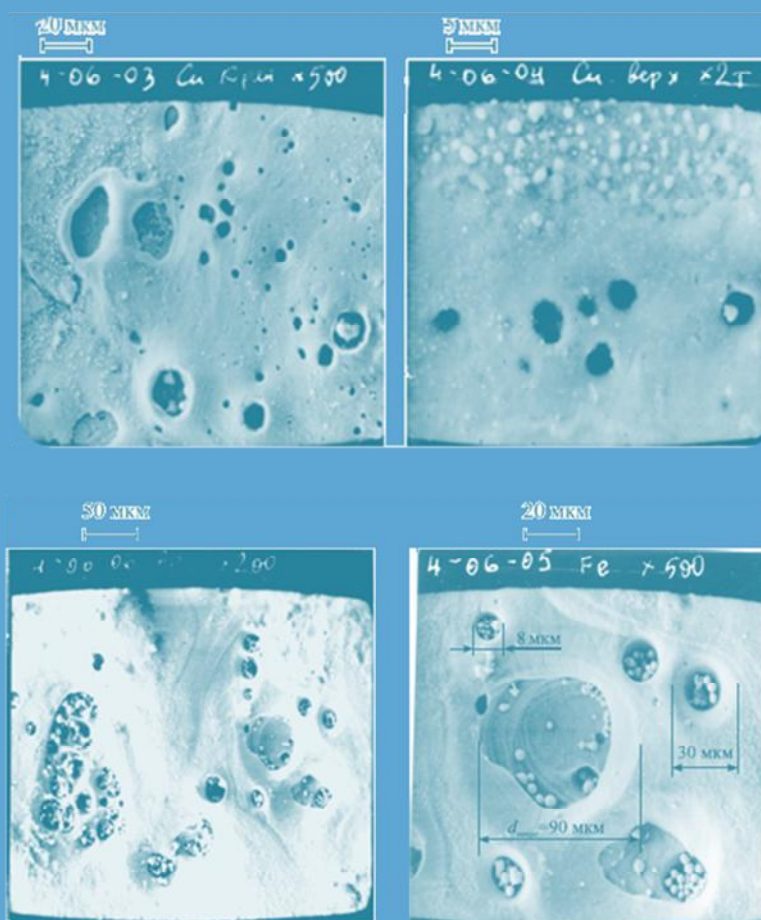


**В. П. Мещеряков**

# **Взрывная эрозия сильноточных контактов и электродов**



**Ульяновск**

**2011**

В. П. Мещеряков

**Взрывная эрозия  
сильноточных  
контактов и электродов**

**Ульяновск**

**УлГТУ**

**2011**



УДК 621.31  
ББК 31.264-04  
М56

УДК 621.31

**Мещеряков, В. П.**

Взрывная эрозия сильноточных контактов и электродов/В. П. Мещеряков. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 198 с.

Рассмотрены результаты экспериментальных и теоретических исследований эрозии размыкаемых контактов и деионных пластин дугогасительной решётки при отключении токов КЗ низковольтными автоматическими выключателями.

Книга предназначена для широкого круга читателей и, в первую очередь, для инженеров, занятых практической разработкой конструкций выключателей, их испытанием и исследованием.

**Mestcheryakov V.P.**

Explosive erosion of high-current contacts and electrodes. Ulyanovsk: USTU, 2011. – 198 p.

The results of experimental and theoretical researches of erosion of opening contacts and deion plates of arc chamber at interrupting of short currents by low-voltage automatic breakers are stated in the book.

The book is intended for high readership and foremost for engineers concerned with practical studies of designs of the breakers, their tests and researches.

© Мещеряков В.П., 2011

© ОАО «Контактор», 2011

ISBN 978-5-9795-0823-8

© Оформление. УлГТУ, 2011

# Оглавление

<b>Предисловие .....</b>	<b>5</b>
<b>Введение .....</b>	<b>6</b>
<b>Глава 1. Возбуждение дугового разряда при отключении токов КЗ .....</b>	<b>8</b>
1.1. Возбуждение дугового разряда размыканием контактов .....	9
1.2. Разрушение мостика джоулевым теплом .....	16
1.3. Разрушение мостика импульсным магнитным полем.....	34
1.4. Возбуждение дугового разряда вдуванием плазмы в межэлектродный промежуток.....	44
1.5. Формирование дугового разряда .....	64
Выводы к главе 1.....	64
Список литературы к главе 1 .....	66
<b>Глава 2. Форма и структура дугового разряда большой мощности и его опорных пятен .....</b>	<b>68</b>
2.1. Форма дугового разряда на размыкаемых контактах при отключении токов КЗ.....	70
2.2. Модель дуги со сплошным ядром .....	81
2.3. Модель короткой контрагированной дуги с дискретным ядром .....	95
2.3.1. Эффективные приэлектродные потенциалы и плотность мощности, приходящая на катод и анод.....	95
2.3.2. Следы эрозии на сильноточных контактах .....	100
2.4. Протекание тока в короткой контрагированной дуге с дискретным ядром за счёт испарения металла контактов .....	103
2.5. Центры концентрации зарядов .....	107
2.6. Проведение тока эктонами в короткой контрагированной дуге с дискретным ядром .....	117

