

**ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ Ш.16.
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ;
ТЕПЛОМАССОБМЕН, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА, НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА
И ТЕХНОЛОГИИ НА ЕЕ ОСНОВЕ**

**Программа Ш.16.1. Теплофизические основы энергоэффективных технологий
(координаторы член-корр. РАН С. В. Алексеенко, докт. техн. наук А. П. Бурдуков)**

В Институте теплофизики им. С. С. Кутаева проведено экспериментальное исследование плотности и теплового расширения твердых и жидких сплавов легкоплавких металлов, предлагаемых в качестве теплоносителей для ядерных энергетических установок нового поколения, бланкетов термоядерных реакторов, а также в качестве альтернативы токсичным свинцовосодержащим пропоям. Получены надежные данные по плотности и коэффициентам теплового расширения сплавов в твердом и жидком состояниях, а также по объемным изменениям при фазовых переходах. Для ряда систем построены концентрационные зависимости термических свойств (рис. 4). Измерены температурные и концентрационные зависимости коэффициентов взаимной диффузии в жидких системах Mg–Pb, Sn–Pb, Bi–In, Bi–Sn, Ag–Sn. Многие экспериментальные результаты получены впервые, на

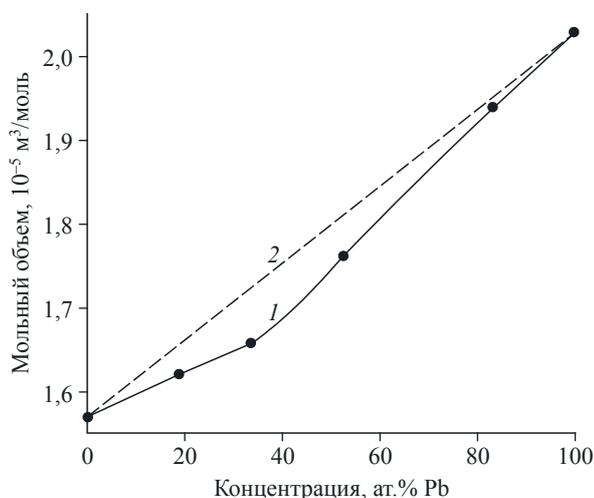


Рис. 4. Концентрационная зависимость мольного объема жидкой системы Mg–Pb при 950 К.
1 — экспериментальные данные и аппроксимации; 2 — идеальный раствор.

основании чего разработаны таблицы справочных данных и оценены их погрешности. Таблицы термических свойств чистых висмута, свинца, олова, галлия, индия, магния, а также сплавов Bi–Pb, Sn–Pb, Ga–In, Mg–Pb эвтектического состава аттестованы и опубликованы Государственной службой стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД) как стандартные справочные данные. Новые надежные систематизированные данные по свойствам сплавов легкоплавких металлов могут служить научной базой для оптимизации технологии использования этих материалов в новой технике и энергетике.

В том же Институте запущен в эксплуатацию крупномасштабный стенд факельного сжигания углей различной степени метаморфизма (рис. 5). Проведенные системные опыты по воспламенению и горению кузнецких углей, сжигаемых на Беловской ГРЭС, позволили разработать и передать заказчику техническое за-



Рис. 5. Стенд с тепловой мощностью до 5 МВт.

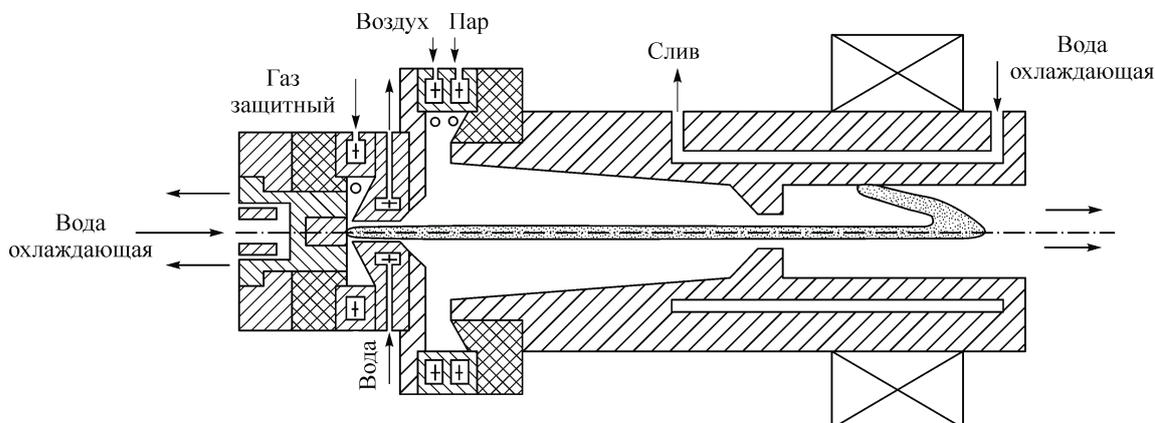


Рис. 6. Схема пароводяного плазмогенератора.

