

19. Устройство для полирования полых металлических изделий: пат. 984 Респ. Беларусь, МПК7 С 25 F 7/00 / С.В. Ващенко, И.С. Куликов, А.М. Дергай, В.И. Василевский, В.Л. Ермаков, Л.Г. Лукашевич; Ин-т проблем энергетики Академии наук Беларуси. – № 236 А; заявл. 06.04.93; опубл. 15.12.1995 // Афіцыйны бюл. / Нац. Центр інтэлектуал. уласнасці. – 1995. – № 4. – Ч 1.

20. Устройство для электролитно-плазменной обработки изделий сложной формы: а. с. 1659534 СССР, МКИ5 С 25 F 7/00 / В.К. Станишевский, А.А. Кособуцкий, Н.Я. Тапунов, В.Е. Владюк, П.Ф. Андрищенко, В.А. Цытик; Белорус. политех. ин-т. – № 4719467; заявл. 13.07.89; опубл. 30.06.91 // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 24.

21. Способ электролитно-плазменного изделий сложной формы: а. с. 1775508 СССР, МКИ5 С25 А 3/16 / В.К. Станишевский, А.А. Кособуцкий, Г.Е. Слепнев, Л.М. Семенов, А.Э. Паршута, В.А. Хлебцевич; Белорус. политех. ин-т. – № 4313121; заявл. 15.10.87; опубл. 15.11.92 // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 42.

22. Семченко, Н.И. Коррозионное поведение аустенитных нержавеющей сталей после электролитно-плазменного полирования / Н.И. Семченко, А.Ю. Королев [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: <http://www.isuct.ru/istarc2008/PROC/4-18.pdf>. – Дата доступа: 21.01.2015.

23. Алексеев, Ю.Г. Комплексная технология изготовления изделий медицинской техники, основанная на пластическом деформировании и физико-технических методах / Ю.Г. Алексеев, В.Н. Страх, А.Ю. Королев // Литье и металлургия. – 2005. – № 4. – С. 180–187.

**УДК 621.923.7**

**Синькевич Ю.А.**

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИЗМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
ПРОВОДИМОСТИ ПАРОГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ  
АНОДНОЙ ОБРАБОТКИ**

**Белорусский национальный технический университет**

**Минск, Беларусь**

*Приведен обзор литературных данных о гипотезах и механизмах электрической проводимости парогазовой оболочки для четырех режимов электролитной анодной обработки: коммутационного, электролитно-плазменного нагрева, электрогидродинамического и электролитно-разрядного. Показано, что, несмотря на проведенные многочисленные экспериментальные и теоретические исследования электрической проводимости, тесно коррелированной с механизмами съема металла, сглаживания профиля поверхности и формирования топографии, механизм электрической проводимости парогазовой оболочки и его основные закономерности в условиях электроимпульсного полирования до сих пор не установлены.*

Анодное растворение металла в водных растворах электролита приводит к сглаживанию шероховатости поверхности. Поэтому для повышения качества поверхности деталей различного назначения теоретический и практический интерес представляют исследования физико-химических закономерностей анодного процесса, в частности, исследование электрической проводимости парогазовой оболочки (ПГО), тесно коррелированной с механизмами съема металла, сглаживания профиля поверхности и формирования топографии в условиях электроимпульсного полирования.

Повышенное напряжение на электродах и сплошная ПГО около поверхности металлического анода приводят к тому, что механизм прохождения электрического тока в системе «водный раствор–ПГО–металлический анод» принципиально отличается от механизма прохождения тока в режиме электролиза. На основании результатов спектральных исследований излучения ПГО в коммутационном режиме [1], режимах электролитно-плазменного нагрева [2] и электролитно-разрядном [3] авторы работ делают вывод о наличии в ПГО электрического разряда. В спектрах излучения обнаружены линии и полосы атомарного водорода и кислорода, радикала ОН и линии, связанные с компонентами раствора электролита.

