



## СВАРИВАЕМОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ СВАРКИ МАТЕРИАЛОВ

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проанализированы существующие способы соединения материалов с учетом агрегатного состояния вещества в зоне соединения. Отмечена необходимость пересмотра термина «свариваемость» и разработки обобщенного количественного критерия его оценки. Высказаны необходимые предпосылки для создания перспективных, в том числе гибридных процессов сварки.

*Ключевые слова:* сварка, неразъемное соединение, сварка плавлением, сварка давлением, парогазовое состояние, свариваемость, обобщенный критерий, перспективные процессы соединения

Со дня официальной регистрации электрической дуги как источника нагрева для сварки металлов прошло более 110 лет. За это время сварка плавлением как технологический процесс соединения металлических материалов заняла прочное место среди других. Высокая эффективность, низкая стоимость и универсальность способствовали его широкому развитию и применению для соединения сначала простых сталей на основе железа, затем сложнoleгированных и, наконец, сплавов различных металлов. С использованием электрической дуги, которая сегодня доминирует среди других источников локального нагрева, выполняется абсолютное большинство сварочных работ (возможно более 80 %). В условиях сварки плавлением соединение материалов происходит путем их расплавления, т. е. через жидкую фазу.

На протяжении последних десятилетий поставлены и реализованы задачи по созданию других способов соединения металлов. Получили промышленное применение процессы сварки давлением металлов в твердой фазе, основанные на известной ранее схеме соединения металлов, доведенных до пластичного состояния за счет необходимой степени сжатия (например,ковки) при нормальных или повышенных температурах. К ним относятся холодная сварка (соединения алюминия, меди, низкоуглеродистой стали), диффузионная, сварка трением, контактная сварка сопротивлением, сварка взрывом, магнитно-импульсная, сварка прокаткой заготовки для получения би- и триметаллического листа и др. В этих процессах реализована возможность формирования соединения металлических материалов в условиях нахождения их во втором агрегатном состоянии, т. е. в твердой фазе.

Примерно 40...50 лет назад начались исследования по использованию для соединения металлов третьего агрегатного состояния — газообразного. Вещество превращалось в парообразное состояние, а затем конденсировалось на основе (подложке). При этом обеспечивался физический контакт и соединение конденсированного вещества

с основой. В качестве испаряемого, т. е. конденсируемого материала подложки, могли использоваться любые вещества (металлы и неметаллы) в необходимом сочетании. Это обусловлено тем, что в парообразном состоянии смешивание материалов происходит в их количественных соотношениях, соответствующих стехиометрическим. Получили развитие такие процессы соединения (прежде всего при нанесении покрытий), как физическое (PVD) и химическое (CVD) осаждение из паровой фазы — соответственно физическая и химическая паровая конденсация материалов на основу. В первом случае реализована способность конденсирования испаряемого вещества из парогазообразной фазы в виде чистого металла или сплава на основу из другого, не участвующего в образовании паровой фазы вещества. Во втором — возможность образования нового вещества путем химического взаимодействия с поверхностью подложки активного вещества, находящегося в газообразном состоянии. Например, образование слоя из нитридов титана на поверхности титановой подложки в результате реакции с газообразным азотом. Может быть реализована также комбинация процессов PVD и CVD. Важным является тот факт, что одновременно с конденсацией (химической реакцией) достигается получение высококачественного соединения разных по своей природе материалов.

Вакуумные парогазовые физические и химические процессы получили интенсивное развитие и реализованы в многочисленных технологиях. Таким образом, в большей или меньшей мере на практике в виде конкретных технологий реализованы способы сварки материалов с использованием всех трех видов агрегатного состояния вещества (твердой, жидкой и парогазовой фаз) в зоне соединения (рис. 1).

Очевидно, что может быть использовано и четвертое агрегатное состояние вещества (ионное), т. е. когда материалы находятся в состоянии высокозаряженных частиц ионов и переносятся на соединяемую поверхность при наличии соответствующих условий.

В перечисленных выше агрегатных состояниях вещества образование неразъемных соединений связано с локальным или общим тепловым воздействием на свариваемый материал. В связи с

этим возникают условия, изменяющие его структурное и напряженно-деформированное состояние.

Различные материалы реагируют на изменения в зоне соединения и прилегающей зоне неодинаково, в зависимости от их теплофизических свойств, полноты структурных превращений, возникших от вводимой тепловой энергии, и целого ряда других факторов, характерных для данных условий сварки. Весь этот комплекс изменений определяет способность материала к образованию неразъемного соединения с обеспечением некоего заданного уровня служебных свойств. В научной литературе эта способность материала определяется термином «свариваемость».