дание на создание безмазутной системы розжига на основе углей микропомолы для котла ПК-40 Беловской ГРЭС. Внедрение разрабатываемой технологии в большую и малую энергетику позволит заменить дорогостоящие газ и мазут на более дешевый вид топлива — механически активированный уголь микропомолы.

Впервые предложено и реализовано научно-техническое решение по созданию пароводяного плазмогенератора нового поколения (рис. 6). Решены следующие проблемы: исключено каплеобразование в водоохлаждаемой разрядной камере; сведены к минимуму пульсации расхода перегретого пара (250—350 °С); не используется дополнительно защитный газ (аргон, азот), поскольку вместо термокатода применяется медный трубчатый электрод, токовая нагрузка на электроды определяется потребной мощностью плазмотрона и не является критическим параметром. При токе дугового разряда 300—400 А мощность плазмотрона составляет 80—100 кВт.

Разработана нестационарная математическая модель для исследования процесса уста-

новления стационарного режима пленочной конденсации движущегося пара в круглой трубе при переходе от нормальной гравитации к микрогравитации и наоборот. Обнаружено, что время установления при переходе к земной силе тяжести из микрогравитации меньше, чем при переходе к микрогравитации, для каналов диаметром больше капиллярной длины (рис. 7). Модель применена к описанию экспериментальных данных по конденсации пара этанола в круглой трубе при различных углах наклона трубы к горизонту и по конденсации FC72 на дисковидном ребре. Расчеты хорошо согласуются с результатами экспериментов, в частности, предсказывают максимум на кривой зависимости коэффициента теплоотдачи от угла наклона трубы (рис. 8) и теплообмен на дисковидном ребре. Результаты послужат основой создания высокоэффективных конденсаторов пара и будут использоваться при планировании экспериментов в параболических полетах и на МКС в условиях переменной и микрогравитации.

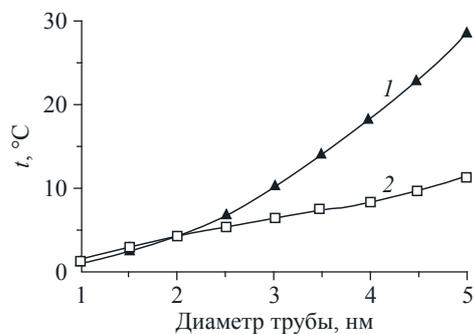


Рис. 7. Время установления стационарного режима.

1 — режим перехода от гравитации к невесомости,
2 — от невесомости к гравитации.

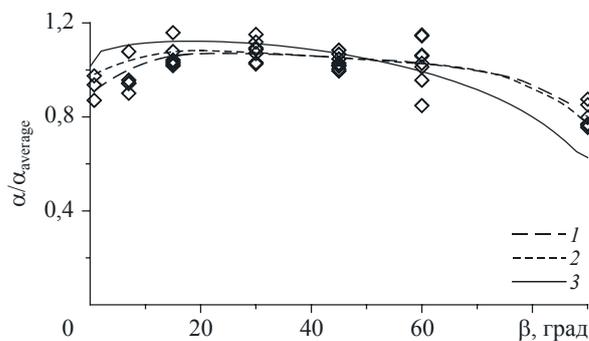


Рис. 8. Коэффициент теплоотдачи:

1, 2 — эксперимент, 3 — расчет;
 β — угол наклона трубы.