Особенностью электрического разряда в ПГО при электролитной анодной обработке является отсутствие электронной проводимости в электролите в его обычном состоянии и низкая температура электролитного катода – в приразрядной области она меньше критической температуры воды равной 374 °С. Однако факт наличия и генерации валентно несвязанных электронов в приразрядном слое электролитного катода экспериментально доказан для электролитно-разрядного режима обработки [4]. Следует отметить, что специфика электролитного катода резко ограничивает возможные механизмы эмиссии электронов из электролита.

Механизм дискретной электрической проводимости ПГО при электролитно-плазменном нагреве предложен авторами работы [5]. В эксперименте анод предварительно нагревался переменным электрическим током до температуры 700–900 °С, после чего на него подавалось напряжение 150 В и проводились спектральные исследования излучения ПГО. Возникновение электрической проводимости в ПГО не сопровождалось никакими визуально наблюдаемыми изменениями цвета свечения ПГО. Спектр свечения, полученный с помощью монохроматора в видимой области, соответствовал излучению нагретого тела (анода). На основании этого авторы сделали вывод об отсутствии электрических разрядов в ПГО и предложили режим электролитно-плазменного нагрева называть режимом анодного электролитного нагрева. По их мнению, электрическое поле в ПГО изменяет состояние иона вне электролита. Вместо потенциального порога возникает потенциальный барьер, облегчающий эмиссию заряженных частиц в ПГО (эффект Шоттки). Эмиссия происходит в местах наибольшего приближения к аноду колеблющейся поверхности раздела «водный раствор–пар», поскольку именно там достигается наиболее высокая напряженность поля и концентрация избыточных ионов. Такие участки играют роль временных центров эмиссии ионов. Перенос заряда носит импульсный характер, а наблюдаемый электрический ток является суммой перекрывающихся во времени импульсов тока из различных центров эмиссии. Повышение анодного напряжения приводит к увеличению концентрации избыточных зарядов в центрах эмиссии, ускоряет их перенос на анод и вызывает увеличение амплитуды и снижение длительности элементарного импульса тока из одного центра эмиссии. Низкочастотные пульсации электрического тока авторы работы связывают с колебаниями поверхности раздела «электролит–пар». Однако возможный механизм эмиссии ионов из электролита в ПГО авторами не раскрывается.

В монографии [6] авторы, основываясь на результатах анализа литературных источников и данных собственных экспериментальных исследований пробоя воздушного межэлектродного промежутка в системе «металлический электрод–воздух–электролитный электрод», предложили физическую модель прианодной области, согласно которой в ПГО наряду со стационарным тлеющим разрядом эпизодически возникают искровые разряды. В местах наибольшего сближения электролита с поверхностью анода под действием высокой напряженности электрического поля происходит распыление электролита с образованием электризованных микрокапель, что приводит к возникновению искровых разрядов. Авторы также полагают, что искровые разряды могут возникнуть и непосредственно между поверхностью анода и электролитом на участках, где толщина ПГО становится достаточно малой. В этом случае при бомбардировке положительными ионами поверхности электролитного катода на границе «ПГО–электролитный катод» выбиваются отрицательно заряженные ионы и электроны, в том числе гидратированные. В результате последующей ионизации атомов и молекул ПГО, производимой выбитыми электронами и ионами, возникает электрический разряд в ПГО, который обеспечивает электрическую проводимость ПГО. Кроме того, существенную роль в образовании свободных электронов, по мнению авторов, могут играть химические реакции в прикатодной области и области электрического разряда.

Экспериментальным исследованиям характеристик разряда в ПГО в режиме электролитно-плазменного нагрева посвящены многочисленные работы. Измеренные величины приэлектродных падений потенциалов в электролитной плазме оказались на порядок ниже соответствующих величин для тлеющих разрядов и ближе к падениям в дуговых разрядах [2]. Поскольку экспериментально наблюдаемый характер распределения потенциалов в электролитных разрядах отличался от распределений во всех известных типах электрических разрядов, то, по мнению авторов, разряд в электролитах является новым типом разряда, а нагрев анода обеспечивается током заряженных частиц, преимущественно ускоренных ионов.

Однако возможный механизм эмиссии ионов из электролита в ПГО авторами работ не раскрывается.