Очевидно, что при анализе или разработке перспективных процессов соединения (сварки) материалов целесообразно учитывать такие факторы: агрегатное состояние материала непосредственно в зоне шва, при котором осуществляется технология соединения материала;

влияние технологии на структурное и напряженно-деформированное состояние сварного соединения в целом;

взаимосвязь технологии и обобщенной характеристики свариваемости (соединяемости) материалов;

экономические, экологические и социальные особенности процесса.

При этом особую важность приобретает возможность использования объективных критериев оценки соединяемости (свариваемости) конструктивных материалов.

Исходя из отмеченного, попытаемся уточнить термин «свариваемость» материалов, а также рассмотрим некоторые существующие и перспективные процессы соединения конструктивных материалов.

**Свариваемость.** Вопросу свариваемости материалов за все годы существования сварочной науки уделялось большое внимание. Существуют десятки национальных нормативных документов и международных стандартов, в которых сделана попытка регламентировать термин «свариваемость» материалов. В то же время публикации последних лет только подтверждают, что изучение свариваемости остается одной из наиболее важных и первоочередных задач мирового уровня. Постепенно термин «соединение» вытесняет термин «сварка». На наш взгляд, изменение в терминологии имеет концептуальный характер, заключающийся в более общем понимании самих условий получения неразъемных соединений из любых материалов. Непосредственно сварной шов может образовываться и без стадии плавления материала, а также не иметь четко выраженных размеров и признаков.

Если рассматривать современные материалы, из которых следует изготавливать сварные конструкции, то многие из них исходя из существующих представлений о свариваемости относятся к трудносвариваемым или вообще к несвариваемым. Тем не менее, получение неразъемных соединений таких абсолютно хрупких материалов, как керамика, стекло, высокопрочные стали и сплавы, чугуны, композиты, монокристаллы, сегодня являются ре-

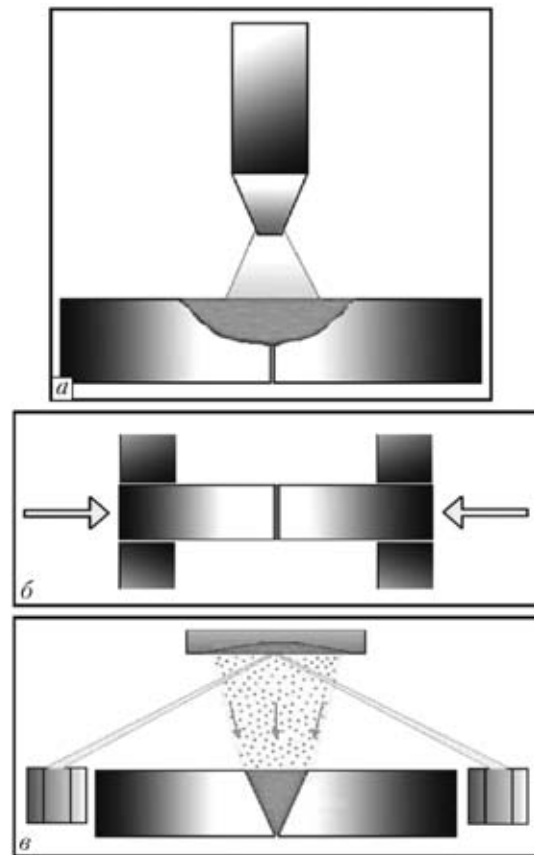


Рис. 1. Состояние материалов в зоне соединения: а — жидкая фаза; б — твердая; в — парогазовая

альностью. Назрела необходимость в новом толковании термина свариваемости (соединяемости) материалов.

Очевидно, что термины «свариваемость» и «соединяемость» должны учитывать комплекс сведений о соединяемом материале (химический состав и структурные состояния); влияние предполагаемой технологии на сваренный (соединенный) материал, структурное, термонапряженное состояние, образование дефектов, свойств; влияние внешней среды на сваренный (соединенный) материал при эксплуатации в изделии (изменение во времени структуры и свойств, вызванных наличием сварного соединения в изделии).

Практически во всех известных, в том числе международных и национальных стандартах, в определениях свариваемости упоминается, что необходимы «соответствующий технологический процесс», «определенный процесс и определенная технология», «подвергается сварке любым способом» и «без специальных мер» (в случае совершенной свариваемости), «при установленной технологии», т. е. влияние технологии как таковой на свариваемость упоминается, однако рекомендации носят условный или философский характер.