2.6.1. Проведение тока эктонами на катоде .....	117
2.6.2. Проведение тока эктонами на аноде .....	123
2.7. Микроплазмойды на опорных пятнах дуги .....	129
Выводы к главе 2 .....	136
Список литературы к главе 2 .....	138
<b>Глава 3. Взрывная эрозия сильноточных контактов и электродов .....</b>	<b>140</b>
3.1. Мостиковая эрозия контактов .....	142
3.2. Эрозия контактов испарением их металла .....	147
3.3. Эрозия катода при отключении тока КЗ .....	149
3.4. Взрывная эрозия анода при отключении тока КЗ.....	155
3.5. Механизм эрозии деионных пластин дугогасительной решётки .....	159
3.5.1. Взрывная эрозия пластин .....	160
3.5.2. Дискретное поражение пластин .....	168
Выводы к главе 3.....	170
Список литературы к главе 3.....	171
<b>Приложение. К вопросу о выборе серебросодержащих контактов для</b>	
<b>автоматических выключателей .....</b>	<b>172</b>
П1. Контактное переходное сопротивление .....	174
П2. Энергетический баланс дуги на контактах и их эрозия .....	179
П3. Восстанавливающаяся электрическая прочность дугового	
промежутка .....	182
П4. К вопросу о выборе направления по созданию новых контактов .....	189
Выводы к приложению .....	195
Список литературы к приложению .....	197

## Предисловие

Предлагаемая вниманию читателя книга является фактически продолжением книги «Электрическая дуга большой мощности в выключателях», изданной в двух частях ОАО «Контактор» (г. Ульяновск) в 2006 и 2008 годах. В настоящей работе рассмотрены более детально физические процессы на размыкаемых серебросодержащих композиционных контактах при отключении токов короткого замыкания низковольтными выключателями. В книге «Электрическая дуга большой мощности в выключателях» в практических инженерных расчётах эрозии контактов плотность мощности  $q_{on}$ , приходящая на катодное и анодное пятна дуги, принималась равной. Поэтому катод и анод по такой методике расчёта подвергались эрозии в равной степени. Общая масса эрозии контактов составляла сумму масс эрозии катода и анода.

В настоящей работе принята дифференцированная оценка эрозии катода и анода при отключении токов короткого замыкания. В результате дифференцированного подхода к оценке эрозии катода и анода расчётным путём с использованием экспериментальных данных был выявлен ряд новых физических явлений на опорных пятнах низковольтной дуги большой мощности. Для примера упомянем об образовании на опорных пятнах дуги с дискретным ядром микроплазмодов, в которых протекают токи эктонов.

Автор выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность за моральную и материальную поддержку в подготовке и выпуске настоящей книги руководству ОАО «Контактор».

В заключение автор благодарит Игоря Сергеевича Егоркина и Станислава Дмитриевича Мигунова за большой труд в оформлении рукописи и подготовке её к печати.

**В. П. Мещеряков**

г. Ульяновск, ОАО «Контактор».

2010 – 2011 гг.

## Введение

Более 200 лет прошло со времени открытия В.В. Петровым в 1802 году яркосветящегося электрического дугового разряда. Электрические разряды играют важную роль в жизни человека и нашли широкое применение в сварочной технике и резке металлов, электрометаллургии, электроискровой обработке металлов, светотехнике, преобразовании электрического тока.

Характеристики дуговых разрядов изменяются в очень широких пределах. Так, например, значения силы тока изменяются от единиц ампер до сотен килоампер и напряжения – от нескольких десятков вольт до сотен киловольт. Дуговые разряды представляют собой сложные электро- и теплофизические явления, в которых протекают нестационарные и неравновесные термодинамические процессы. Исследования дуговых разрядов сопряжены с большими экспериментальными и теоретическими трудностями. Поэтому, исследования всего многообразия форм дуговых разрядов организационно и экономически не представляется возможным. В связи с этим исследования ведутся по конкретным направлениям.

