помощью модели, в которой учитывается испарение микрокапель, попадающих в поле лазерного излучения. Диаметр канала определяется балансом энергии и импульса потока пара, уходящего из приосевых зон канала и конденсирующегося на жидких стенках. Механизм образования микрокапель состоит в генерации развития капиллярно-испарительных волн на поверхности жидких стенок канала с последующим отрывом верхушек волн в объем канала в виде капель, летящих радиально к оси канала и попадающих в зону действия лазерного пучка.

Экспериментально исследованы и проанализированы нестационарные явления в канале: капиллярный коллапс, осцилляции параметров квазистационарного канала, акустическая эмиссия.

Эксперименты показали, что канал представляет собой квазистационарный осциллирующий объект, параметры которого флюктуируют с частотами  $\sim 1-10^3$  с<sup>-1</sup>. Сильная нестабильность формы стенок канала прежде всего вызвана периодически повторяющимся капиллярным и гидростатическим коллапсами, а также турбулентными пульсациями давлений в потоках жидкости, обтекающих канал. При капиллярном коллапсе слабо-конические жидкие стенки принимают гофрированный вид с пространственным периодом, имеющим вдоль оси канала размер порядка его диаметра (~1мм), с временем развития гофр (в случае воды): ~10<sup>-3</sup>-10<sup>-2</sup> с; периодические перетяжки канала, образовавшиеся в результате схлопывания гофр, имеют длину порядка диаметра канала; они вновь «пробиваются» лазерным пучком за время 3.10<sup>-5</sup>-3.10<sup>-4</sup> с. В момент «пробоя» перетяжек канала должны генерироваться всплески давления пара,

повторяющиеся с частотой ~ $10^2$ - $10^3$  с<sup>-1</sup>, и продолжительностью ~ $3 \cdot 10^{-5}$ - $3 \cdot 10^{-4}$  с.

Анализ свободных и вынужденных колебаний жидких стенок канала указывает также на наличие частот ( $\sim 10^2$ гц) колебаний геометрических размеров канала и генерацию акустических волн в объеме канала. Механизм генерации звука соответствует классическому эффекту «поющей трубы», возникающему при наличии тепловыделения в объеме газа, находящегося в трубе. Тепловыделение в объеме пара внутри канала связано с испарением микрокапель,. Наряду с этим механизмом акустической эмиссии, возможен также механизм возбуждения звука за счет турбулентных пульсаций давления в потоке выходящего из канала пара. Возможна также генерация акустических волн за счет капиллярных колебаний пузырьков в жидкости, Акустическая эмиссия происходит затем из горловины канала в окружающую атмосферу и соответствует звуковым частотам  $\sim 10^2 - 10^4 \Gamma$ ц. Подобная картина спектров акустических частот была отмечена в экспериментах (Группы: ИПЛИТ PAH, Cybulski A, Jansen E.D).

Выполнены экспериментальные исследования лазерных каналов в гетерогенных средах – водонасыщенных биотканях, а также



Рис. 10 Геометрические параметры лазерных каналов в воде и в желатине, развивающихся в диапазоне времени 10<sup>-2</sup>-10<sup>-1</sup>с. h, d – глубина, и средний диаметр канала. Погрешность измерений: ~20%. Мощность излучения CO<sub>2</sub>-лазера: 300 Вт. Диаметр фокального пятна: d<sub>F</sub>=0,3 мм в имитаторах биотканей (вода, желатин). Исследования образования каналов в водонасыщенных биотканях и в гетерогенных водонасыщенных средах позволило установить пороговые интенсивности и механизмы абляции, включающие как прямое испарение, так и гидродинамическое удаление жидкой фазы. Установлена величина удельной энтальпии абляции, близкая к энтальпии испарения воды. Результаты измерений глубины и диаметра растущих во времени при подаче лазрного излучения каналов в имитаторах представлены на **Рис.10**.

Зависимость глубины канала от времени в случае воды соответствует гидродинамической модели, учитывающей образование парокапельной фазы. В случае желатина эта зависимость сответствует модели гидродинамического вытеснения жидкой фазы давлением пара, вместе с испарительно-абляционным движением границы паровой и жидкой фаз, с учетом каустического уменьшения интенсивности лазерного излучения в процессе роста канала.

В заключение резюмируем, что как стадия развития, так и квазистационарное состояние лазерного парогазового канала в воде описаны моделями турбулентного теплообмена и гидродинамики течения жидкости, «омывающей» канал как при его развитии, когда движение жидкости осуществляется за счет парового давления отдачи, так и в стационарном состоянии – когда течение жидкости происходит за счет свободной конвекции в поле сил тяжести (в последнем случае этот фактор для расплавов металлов несущественен высокого коэффициентов из-за значения ИХ температуропроводности). Согласие модели с экспериментальными данными о глубине канала и скорости его развития имеет место лишь при учете турбулентного характера теплообмена.