Во всех случаях в том или ином виде определение свариваемости включает учет таких понятий, как «собственное качество свариваемых деталей и конструкций, которые они образуют», или «сварные швы должны удовлетворять соответствующим требованиям по свойствам и влиянию на



## Свариваемость различных материалов с учетом их агрегатного состояния в зоне соединения

Тип материала	Свариваемость методом плавления	Свариваемость (соединяемость) с учетом агрегатного состояния вещества		
		Жидкая фаза	Твердая фаза	Парогазовая фаза
Высокопрочные алюминиевые сплавы	Ограниченная	Ограниченная	Хорошо свариваемые	Хорошая
Высокопрочные титановые сплавы	»»	»»	»»	»»
Высокопрочные стали	Трудносвариваемые	Трудносвариваемые	Ограниченно свариваемые	»»
Никелевые суперсплавы	Несвариваемые	Несвариваемые	»»	»»
Интеллектуальные сплавы	Ограниченно свариваемые	Ограниченная	»»	»»
Гранулированные сплавные порошковые материалы	»»	»»	»»	»»
Аморфные, микрокристаллические материалы	»»	»»	Не исслед.	»»
Наноструктурные материалы	Несвариваемые	Несвариваемые	Ограниченно свариваемые	Ограниченно свариваемые
Полимерные композитные материалы	»»	»»	»»	Хорошая
Интерметаллиды:	»»	»»	»»	»»
на основе Al ( $Al+B_2Al+SiC$ )	»»	»»	Несвариваемая	»»
на основе Ti ( $Ti_3Al$ ( $\alpha$ -фаза), $TiAl$ , $Ti_3Al$ ( $\gamma$ -фаза))	»»	»»	Хорошая	»»
на основе Ni ( $Ni_3Al$ , $NiAl$ , $NiAl-Mo$ )	»»	»»	Трудная	»»
на основе Co ( $Co_xAl_y$ )	»»	»»	»»	»»
Керамика	»»	»»	Несвариваемая	»»
Адаптированные композитные материалы	»»	»»	Ограниченно свариваемые	»»
Упрочненные углеродным волокном пластики (АКМ-1U)	»»	»»	»»	»»
Металлополимерные материалы	Ограниченно свариваемые	Ограниченно свариваемые	»»	»»

конструкцию», или «получения соединения, свойства которого позволяют полностью использовать материал», или «сварное соединение должно отвечать требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия», т. е. в этих понятиях просматривается субъективность оценки свойств соединений, которые будут получены.

На основе многолетнего мирового опыта использования сварки можно выдвинуть следующие положения, учет которых необходим при уточнении понятия свариваемости:

свариваемость (соединяемость) является свойством материала;

свариваемость (соединяемость) в привычном представлении изменяется в зависимости от технологии, применяемой для данного вида конструкций;

свариваемый материал может переходить в несвариваемый (таблица) с изменением технологий, и наоборот;

технологические процессы соединения для разных агрегатных состояний формирования шва различны как по своему физическому принципу, так и тепловому (силовому) воздействию на свариваемый (соединяемый) материал;

тепловое и силовое воздействия на шов и зону термического влияния для разных технологических процессов оказывают различную степень влияния на структурные, физико-химические, механические и другие функциональные свойства материалов;

тепловые и силовые воздействия оказывают влияние на величину, характер протекания и фик-

сированную величину текущих и остаточных напряжений, а также деформаций в сварном (соединяемом) материале и соединении в целом;

технологический процесс и сопутствующее ему тепловое и силовое воздействия на материал, а также напряженно-деформированное состояние определяют уровень деградации материала. Последний оценивается по отношению к исходному материалу или требованиям допускаемых показателей функциональных свойств и качества как в процессе изготовления, так и эксплуатации конструкций.

Выдвинутые положения позволяют предложить новую формулировку свариваемости (соединяемости) материалов. *Свариваемость (соединяемость) — свойство материала образовывать неразъемное соединение с требуемым качеством и уровнем физико-механических и функциональных свойств соединения как в процессе его получения, так и при эксплуатации изделия. Свариваемость определяется степенью деградации свойств соединения в целом и рассчитывается как интегральный показатель.*

Управление свариваемостью может осуществляться на основе варьирования степени деградации.