В работе [7] на основании теоретических модельных исследований разряда в режиме электролитно-плазменного нагрева авторы делают вывод о том, что электрический ток в ПГО обязан своим существованием тепловому испарению ионов с поверхности электролитного катода. Испаренные ионы в плазме разряда сталкиваются с нейтральными молекулами и атомами ПГО, в том числе возбужденными. Авторы полагают, что в результате этих столкновений происходит освобождение электронов, которые порождают электронные лавины, обеспечивающие электрический ток в ПГО и способствующие появлению в оболочке большого количества положительно заряженных ионов.

В монографии [8] на основе обширного анализа литературных данных показано, что эмиссия электронов из электролитного катода в область тлеющего разряда не может обеспечиваться известными механизмами эмиссии электронов из металлов и других твердых тел (термоэлектронной, термополевой, автоэлектронной, потенциальной ионно-электронной и фотоэлектронной эмиссией). Разряд в ПГО в электролитно-разрядном режиме обработки классифицирован как тлеющий, для которого характерны неравновесные механизмы переноса электрона через границу раздела «катод–плазма разряда». В работе [3] предложена физическая модель разряда, согласно которой катодный слой разряда с напряженностью электрического поля порядка  $10^8 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$  является ускорителем заряженных частиц. Положительные ионы, рожденные в катодном слое, ускоряются полем в направлении электролита. При катодном падении потенциала  $U_k=400\text{--}900 \text{ В}$  протон, ускоряясь в направлении катода и имея энергию  $400\text{--}900 \text{ эВ}$ , при соударении в электролитном катоде с нейтральной частицей или ионом передает связанному в молекуле или ионе электрону энергию  $0,4\text{--}0,8 \text{ эВ}$ , которая существенно меньше потенциала ионизации воды, но близка к энергии связи электрона в отрицательно заряженном ионе. По мнению автора, в результате соударения происходит отрыв электрона от отрицательного иона, находящегося в электролите на границе фаз «электролит–ПГО», и переход электрона в газовую фазу разряда. Предложенный механизм обеспечивает слабую эмиссию электронов из электролитного катода в зону разряда с коэффициентом ионно-электронной эмиссии  $\gamma=10^{-3}\text{--}10^{-5}$ . Попавшие в зону разряда электроны в прикатодной области разряда ускоряются в направлении анода и ионизируют газовые молекулы воды с образованием молекулярных ионов  $\text{H}_2\text{O}^+$ , которые при соударениях с другими частицами с энергией выше  $6,2 \text{ эВ}$  фрагментируют на протоны и радикалы  $\text{OH}$ . Далее протоны под действием катодного падения потенциала ускоряются в направлении поверхности электролита и замыкают описанный процесс. Однако в математической модели зажигания разряда автор пренебрегает описанной выше вторичной эмиссией электронов из электролитного катода ввиду ее незначительности. Полагая, что газ в ПГО является оптически тонким, а электрическое поле в ней однородно, делается вывод о том, что при зажигании разряда развитие электронных лавин возможно лишь тогда, когда вторичные электроны образуются в ПГО в результате фотоионизации или за счет столкновения нейтральных частиц с ионами.

В работе [9] рассмотрены возможные механизмы переноса электрона через границу раздела «электролитный катод–плазма разряда» за счет потенциальной и кинетической ионно-электронной эмиссий. Показано, что эмиссия электронов в плазму разряда за счет потенциальной ионно-электронной эмиссии невозможна по энергетическим и стехиометрическим причинам. Согласно предложенной физической модели, эмиссия электронов в плазму разряда обеспечивается за счет кинетической ионно-электронной эмиссии и включает две стадии – внутреннюю и внешнюю. На первой стадии в приразрядном объеме электролита в результате ионизации компонентов водного раствора положительно заряженными ионами  $\text{H}^+$  происходит рождение валентно несвязанных электронов с их быстрой последующей гидратацией. На второй стадии эмиссия электронов происходит преимущественно за счет испарения в область газового разряда тонкого приразрядного слоя электролита, содержащего рожденные на первой стадии гидратированные электроны. Энергии ускоренных в разряде ионов может оказаться достаточно, чтобы по механизму, подобному радиолизу, в приразрядной области электролита получить необходимое для поддержания разряда количество избыточных электронов. На основании теоретических исследований и экспериментальных данных произведена численная оценка средней скорости образования

избыточных электронов в единице приразрядного объема электролита и стационарной концентрации гидратированных электронов. Основываясь на полученных численных оценках, авторы полагают, что основную долю электрического тока в ПГО составляет поток ускоренных положительных ионов из разряда в сторону электролитного катода.