Программа Ш.16.2. Турбулентный и ламинарный теплообмен в многофазных средах при наличии фазовых переходов и химических реакций, в том числе в мини- и микроканалах (координатор акад. В. Е. Накоряков)

В Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе в экспериментальных исследованиях динамики переходных процессов и кризисных явлений при кипении наножидкостей при нестационарном тепловыделении впервые обнаружено, что добавление во фреон R-21 наноразмерных частиц SiO_2 (0,1 моль.%, средний размер наночастиц 25 нм, модификация с гидрофильными свойствами) привело к более чем двукратному увеличению скорости распространения самоподдерживающихся фронтов испарения при высоких температурных напорах (рис. 9, 10). Показано, что данный весьма значительный эффект роста скорости фронтов парообразования в наножидкости в области высоких значений числа Якоба связан с более ранним и быстрым развитием мелкомасштабных возмущений на межфазной поверхности фронта вследствие неустойчивости Ландау. Выявлены режимы, сформулированы и определены физические параметры для границ областей при менее интенсивном испарении в наножидкости с гладкой невозмущенной межфазной поверхностью самоподдерживающихся

фронтов, для которых эффект влияния добавления наночастиц не наблюдается. Результаты важны для разработки методов описания развития переходных процессов и кризисных явлений при кипении и испарении жидкостей и наножидкостей, а также для разработки способов интенсификации теплообмена при кипении и определения границ оптимальных и безопасных режимов работы различных типов теплообменников с высокой и нестационарной теплонапряженностью.

В том же Институте на основании численного моделирования и экспериментальных исследований показано, что в вихревом реакторе с центробежным слоем инертных частиц реализуется два разных режима горения: с образованием факела над слоем частиц и без образования пламени с горением в слое (рис. 11). С увеличением интенсивности закрутки расширяется диапазон параметров, обеспечивающих существование «беспламенного» горения, причем содержание оксидов азота снижается в 2—3 раза по сравнению с режимом факельного горения.

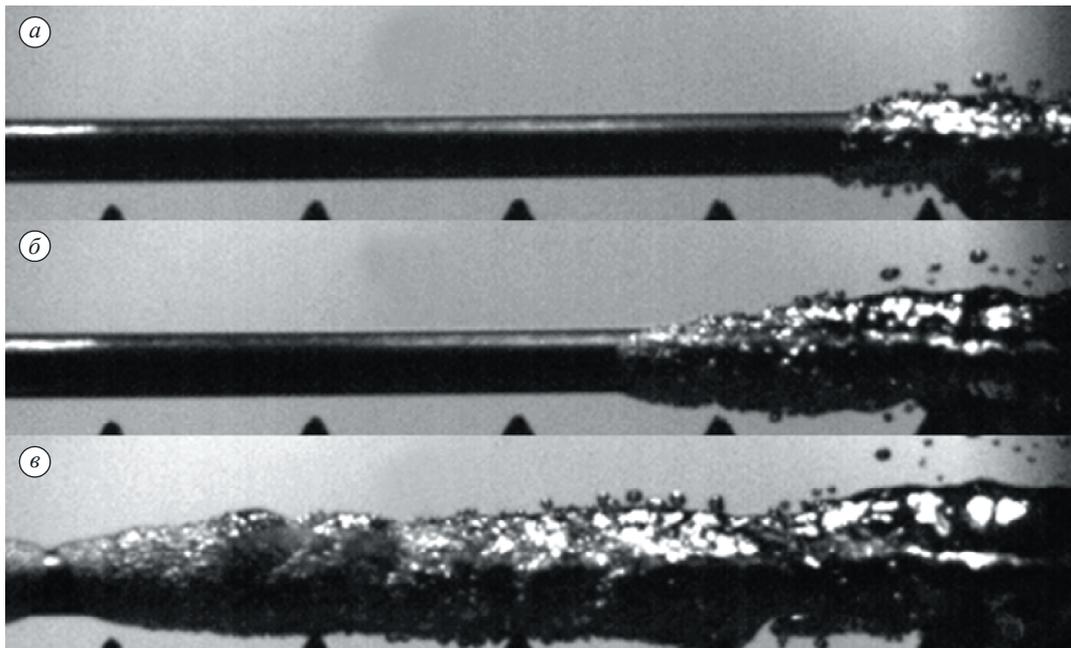


Рис. 9. Распространение самоподдерживающегося фронта испарения в наножидкости при ступенчатом тепловыделении.

a — температурный напор $T_n - T_s = 57$ К, время $\tau = 34,3$ мс; *б* — 64 К, 38,3 мс; *в* — 70,4 К, 42,0 мс.