**Совершенствование способов соединения материалов.** Наличие и использование трех агрегатных состояний вещества при формировании шва и соединения в целом, а также естественное желание обеспечить при этом минимальную деградацию материала служат основой для разработки

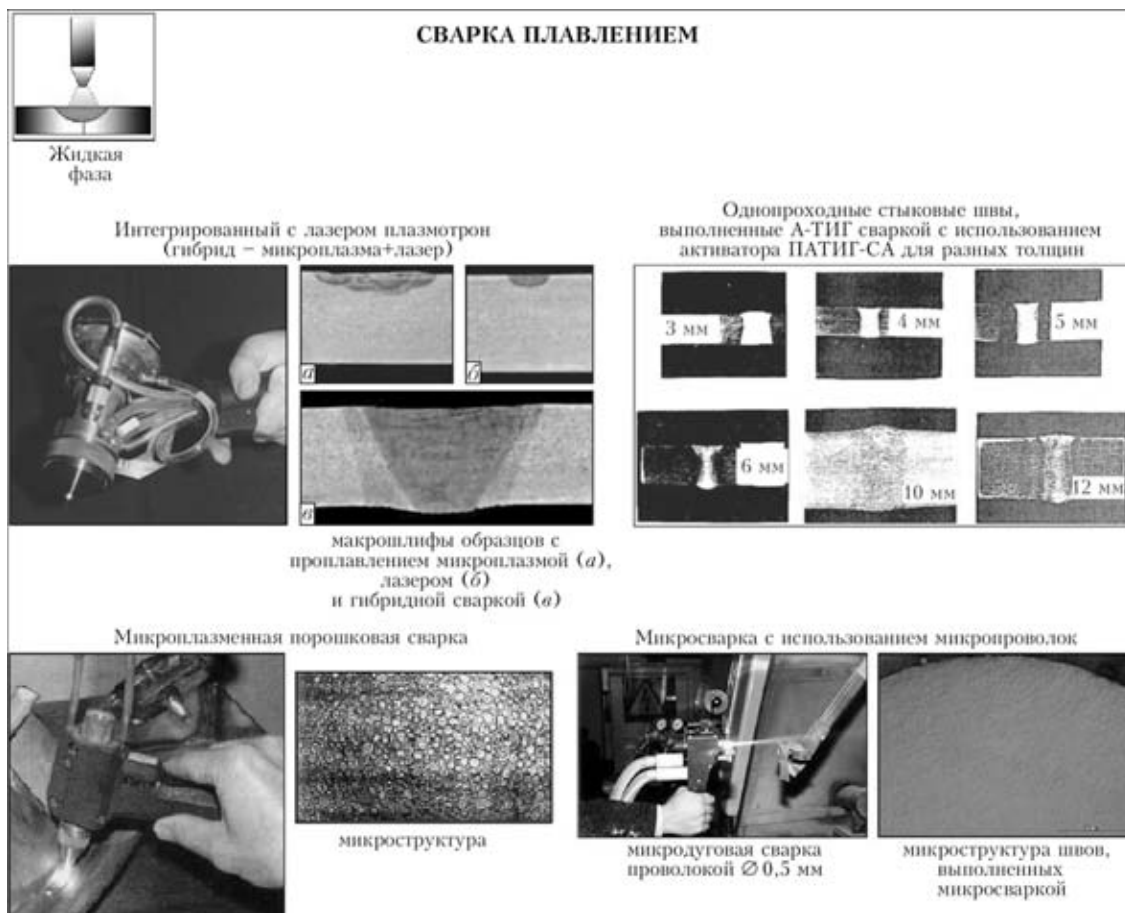


Рис. 2

новых или совершенствования известных технологических процессов. Как уже упоминалось выше, под деградацией подразумевается не только фактическое изменение химического, структурного состава материала, но и его термонапряженное состояние, изменение свойств как в процессе получения соединения (изделия), так и в процессе его регламентированной эксплуатации. Необходимость обеспечения минимально допустимой степени деградации при реализации технологии у соединения накладывает определенные ограничения или требования к самому процессу. В общем виде они могут сводиться к следующему: минимально возможное тепловложение в зону образования соединения; управление структурным и химическим составами, а также свойствами материала в зоне соединения; максимально возможные ограничения размера шва и зоны термического влияния; управление напряженно-деформированным состоянием при получении соединения; экономичность и экологическая безопасность процесса.

Рассмотрим с этой точки зрения некоторые перспективные процессы соединения.