Несмотря на интенсивные отечественные и зарубежные исследования дуговых разрядов наши знания оказываются недостаточными, а, подчас, недостоверными и противоречивыми.

Результаты исследований дуговых разрядов имеют важное значение в электротехнике. Почти вся вырабатываемая электрическая энергия потребляется в силовых установках и используется для управления технологическими процессами. Здесь следует указать энергетику, металлообрабатывающую, добывающую и лёгкую промышленность, транспорт, металлургию, сельское хозяйство, научно-исследовательские установки, военную технику и бытовые устройства. Распределение электрической энергии и управление технологическими процессами осуществляют высоковольтные, низковольтные и вакуумные выключатели. При отключении электрической цепи на контактах выключателей возникает электрическая дуга, которую необходимо эффективно погасить.



Важность исследования процессов гашения дуги в выключателях, например, на низком напряжении ( $\leq 1000$  В) подчеркивается тем, что 75% всей вырабатываемой электрической энергии потребляется на низком напряжении. Различные типы аппаратов предназначены для работы в определённых режимах. В частности, автоматические выключатели осуществляют распределение энергии и защиту электрических цепей и установок от ненормальных токов перегрузок и короткого замыкания (КЗ).

Широко известно, что токи КЗ в результате больших механических сил, возникающих между проводниками тока, и тепловых воздействий дуги приводят к разрушению дорогостоящего оборудования и нередко к пожарам и человеческим жертвам.

Для обеспечения требуемых режимов работы аппаратов управления электрическими приводами и автоматических выключателей необходимо создавать конструкции их контактных систем и дугогасительных камер такими, чтобы они могли эффективно гасить дугу.

Следует также обеспечить достаточно продолжительный эксплуатационный срок службы выключателей, который может быть достигнут только при относительно низком электрическом износе контактов и дугогасительных камер.

В [1.1], которая предназначена для инженеров-конструкторов, приводится ряд рекомендаций, применение которых позволяют создавать контактные системы и дугогасительные решётки оптимальных конструкций.

Предлагаемая вниманию читателя работа является продолжением экспериментальных и теоретических исследований дуги большой мощности в низковольтных выключателях изложенных в [1.1]. Основное внимание в работе будет уделено электрической эрозии катода и анода на сереброрсодержащих контактах и стальных деионных пластинах дугогасительной решётки под воздействием электрической дуги при отключении выключателями токов КЗ.

## Глава 1

### Возбуждение дугового разряда при отключении токов КЗ

Дуговой разряд является одним из видов электрических разрядов, горящих в газовой среде. Атмосферный воздух при нормальных условиях представляет собой достаточно хороший изолятор. При температуре, превышающей  $6000\text{ K}$ , атомы кислорода и азота, составляющие воздух, в результате интенсивного хаотического теплового движения взаимно сталкиваются, теряют отрицательно заряженные электроны и образуют положительно заряженные ионы. Если к объёму термически ионизированного газа приложить внешнее электрическое поле, то электроны и ионы приобретут направленное движение, которое принято называть электрическим током.

Пары металлов обладают теми же свойствами, что и обычные газы. Однако, их ионизация происходит при меньших значениях температуры, чем газов. Например, ионизация паров Ag и Cu практически начинается при температуре  $4000\text{ K}$ .

Существуют минимальные значения силы тока и напряжения, при которых образуется дуговой разряд. Например, на электродах из Ag при напряжении  $25\text{ В}$  дуга возбуждается при силе тока равном  $1,7\text{ А}$ .

Плотность тока  $j$  в ионизированных парах металлов и газах количественно характеризует перенос зарядов и может быть определена по формуле:

$$j = 3,34 \cdot 10^{-10} \cdot e \cdot (n_e \cdot v_e + n_i \cdot v_i) \text{ А / см}^2,$$

где  $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$  – заряд электрона, ед. СГС,  $n_e$  и  $n_i$  – концентрация электронов и ионов,  $\text{см}^{-3}$ ,  $v_e$  и  $v_i$  – средняя скорость направленного движения электронов и ионов,  $\text{см/с}$ . В квазинейтральной плазме  $n_e = n_i$ .

В низковольтной дуге отключения направленная скорость электронов составляет  $\sim 10^8$  см/с, а ионов  $\sim 10^6$  см/с. Так как  $v_i$  меньше  $v_e$  на два порядка, то принято считать, что основным переносчиком тока в электрических разрядах являются электроны. Поэтому для решения практических инженерных задач при определении плотности тока в низковольтных дугах отключения можно пользоваться формулой:

$$j_e = 3,34 \cdot 10^{-10} \cdot e \cdot n_e \cdot v_e, \text{ A/cm}^2.$$

Для анализа физических явлений в дуговом разряде при отключении низковольтными выключателями токов, в том числе и токов короткого замыкания, приведенная формула, определяющая плотность тока, будет вполне достаточна.