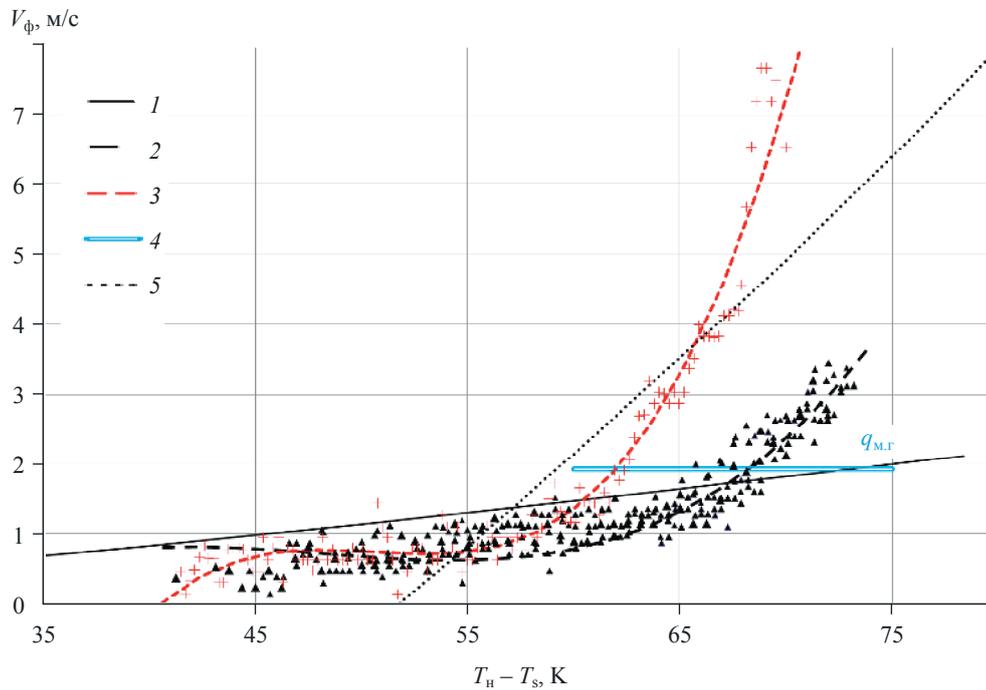


Рис. 10. Зависимость скорости распространения самоподдерживающегося фронта испарения V_ϕ от температурного напора в наножидкости и в чистой жидкости R-21. Ступенчатое тепловыделение. $P = 1,93$ бар; $q = 179$ Вт/см².

1 — расчет по модели Павленко, Лель (1998) для невозмущенного гладкого фронта при $q_{м.г.} < q_{н.л.}$. Опытные данные: 2 — R-21; 3 — наножидкость. 5 — расчет по модели Авксентюка (1995). 4 — теоретический расчет пороговой плотности теплового потока через межфазную поверхность фронта испарения для развития мелкомасштабных быстрорастущих возмущений

$$\text{в R-21: } q_{м.г.} = q_{н.л.} = r \sqrt{2\rho' \rho'' \sqrt{\sigma g / (\rho' - \rho'')}}.$$

Разработана модель турбулентного течения и тепломассопереноса в газочапельном отрывном течении за внезапным расширением трубы. Турбулентность газа оказывает значительное воздействие на процесс распространения дисперсной фазы в области отрыва. Обна-

ружено, что мелкие капли хорошо вовлекаются в рециркуляционное течение и присутствуют по всему сечению трубы. Крупные частицы проходят через сдвиговой слой и практически не попадают в отрывную область. Теплообмен при добавлении капель резко возрастает. Об-