В работе [10] рассмотрен один из возможных механизмов электрической проводимости ПГО за счет тока анионов при испарении электролита в приразрядной области. С каждой из сторон межфазной границы «плазма разряда–электролит» существует диффузный двойной слой. Со стороны плазмы это область положительного объемного заряда вблизи электролита, формирующая прикатодное электрическое поле в области катодного падения потенциала разряда. В приразрядном объеме электролита это область отрицательного объемного заряда, образованного избыточным количеством анионов в поле положительного электрода (анода). Авторы считают, что анионы электролита могут попасть в плазму разряда одним из следующих способов или их комбинацией:

1. Послойное испарение объема электролита, непосредственно граничащего с плазмой, с сохранением его химического состава;

2. Катодное распыление жидкой фазы в виде кластеров или мелких капель с последующим полным или частичным их испарением в плазме разряда;

3. Избирательное испарение компонентов электролита с обогащением газовой фазы разряда более летучим компонентом.

Согласно численным оценкам, доля анионного тока в суммарном токе разряда при катодном падении потенциала  $\approx 400$  В и концентрации электролита 0,5 моль/л может составлять 24% [11] и 70% для одномолярного раствора [10].

Одним из механизмов переноса электролита в плазму разряда является возможная реализация на заряженной поверхности электролита комбинации неустойчивостей Кельвина–Гельмгольца и Тонкса–Френкеля [12]. На финальной стадии развития неустойчивости на заряженной поверхности электролита в приразрядной области образуются эмитирующие выступы с большой кривизной, с которых может происходить эмиссия сильно заряженных микрокапель и кластеров в ПГО.

Согласно монографии [6], при анодном процессе структура ПГО определяется составом, физико-химическими свойствами электролита и напряжением на электродах. Под действием электростатических сил, давления газа в ПГО и поверхностного натяжения ПГО имеет различную толщину и вибрирует с частотой от 20 до 100 Гц. В электрогидродинамическом режиме обработки в ПГО наряду с кислородом, выделяющимся на поверхности анода, содержится значительное количество водорода, образующегося в результате разложения паров воды в области электрических разрядов. Авторы считают, что электрическое поле и аномальный электролиз значительно интенсифицируют теплообмен в системе «анод–ПГО–электролит», что приводит к сильной турбулизации электролита и срыву ПГО на отдельных участках поверхности анода. Таким образом, авторы монографии, не говоря об этом прямо, указывают на стохастический пробой ПГО электролитом и периодический контакт электролита с поверхностью анода, т.е. на тепловой механизм образования ПГО. Авторы монографии [13] на основании произведенных тепловых расчетов показали, что в режиме электролитно-плазменного нагрева формирование сплошной и устойчивой ПГО около поверхности анода происходит в результате локального вскипания электролита под действием джоулева тепла, вызванного протеканием электрического тока в прианодной области.

В [14] приведены результаты осциллографических исследований электрического тока в ПГО для трех режимов анодной обработки: электролитно-плазменного нагрева, электрогидродинамического и электролитно-разрядного. Автором установлено, что ток разряда в своем составе имеет постоянную и высокочастотную составляющие. Показано, что зависимости уровня постоянной и амплитуды переменной составляющих тока от температуры электролита, рабочего напряжения и площади поверхности образца имеют сложный характер. Так, величина постоянной составляющей тока линейно возрастает при увеличении площади обрабатываемой поверхности и снижается на 36–41% при повышении температуры электролита на каждые 10 °С в диапазоне от 60 до 80 °С. В то же время площадь поверхности образца и температура электролита не оказывают заметного влияния на амплитуду и частоту переменной составляющей тока разряда. Показано, что наибольшее влияние на амплитуду

переменной составляющей оказывает рабочее напряжение. Постоянную составляющую тока автор связывает с ионной проводимостью ПГО, а переменную – с замыканием ПГО электролитными мостиками.