**Соединение (сварка) плавлением.** По объемам применения классическая дуговая сварка плавлением еще долгие годы будет господствовать над остальными (электронно-лучевой, лазерной и др.). Тем не менее, все больше возникает необходимость в создании новых способов соединения (сварки) материалов. Наиболее существенные причины этого следующие:

электрическая дуга как концентрированный источник нагрева (введение тепла в свариваемый материал) утратила свое первенство по сравнению с электронно-лучевым, лазерным способами и теперь гибридными процессами;

в процессе расплавления дугой основного и присадочного металла и формирования шва возникают необратимые изменения в сварном соединении. Это относится к остаточным напряжениям и деформациям, структурным состояниям металла, изменяемым в худшую сторону в результате различных теплофизических и структурно-чувствительных свойств свариваемого материала. И только специальные приемы, такие, как подогрев или последующая термическая обработка, устраняют этот недостаток при сварке, например, высокопрочных сталей;

появилось значительное количество новых конструкционных материалов, которые по целому ряду условий в общепринятых терминах относятся к «несвариваемым» или «ограниченно свариваемым» при дуговой сварке, т. е. с помощью классической дуги получить функционально пригодные сварные соединения из них не представляется возможным. Другими словами, нагрев электрической дугой переводит эти материалы (композиты, интерметаллиды, полимерные пластины, аморфные стекла, микрокристаллические материалы с наноструктурой и др.) в разряд «несвариваемых»;

необходимость значительного введения объема присадочного металла для формирования шва, а кроме того, операции по подготовке кромок, из-



Рис. 3

готовлению и расходу проволок, электродов, флюсов, что значительно удорожает и усложняет производство конструкций.

Среди новых перспективных процессов плавлением следует отметить (рис. 2) различные комбинации гибридных процессов (лазер + плазма; лазер + ТИГ и др.), ТИГ сварку с применением активирующего флюса; микродуговую сварку с использованием микропровода диаметром 0,4...0,6 мм; микроплазменную порошковую сварку и наплавку с использованием ультрадисперсных порошков, в том числе из композиционных материалов; реактивно-диффузионную сварку.

В этих процессах реализуется возможность снижения теплового воздействия дуги при одновременном повышении эффективности плавления и снижения размеров шва и соединения в целом. Очевидно, что активация и локализация процесса плавления свариваемого металла будет и в дальнейшем одним из перспективных направлений.

Особое внимание заслуживает реактивно-диффузионный способ соединения в минимальный зазор, что позволяет получать прецизионно точные изделия сложной формы.

**Соединение в твердой фазе.** Многие годы успешно используется контактная сварка оплавлением и сопротивлением. Различные виды конденсаторной сварки, сварки трением, диффузионной сварки и сварки взрывом доказали возможность соединения трудносвариваемых, в том числе разнородных материалов с достаточно высоким качеством и меньшей степенью деградации, чем при сварке плавлением.

Особый прорыв достигнут в сварке трением. Очевидно, что сварка в твердой фазе или квазитвердом состоянии будет интенсивно развиваться. Следует ожидать, что будут найдены эффективные пути активации поверхности деталей, соединяемых в твердой фазе. Это позволит снизить вводимую энергию для образования соединения, а значит и уменьшить последующую деградацию материала.

Среди новых процессов соединения в твердой фазе (рис. 3) заслуживают внимания следующие: различные модификации сварки трением; диффузионная сварка материалов с прослойками, активирующими процесс соединения; разрядно-импульсная сварка с испаряемой промежуточной прослойкой, конденсацией и имплантацией вещества расходуемого электрода; магнитно-импульсная и ударная сварка в вакууме; прессовая сварка нагревом кромок дугой, вращающейся в магнитном поле; модификации сварки взрывом.

**Соединение с использованием парогазового состояния вещества.** Этот вид соединения получил распространение при нанесении покрытий. Наиболее перспективным является испарение металла с использованием электронного луча (PVD). Этот процесс позволяет получать в качестве монолитного материала (в том числе в зоне соединения) различные по своему строению композиции.