Физические процессы формирования и характеристики дуговых разрядов существенно зависят от силы тока, материала электродов, расстояния между ними и способов их возбуждения:

- размыканием контактов;
- вдуванием плазмы в межэлектродный промежуток;
- электрическим пробоем;
- пережиганием проволочки;
- лазерным облучением и т.п.

В зависимости от силы тока, материала электродов, расстояния между ними и способа возбуждения дугового разряда состав его плазмы будет разным и, следовательно, будут разными и его электрофизические свойства.

Достаточная информация о тепло- и электрофизических свойствах воздуха и паров металлов для инженерной практики приведена в [1.1, ч. I].

### 1.1 Возбуждение дугового разряда размыканием контактов

При размыкании контактов в процессе отключения выключателем электрической цепи, находящейся под токовой нагрузкой, между ними возбуждается дуговой разряд. Однако возбуждению дуги предшествует образование в мо-

## 1.1. Возбуждение дугового разряда размыканием контактов

мент времени размыкания контактов мостика из их жидкого металла. При дальнейшем расхождении контактов протяжённость мостика, его объем, масса и время существования зависят от силы тока, металла контактов, скорости их размыкания, силы контактного нажатия и напряжённости внешнего магнитного поля в зоне расположения мостика. Жидкометаллический мостик может разрушиться либо растягиванием и спокойным испарением, либо электрическим (тепловым) взрывом, либо импульсным магнитным (механическим) взрывом. Форма разрушения жидкого мостика зависит от количества и скорости введения энергии из электрической сети в массу его тела.

Работ по исследованию мостиковой стадии эрозии размыкаемых контактов проведено очень много и их результаты опубликованы как в зарубежной, так и в отечественной литературе. Абсолютное большинство исследований мостиковой эрозии были проведены при относительно небольших значениях силы токов и, в основном, в диапазоне номинальных токов релейной аппаратуры.

В настоящей работе рассматриваются процессы возбуждения дуговых разрядов на серебросодержащих металлокерамических разрывных контактах автоматических низковольтных выключателей с номинальными токами от 1000 до 6300 А в диапазоне токов КЗ от 6,3 до 60 кА действующего значения.

В ряде работ, результаты которых весьма обстоятельно изложены в [1.2], рассмотрены физические процессы эрозии контактов и электродов и методы её расчётов. В [1.2] рассмотрена эрозия контактов при токах, достигающих десятки и даже сотни килоампер. Но в этой работе основное внимание было уделено процессам на фиксированных электродах с разными расстояниями между ними.

В [1.3] приводятся результаты исследований разрушения жидкометаллических мостиков в диапазоне токов  $5 \div 5000$  А в условиях вакуума и атмосферного воздуха. В качестве контактных материалов были использованы вольфрам и металлокерамические контакты  $NiW$ , в которых никеля содержалось 6,7 %. В результате исследований было установлено, что форма разрушения мостиков зависит от силы тока. За характеристику формы разрушения мостика был принят вид изменения напряжения на размыкаемых контактах. На вольфрамовых контактах при токе 700 А наблюдалась нормальная форма разрушения мостика, при которой напряжение на мостике в течение  $\sim 0,5 \cdot 10^{-3}$  с повышалось плавно и мостик разрушался растягиванием и спокойно испарением.

При токе 1800  $A$  напряжение на мостике вначале плавно повышалось, а затем происходил его «всплеск». Поэтому эта форма разрушения мостика получила название «всплесковой». Наконец, при токе 5000  $A$  напряжение на мостике мгновенно изменялось скачком. При таком аномальном изменении напряжения было признано, что мостик разрушался в результате электрического взрыва.

Однако, на контактах, состоящих из металлокерамических композиций  $NiW$ , взрывная форма разрушения мостика при токе 5000  $A$  не наблюдалась. В таком случае форму разрушения мостика, вероятно, определяли тепло- и электрофизические свойства  $Ni$ , которые значительно отличаются от тепло- и электрофизических свойств  $W$  (см. таблицу 1.1).

В [1.4, с. 277] также приводится осциллограмма напряжения на размыкаемых контактах, которое в момент времени их размыкания скачком достигает напряжения дугообразования. «Мы считаем, что в этой ситуации возбуждение дуги происходит при электрическом взрыве металлических мостиков между катодом и анодом» [1.4, с. 277].