Таким образом, учет гидродинамических явлений, сопровождающих развитие и существование лазерных каналов в жидкости позволяет по порядку величины

оценить глубину лазерных каналов, скорости их роста и характерные частоты нестабильностей. Эти гидродинамические явления таковы: турбулентная термокапиллярная и архимедова конвекция; ускорение жидкости ее паром, образуемым при поглощении лазерного излучения, с образованием турбулентных вихревых течений в объеме жидкости; капиллярный коллапс стенок канала в виде гофр, «пробиваемых» периодически лазерным пучком; возбуждение капиллярных волн за счет капиллярно-испарительной неустойчивости, последующий отрыв микрокапель с вершин волн в атмосферу над поверхностью жидкости и затем испарение капель в поле лазерного излучения, сопровождающееся силовым и энергетическим воздействием потока пара на стенки канала; акустическая эмиссия в окружающую атмосферу и в объем жидкости.

Установлено, что гидродинамические эффекты при образовании каналов в свободной жидкости приводят к бо́льшим скоростям роста каналов и к меньшим глубинам установившихся каналов по сравнению со случаем гетерогенных сред, содержащих воду в связанном (капсулированном) состоянии.

Косвенные подтверждения наличия корреляции рассмотренных моделей с экспериментом состоят в следующих фактах: (1) значительное превышение радиуса канала над радиусом пучка; (2) диапазон частот колебаний канала; (3) величина глубины канала и ее изменение с мощностью пучка; (4) величина и пространственное распределение скорости конвекционного движения жидкости в объеме вокруг канала.

### МЕХАНИЗМЫ УДАЛЕНИЯ РАСПЛАВА

# ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ МАТЕРИАЛОВ

Важнейшей проблемой исследований процесса лазерной резки (ЛР) материалов с глубоким проникновением излучения является выяснение механизмов удаления расплава. Понимание механизмов лазерной резки позволяет создать модели процесса и найти его оптимальные параметры в целях повышения его энергетического кпд и снижения шероховатости стенок реза.

В ИПЛИТ РАН выполнен цикл работ, посвященных исследованию физических механизмов удаления расплава в процессе ЛР материалов излучением непрерывного лазера. Рассмотрены и уточнены известные и опубликованные в литературе механизмы: вытеснения расплава градиентом давления в струе вспомогательного газа; увлечение расплава силой трения со стороны этой струи; образовании движущихся по фронту реза ступенек, срыв капель расплава за счет градиента давления газа. Одновременно вынесены на обсуждение механизмы, ранее не принимавшиеся во внимание: генерация на поверхности расплава гидродинамических неустойчивостей, раскачка волн малой длины (~ $10^{-3}$ – $10^{-2}$  см) и последующий отрыв капель с их вершин. Эти процессы существенно увеличивают скорость съема материала, что приводит к улучшению энергетической эффективности процесса резки, но, в то же время, они вызывают появление дополнительных, по сравнению с ранее обсуждавшимися, механизмов образования бороздок и гребней на поверхности реза.

В целом проведенное рассмотрение совокупности гидродинамических явлений при лазерной резке позволило предложить качественное объяснение ряда экспериментально наблюдаемых зависимостей энергетической эффективности и высоты шероховатости от скорости резки: максимум эффективности и минимум шероховатости имеет место при некоторой оптимальной скорости резки, соответствующей близости величин энергозатрат на фронтальный (конвекционный) и боковой (теплопроводностный) нагрев материала разрезаемого образца. Отсюда следуют практические рекомендации по оптимальному выбору мощности лазера, скорости резки и давления вспомогательного газа, в

зависимости от рода и толщины материала. В то же время могут быть предложены рекомендации по выбору пространственного профиля интенсивности лазерного излучения, а также геометрических и газодинамических параметров потока вспомогательного газа.

В описываемом цикле работ дана интерпретация основным закономерностям процесса резки материалов излучением непрерывного лазера с позиций гидродинамики течения расплава. Вне поля зрения остались вопросы о механизмах поглощения лазерного излучения, о механизмах резки в импульсно-периодических режимах ЛР, включая режимы с чистой сублимацией.





Основная часть известных из литературы моделей механизмов лазерной резки рассматривает удаление слоя расплава, под действием тангенциального потока вспомогательного газа (**Puc.11**) за счет перепада давления вдоль фронта реза, в потоке газа и за счет увлечения расплава потоком газа посредством вязкого трения.