В работе [15] изучались спектральные характеристики радиоизлучения и тока разряда при ЭИП образцов из углеродистой и коррозионностойкой сталей в зависимости от химического состава, шероховатости поверхности образцов и степени выработки электролита. На основании полученных данных сделан вывод о том, что радиоизлучение и переменная составляющая электрического тока разряда несут информацию о химическом составе, шероховатости поверхности и степени выработки электролита. Однако приведенные результаты исследования и основанные на них выводы вызывают сомнения в связи с отсутствием информации об использованных в экспериментальной установке приборах, составах растворов электролита, марках материалов образцов и величине рабочего напряжения. В работе предложена физическая модель процесса ЭИП, согласно которой электрическая проводимость ПГО обеспечивается за счет искровых разрядов. Авторы считают, что на первой стадии искрового разряда происходит стримерный пробой ПГО. Однако строго физического обоснования возможности стримерного пробоя оболочки при электролитном катоде или ссылок на литературные данные в работе не приводится. Авторы также считают, что электрический ток в ПГО может протекать по тонким электролитным мостикам, замыкающим оболочку.

Таким образом, анализ литературных данных выявил многообразие, противоречивость и необоснованность некоторых гипотез об электрической проводимости ПГО в условиях электролитной анодной обработки. Несмотря на проведенные многочисленные экспериментальные и теоретические исследования электрической проводимости ПГО, тесно коррелированной с механизмами съема металла, сглаживания профиля поверхности и формирования топографии, механизм электрической проводимости ПГО и его основные закономерности в условиях ЭИП до сих пор не установлены.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко, Б.Р. Коммутация тока на границе металл–электролит / Б.Р. Лазаренко [и др.]. – Кишинев: АН МССР, 1971. – 74 с.
2. Словецкий, Д.И. Параметры электрического разряда в электролитах и физико-химические процессы в электролитной плазме / Д.И. Словецкий, С.Д. Терентьев // Химия высоких энергий. – 2003. – Т. 37. – № 5. – С. 355–361.
3. Гайсин, А.Ф. Струйный многоканальный разряд между твердым и электролитическим электродами в процессах модификации материалов при атмосферном давлении: автореф. дис. ...докт. техн. наук: 01.02.05 / А.Ф. Гайсин; Казанский гос. технич. ун-т им. А.Н. Туполева. – Казань, 2007. – 35 с.
4. Хлюстова, А.В. Коэффициенты эмиссии электронов из растворов электролита / А.В. Хлюстова, А.И. Максимов, В.А. Титов // ISTAPC–2002: матер. Междунар. симпоз. по теорет. и прикл. плазмохимии «ISTAPC–2002», Плёт, Россия, 2002 г. – Плёт, 2002. – Т. 1. – С. 106–107.
5. Белкин, П.Н. Исследование проводимости паровой пленки при анодном электролитном нагреве / П.Н. Белкин, В.И. Ганчар, Ю.Н. Петров // Доклады академии наук СССР. – 1986. – Т. 291. – № 5. – 1116–1119.
6. Дураджи, В.Н. Нагрев металлов в электролитной плазме / В.Н. Дураджи, А.С. Парсаданян; под общ. ред. А.С. Парсаданяна. – Кишинев: Штиинца, 1988. – 216 с.
7. Ширяева, С.О. О некоторых особенностях появления ионов вблизи заряженной поверхности интенсивно испаряющегося электролита / С.О. Ширяева, А.И. Григорьев, В.В. Морозов // Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73. – Вып. 7. – С. 21–27.
8. Баковец, В.В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / В.В. Баковец, О.В. Поляков, И.П. Долговесова. – Новосибирск: Наука. Сибирское отд., 1991. – 168 с.
9. Поляков, О.В. Эмиссия электронов и самоподдержание разряда в условиях водного электролитного катода / О.В. Поляков, А.М. Бадалян, Л.Ф. Бахтурова [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.chemphys.edu.ru/media/files/2007-01-16-001.pdf>. – Дата доступа: 4.05.2013.
10. Поляков, О.В. Анионный перенос отрицательного заряда из электролитного катода в газоразрядную плазму / О.В. Поляков, А.М. Бадалян, Л.Ф. Бахтурова // Электронный журнал «Исследовано в России» [Электронный ресурс]. – 2004. – № 222. – С. 2352 – 2361. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articlts/2004/222/pdf>. – Дата доступа: 10.08.2013.