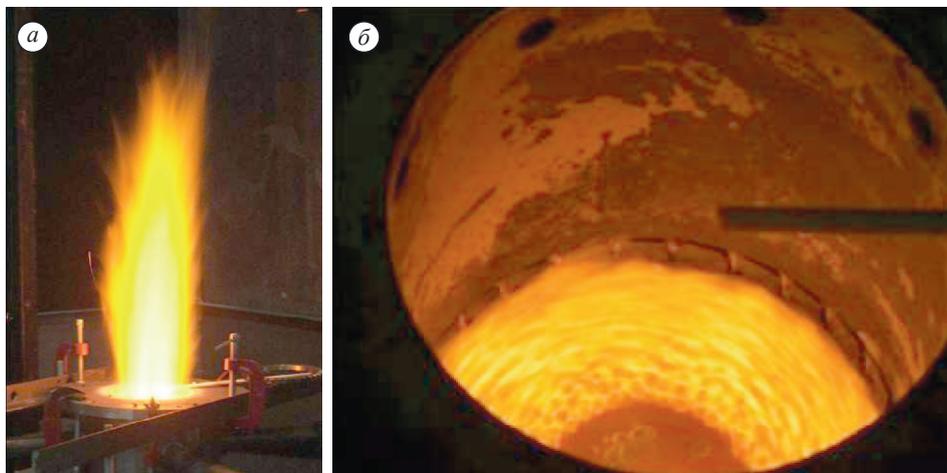
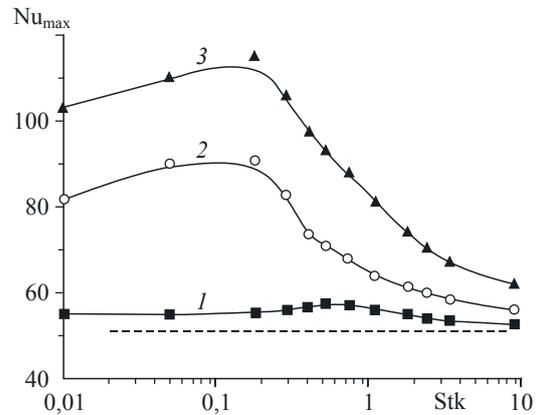


Рис. 11. Режимы газофазного горения с образованием факела (а) и без образования пламени (б).

Рис. 12. Влияние на максимальное число Нуссельта в отрывном газочапельном потоке числа Стокса в осредненном движении.

Штриховая линия — значение теплообмена в однофазном потоке. Массовая концентрация жидкой фазы: 1 — $M_{L1} = 0,01$, 2 — 0,05, 3 — 0,10.

наружены эффект накопления дисперсной фазы в рециркуляционной области и немонотонный характер поведения теплообмена в зависимости от числа Стокса дисперсной фазы (рис. 12). Хорошее согласие с экспериментальными данными говорит об адекватности разработанной модели расчета двухфазного отрывного течения за внезапным расширением трубы.



Программа Ш.16.3. Физико-химические процессы в лазерной и плазменной обработке материалов и в плазмохимических реакторах (координатор докт. физ.-мат. наук А. М. Оришич)

В Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича измерен коэффициент поглощения лазерного излучения в плазме оптического пробоя при сверхзвуковом потоке воздуха в широком диапазоне газодинамических параметров. Определены параметры сверхзвукового течения, обеспечивающие высокие уровни энерговклада в поток и, как следствие, найдена возможность управления структурой потока. Впервые показано, что пороговая плотность воздуха в сверхзвуковом потоке, соответствующая резкому нарастанию эффективности поглощения, равна 1,8—2 кг/м³. Максимальная величина коэффициента поглощения составила 60 % (рис. 13).

В том же Институте впервые проведена лазерная сварка не свариваемых традиционными методами материалов Ti—Cu—сталь 12X18H10T и получена прочность сварного соединения до 400 МПа. В центральной части наплавленного металла его микроструктура представляет композиционный материал, состоящий из медной матрицы и пластинчатых выделений. В корневой части сварного соединения упрочняющие частицы представлены в двух морфологических формах: пластинчатые и округлые выделения. Данный композиционный материал имеет повышенный уровень микротвердости по сравнению с титановым сплавом и сталью 12X18H10T. Со стороны не-

ржавеющей аустенитной стали просматривается тонкий (2—5 мкм) промежуточный слой, на котором со стороны наплавленного металла видны «выпучины» (рис. 14).

Разработана новая физико-математическая модель кинетики кристаллизации металлов и сплавов с учетом нерастворимых наноразмерных инокуляторов. Построены высокоточные численные алгоритмы для решения нестационарных многомерных задач конвективного теплопереноса с фазовыми переходами и выполнена их верификация на основе сравне-

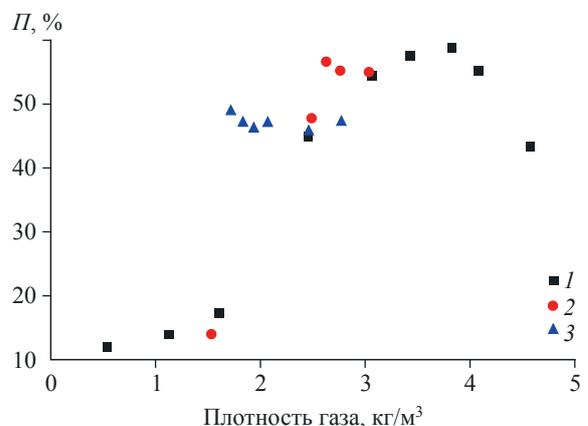


Рис. 13. Зависимость поглощения лазерного излучения в плазме оптического пробоя в сверхзвуковой струе воздуха от плотности газа при разных давлениях (МПа: 1 — 1,5, 2 — 1,15, 3 — 0,8).