Наше рассмотрение гидродинамики стационарного удаления расплава с фронта реза под действием тангенциального потока газа позволило указать возможность развития режимов с образованием приповерхностных и объемных течений, а также придонных погранслоев

(Рис.11) Эти режимы не обсуждаются в известной литературе (Григорьянц А.Г., Schuöcker D., Tsai M.E, Olsen F.O. и dp.), где полагается, что во всей толще слоя расплава на фронте реза имеет место действие либо сразу обеих гидродинамических сил (градиента давления и силы трения), либо только одной из них.

Быстрое течение жидкой пленки на жидкой подложке должно быть нестабильным: его неустойчивость проявляется в росте поверхностных волн и последующем отрыве капель расплава, (Puc.12) приводящему к периодическому съему приповерхностного слоя за счет отрыва микрокапель и соответственно – к появлению на кромке реза поперечных бороздок с очень малым пространственным периодом.



**Рис.12** Неустойчивость приповерхностной струи (пленочного течения) на слое расплава при лазерной резке.

Обозначения:

v<sub>c</sub> – скорость резки; v<sub>g</sub> – скорость газа; u<sub>p</sub> – скорость течения в основном объеме слоя расплава; u<sub>f</sub> – скорость течения расплава в

приповерхностной струе; δ<sub>p</sub> – толщина основного объема слоя расплава;

δ<sub>f</sub> – толщина приповерхностной струи; v<sub>d</sub> – скорость капель.

Практически при любых условиях процесс лазерной резки сопровождается формированием шероховатости поверхности, или «канавок» и «гребней», на кромках реза. Можно наблюдать бороздки различной амплитуды и с разным расстоянием между гребнями в зависимости от используемых параметров резки (**Puc.13**).



Рис. 13. Вид боковой поверхности лазерного реза. (Сталь 10. Толщина 4 мм. Сопутствующий газ – кислород).

Измеренная амплитуда шероховатости поверхности минимальна (**Рис.14**) при некотором оптимальном значении скорости резки (исследования ИПЛИТ РАН). Примечательно, что этот минимум коррелирует с минимумом измеренной в этих же исследованиях зависимости прироста температуры образца от скорости резки (**Рис.14**).

Объяснение механизмов шероховатости (бороздок) можно дать с учетом неустойчивостей течения расплава на фронте лазерной резки. Нами ревизованы ранее известные механизмы образования бороздок: синхронные вынужденные колебания слоя расплава, (*Schuöcker D.*) поддерживаемые пульсациями давления и скорости потока режущего



При достаточно малых скоростях резки сканирующий лазерный пучок непрерывно частично «захлестывает» и нагревает верхнюю поверхность образца, и часть этой поверхности, примыкающая к фронту реза, начинает плавиться раньше, чем поверхность фронта реза. Учет колоколообразного распределения интенсивности лазерного излучения, выполненный в нашем анализе, показал, что расстояние между бороздками не зависит от скорости резки и по порядку величины близко к радиусу пучка. Экспериментальные измерения (ИПЛИТ РАН) размеров затвердевших на нижней поверхности образца капель расплава дают качественное подтверждение теоретически найденной зависимости диаметра капель от давления потока газа. В работе (Fushimi u dp.) скоростной видеосъемкой свечения фронта реза обнаружено яркое пятно, периодически перемещающееся вдоль фронта сверху вниз что возможно, подтверждает модель движущейся «ступеньки».

В случае высоких скоростей резки возникает неустойчивость профиля фронта реза типа «деформация фронта плавления» (Макашов Н.К), вызванная уменьшающейся интенсивностью пучка вдоль нижней поверхности фронта реза. Это приводит к появлению бороздок с пространственным периодом порядка радиуса пучка.

Бороздки

Нами рассмотрен новый механизм образованию бороздок за счет появления движущихся «горбов» на слое расплава при больших скоростях ЛР (**Puc.16**).



Рис. 16..Механизм образования бороздок за счет появления движущихся «горбов» на слое расплава при больших скоростях лазерной резки. (v<sub>c</sub> –скорость резки). Наряду с объяснением механизмов появления поперечных бороздок, анализ явлений «движущихся ступенек» и «движущихся горбов» позволил дать возможное объяснение появлению продольных полос на кромках реза (**Рис. 13**).