На рис. 4 приведена схема процесса электронно-лучевого испарения материалов, показаны микроструктуры композиционных материалов на основе металла и керамики, а также изделия в виде конструкционного материала и термобарьерных покрытий. Соединение между разнородными ма-

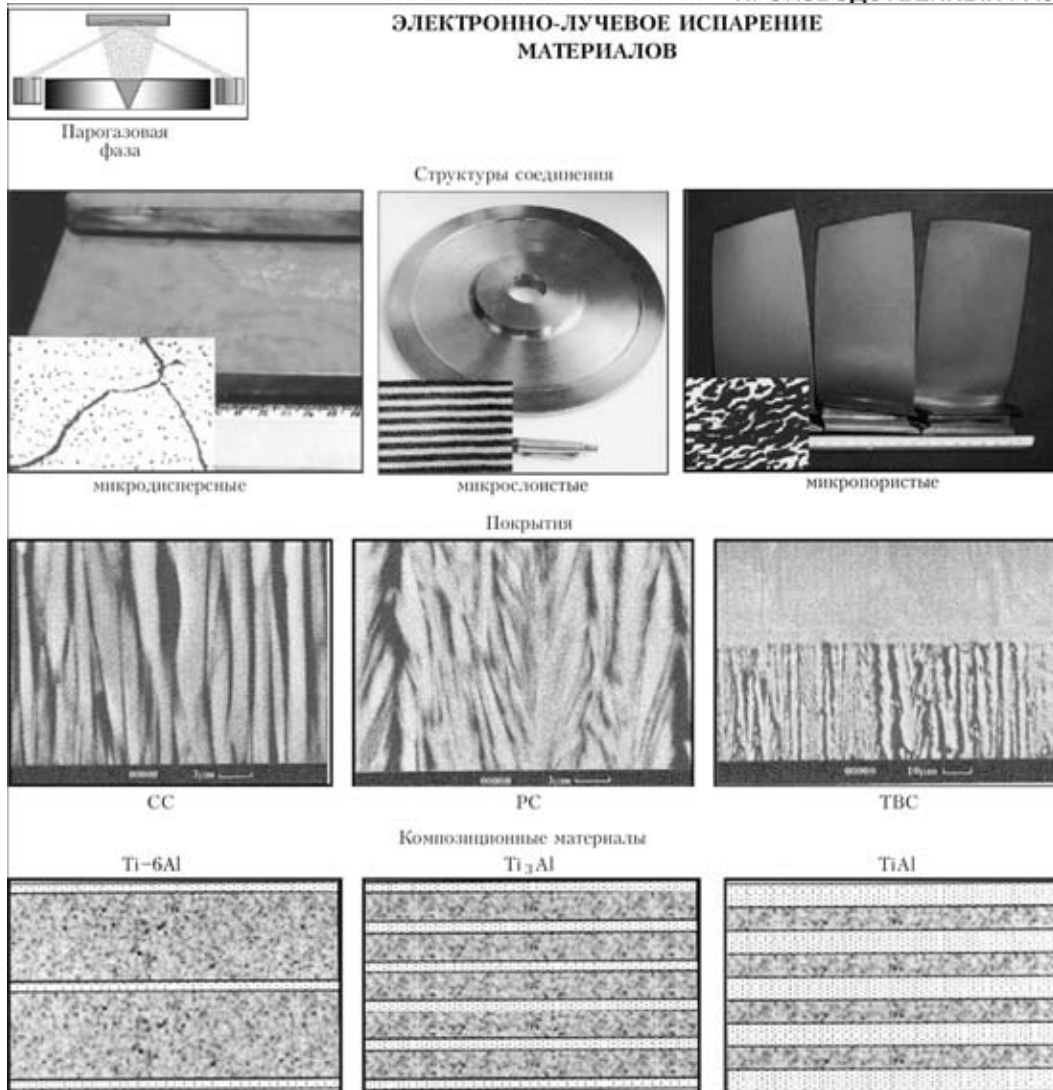


Рис. 4

териалами (металл + керамика) осуществляется с высокой степенью качества и низкой деградацией свойств. Этот принцип получения композиционных материалов, в том числе при образовании соединения (шва), перспективен и как процесс, и как система легирования непосредственно шва.

### Выводы

1. Надежные соединения многих материалов достигаются благодаря нахождению в зоне соединения веществ в различном агрегатном состоянии.

2. Предлагается рассматривать соединяемость (свариваемость) как свойство материала и оценивать это свойство в зависимости от используемой технологии соединения по степени деградации материала по сравнению с этим материалом в исходном состоянии.

3. Соединяемостью (свариваемостью) можно управлять посредством изменения деградации материалов.

Available methods for materials joining, allowing for an aggregate state of a material within the joining zone, are analysed. The need to revise the term «weldability» and develop a generalised quantitative criterion for evaluation of weldability is noted. The necessary premises for development of advanced, including hybrid, welding processes are presented.

Поступила в редакцию 05.07.2004