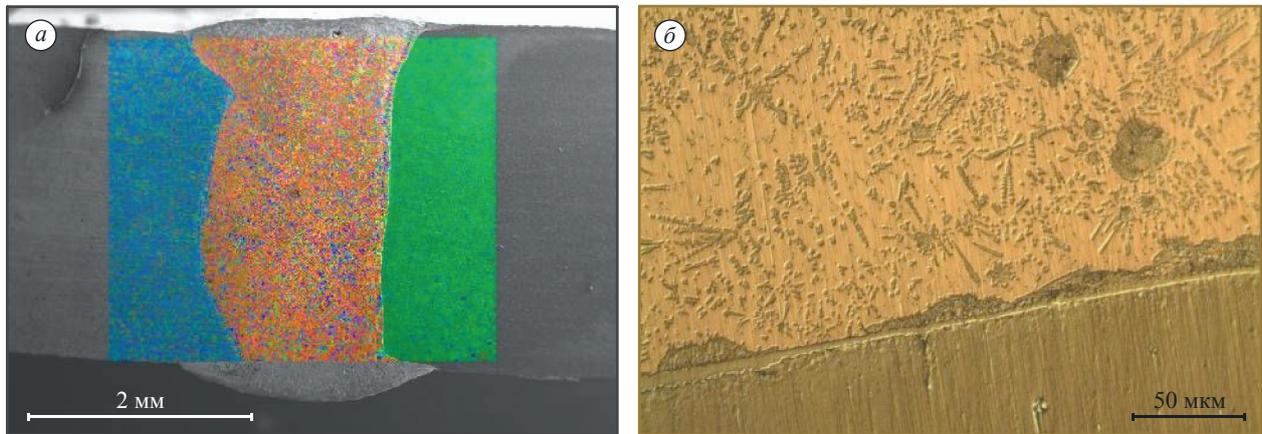


Рис. 14. Сварное соединение Ti—Cu—сталь 12X18H10T (а), граница нержавеющей сталь—композит (б).

ния с данными физического эксперимента (рис. 15).

Разработана методика и создана установка визуализации процессов, протекающих внутри реза, при лазерном раскрое типовых металлов CO₂- и волоконными лазерами. Проведена регистрация скорости распространения периодических волн горения вдоль фронта реза, дано описание устойчивых и неустойчивых режи-

мов резки, получено экспериментальное подтверждение теории происхождения шероховатости и других дефектов реза. Найдены условия перехода резки от устойчивого режима с хорошим качеством поверхности к автогенному неуправляемому режиму, когда металл горит по всей поверхности контакта с газовой струей и процесс носит выраженный нестационарный характер (рис. 16).

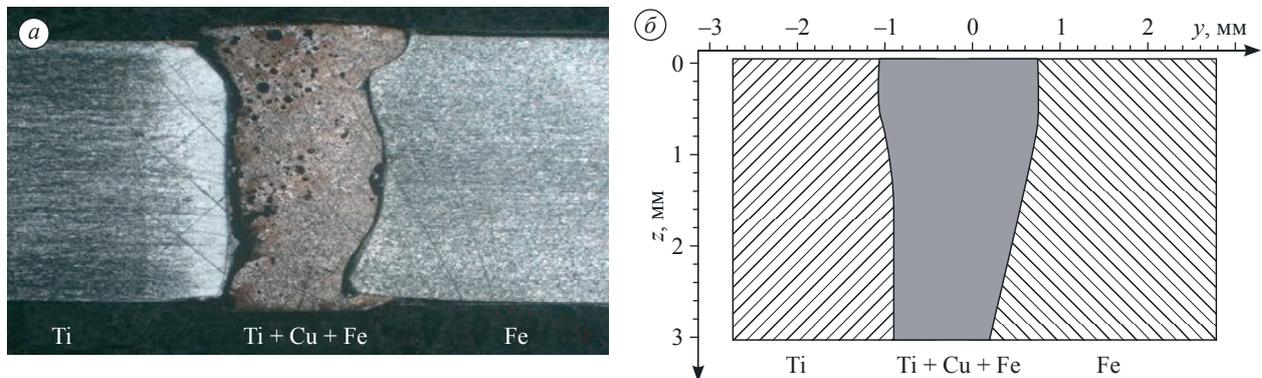


Рис. 15. Шлиф поперечного разреза сварного шва между пластинами из титана и стали с медной вставкой (а) и поперечное сечение сварочной ванны, полученное численным расчетом (б).