Существенным моментом во всех моделях гидродинамических неустойчивостей расплава выделяется явление отрыва капель с вершин волн, развивающихся на поверхности расплава в процессе неустойчивости. Быстро текущий по поверхности фронта реза расплав будет стремиться вылететь в виде капель, отрывающихся в струю газа за счет центробежной силы, возникающей вследствие кривизны деформированного в виде периодических волн фронта реза. Образование капель может иметь место вдоль всей линии фронта реза, а не только в самом его низу. Косвенные свидетельства в пользу этого суждения – возрастание амплитуды шероховатостей и усиления нагрева разрезаемого образца (**Рис.14**) при высоких скоростях резки, что было объяснено адгезией оторвавшихся микрокапель с их последующим затвердеванием на кромке реза. качественно рассмотрена задача об адгезии и затвердевания капель на боковых стенках реза.

Мы выдвигаем также гипотезу еще об одном виде нестабильности процесса лазерной резки – неустойчивости пленочного погранслойного течения на поверхности расплава (**Puc.12**). На поверхности слоя расплава силой сдвигового напряжения со стороны струи режущего газа приводится в движение тонкая пограничная пленка (**Puc.11**) Причиной появления неустойчивости является преобладание центробежной силы течения в волнообразно случайно деформированной пленке течения (т.е. в приповерхностном погранслое) над силой поверхностного натяжения. Этот процесс вызывает отрыв капель, последующее быстрое уменьшение толщины слоя, затем – возобновление роста толщины. Соответствующий период бороздок на краю кромок реза - порядка  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  см.

Нами проведен анализ также «ветровой» (или Кельвина-Гельмгольца) неустойчивости поверхности жидкости (**Рис. 17**). «Ветровая» неустойчивость на границе

расплав-струя газа может вызывать отрыв капель расплава и, следовательно, интенсифицировать процесс выноса расплава. Вместе с тем, рассматриваемая неустойчивость, а также неустойчивость приповерхностной плоской струи, могут инициировать появление периодически движущихся жидких горбов на слое расплава, которые отрываются в виде капель в поток газа. Этот механизм может явиться основой для интерпретации появления продольных полос на боковых поверхностях реза (**Рис. 13**).

Таким образом, во всем диапазоне скоростей резки существуют возможные механизмы отрыва капель расплава в режущий газ. Это явление должно иметь место вдоль почти всей длины фронта, в направлении сверху вниз. Характер неустойчивости и механизм отрыва

капель меняются сверху вниз, так же как и параметры потока газа, и интенсивность лазерного пучка. Эти факторы влияют на длину волн шероховатостей реза, высоту их «хребтов» или глубину бороздок.



горизонтально) за счет генерации капель в результате развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца («ветровой») Рассмотрение тепловых процессов при действии механизма движущихся ступенек в случае малых скоростей резки и, в случае высоких скоростей резки – процесс адгезии к кромкам реза расплава от капель – позволило найти подход к объяснению минимума высоты шероховатости в функции скорости резки и максимума высоты шероховатости в функции давления струи выдувающего газа. В нижних частях фронта реза уменьшается скоростной напор, что должно приводить к увеличению длин волн неустойчивостей и размеров капель, что наблюдается в эксперименте и коррелирует с моделями нашей работы.

Итак, гидродинамические процессы выноса расплава при лазерной резке носят нестационарный и осциллирующий характер. Механизм выноса расплава по мере увеличения скорости резки изменяется от режима «движущейся ступеньки» к режиму движущихся «горбов» на слое расплава и неустойчивого потока поверхностного слоя расплава. Все эти режимы сопровождаются выбросом капель расплава в поток газа. Эти явления увеличивают скорость выноса расплава и энергетическую эффективность процесса лазерной резки, но одновременно приводят к возрастанию шероховатости стенок

реза. Оптимальные, с точки зрения устойчивости процесса и минимума шероховатости, скорости лазерной резки соответствуют близости величин энергозатрат на фронтальный (конвекционный) и боковой (теплопроводностный) нагрев материала разрезаемого образца.

Проведенный анализ моделей механизмов удаления расплава при ЛР позволяет рекомендовать ряд практических приемов, направленных на повышение качества реза и снижения потерь энергии.

Во-первых, выбрать оптимальную скорость резки при данной мощности излучения, соответствующую минимуму амплитуды шероховатости реза и величины тепловых потерь.

Во-вторых, сформировать специальное распределение интенсивности излучения в зоне фронта реза, с целью избежать развития неустойчивостей типа «движущаяся ступенька» и «деформация фронта плавления».

– В-третьих, в тракт подачи вспомогательного газа ввести устройство ламинаризации потока, с целью уменьшить начальные возмущения поверхности расплава и соответственно – амплитуду волн, развившихся в результате гидродинамических неустойчивостей, что должно способствовать снижению высоты шероховатости стенок реза.