11. Поляков, О.В. Влияние минерализации раствора на разложение его компонентов в условиях разрядного электрорадиолиза / О.В. Поляков, А.М. Бадалян, Л.Ф. Бахтурова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – Т. 13. – С. 633–639.

12. Григорьев, А.И. Механизм развития неустойчивости заряженной поверхности жидкости / А.И. Григорьев, О.А. Григорьев, С.О. Ширяева // Журнал технической физики. – 1992. – Т. 62. – Вып. 9. – С. 13–21.

13. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. / И.В. Суминов [и др.]; под общ. ред. И.В. Суминова. – М.: Техносфера, 2011. – Т. 1. – 464 с.

14. Янковский, И.Н. Электроимпульсное полирование коррозионностойких и углеродистых конструкционных сталей с обеспечением заданного комплекса свойств обрабатываемых поверхностей: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / И.Н. Янковский. – Минск, 2008. – 187 с.

15. Исследование физико-химических процессов на границе электролит-металл в условиях мощных электрических полей и знакопеременных гидродинамических потоков и создание процессов формирования и обработки поверхностей металлических изделий сложной конфигурации: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. темы А.А. Кособуцкий. – Минск, 2008. – 109 с. - № ГР 20062292.

**УДК 621.791.92**

**Спиридонов Н.В., Кудина А.В., Кураш В.В.**

***ПОЛУЧЕНИЕ ИЗНОСО-КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ  
МАШИН МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ С ПРИСАДКОЙ ИЗ  
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА***

***Белорусский национальный технический университет***

***УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»***

***Минск, Беларусь***

*При коррозионно-механическом изнашивании деталей машин, агрегатов и механизмов наиболее интенсивно подвергаются износу поверхности трения по причине протекания в контактных зонах коррозионных процессов, существенная роль в которых принадлежит биологическому фактору, инициирующему и ускоряющему коррозионное разрыхление и разрушение поверхностного слоя. Для защиты металлоповерхностей деталей узлов трения от коррозионного разрыхления и интенсивного изнашивания предложен новый состав износостойкого металлопокрытия, получаемый методом электродуговой наплавки.*

Отечественный и зарубежный опыт получения защитных металлопокрытий показывают, что для повышения износ- и коррозионной стойкости поверхностей деталей машин широко применяются композиционные материалы. Это объясняется простотой технологий их получения и нанесения, экономичностью методов и, как правило, они не связаны с расходом дефицитных материалов. Известными способами получения металлопокрытий, нашедшими промышленное применение, являются химическое смешивание, разложение смеси солей, водородное восстановление, химическое осаждение, внутреннее окисление и механическое легирование. Большинство из этих способов являются дорогостоящими и экологически небезопасными. В связи с этим большой интерес представляет процесс, основанный на реакционном механическом легировании, предполагающем взаимодействие между компонентами и образованием упрочняющих фаз на стадии обработки порошковой смеси при нанесении металлопокрытия. Методы легирования и способы нанесения композиционных материалов взаимосвязаны – выбранный способ получения металлопокрытия, как правило, диктует рациональный метод легирования и, наоборот, эффективный метод легирования требует применения соответствующего способа нанесения композиционного материала. При электродуговой наплавке сплошным проволочным электродом с введением композиционного материала, химический состав наплавленного металла определяется концентрацией легирующих элементов в основе, электродной проволоке и порошковой присадке. В композиционном слое металл основы и металл проволоки образуют матричный сплав, в