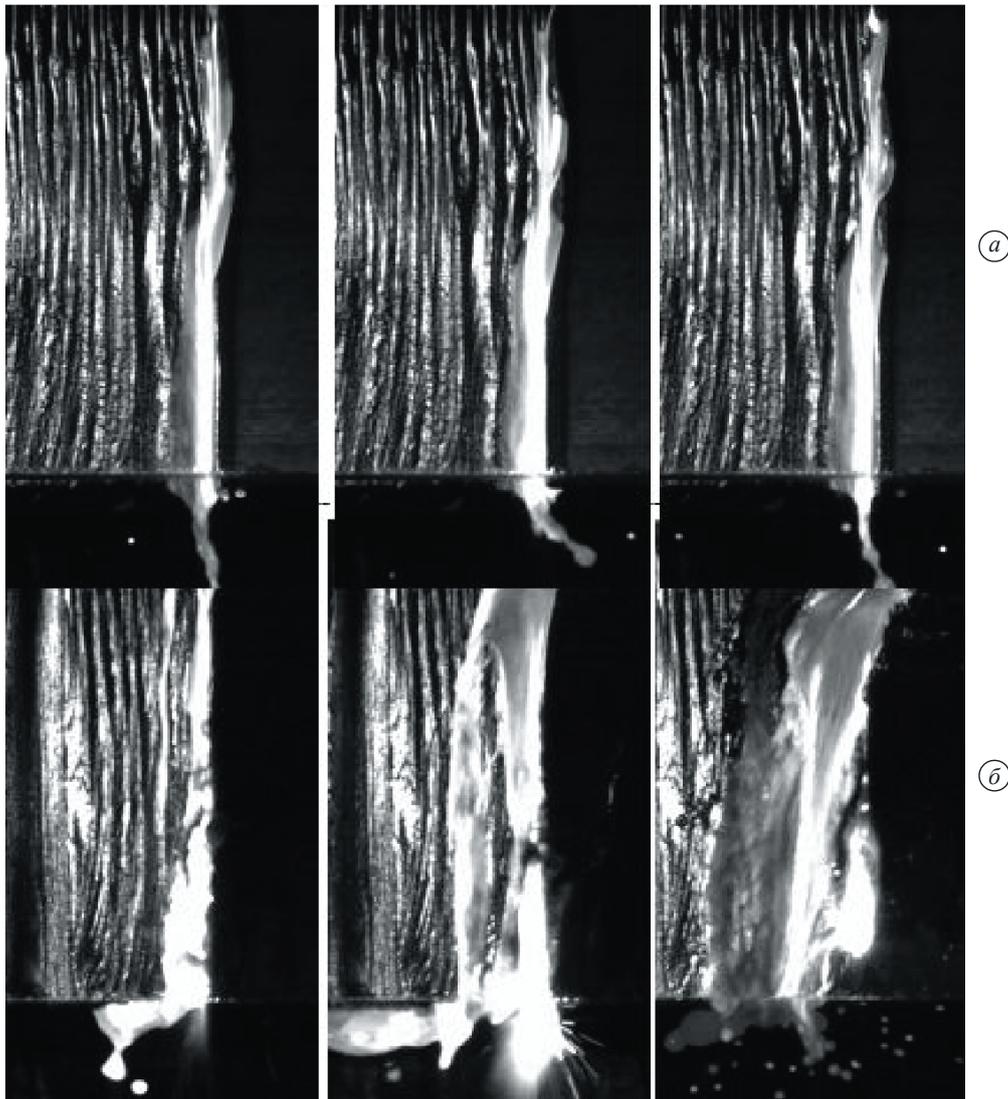


Рис. 16. Кадры киносъемки кислородной лазерной резки малоуглеродистой стали: нормальный (*a*) и автогенный (*б*) режимы.

Толщина листа 12 мм, мощность волоконного лазера 2 кВт, скорость резки 20 мм/с, давление кислорода 1,7 атм, интервал между кадрами 10 мс.