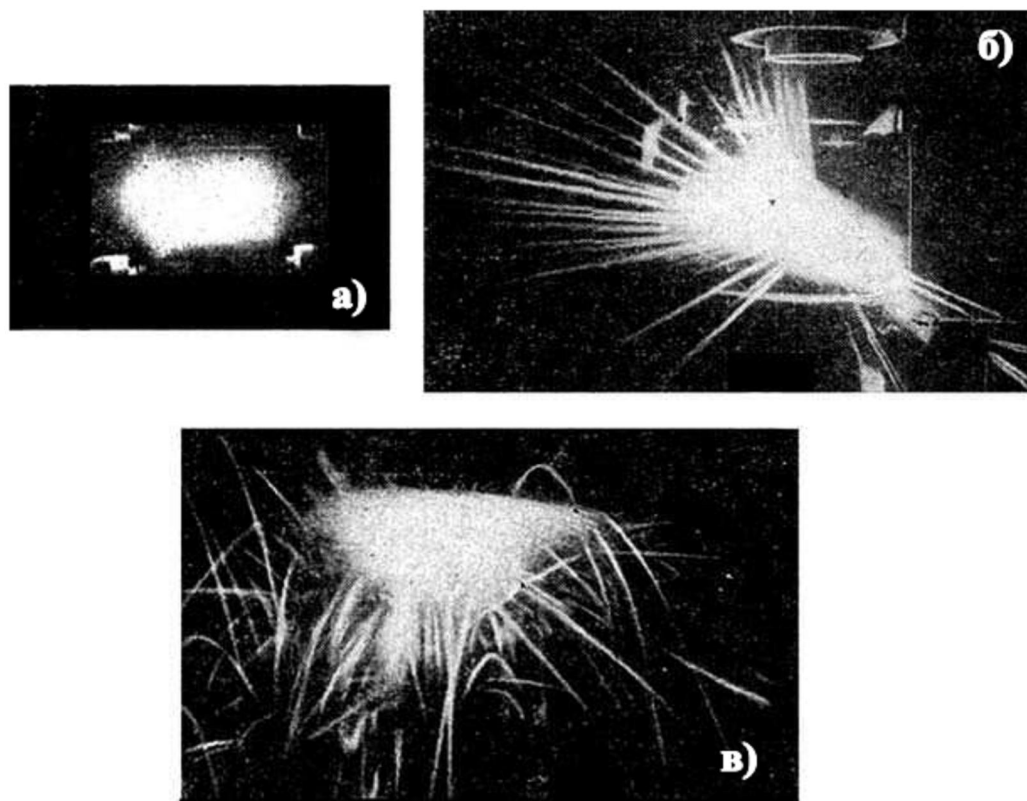
В работе [1.5] были проведены исследования эрозии контактов в мостиковой стадии в воздухе при токах до 40  $kA$  и напряжении 5  $B$ . На рис. 1.1 приведены фотографии разрушения мостиков из  $Ag$ ,  $Cu$  и  $Fe$  при отключении тока 16  $kA$ , заимствованные из [1.3, с. 38]. При разрушении мостика из  $Ag$  металл в области стягивания тока, по мнению авторов, полностью испаряется и наблюдается разлёт ограниченного количества макрочастиц. При отключении тока контактами из  $Cu$  и  $Fe$  происходит интенсивный разброс макрочастиц. Это означает, что при электрическом взрыве мостиков из  $Cu$  и  $Fe$  их частицы полностью испариться не успеют.

В работах [1.3, 1.4 и 1.5] не приводятся расчётные формулы и количественные оценки термо- и электрофизических параметров, при которых может протекать взрывная форма разрушения жидкометаллического мостика при отключении токов КЗ.

Образование и разрушение жидкого мостика между размыкаемыми контактами представляет собой сложное физическое явление, в котором одновременно протекают неравновесные нестационарные термодинамические процессы, химические реакции и фазовые переходы состояния веществ.

## 1.1. Возбуждение дугового разряда размыканием контактов

---



**Рис 1.1 [1.5]. Моменты разрушения мостиков из различных материалов, возникающих при отключении тока 16 кА: а) серебро, ярко светящееся облако металлического пара и незначительное количество разлетающихся частиц; б) медь, более слабое свечение жёлто-зелёного цвета и много частиц, разлетающихся почти прямолинейно; в) железо, слабое свечение, очень много частиц, разлетающихся по криволинейным траекториям.**

Характер разрушения мостика зависит от комплекса свойств материалов электродов и энергетической мощности отключаемой цепи. Характер протекания термодинамических процессов в жидкометаллическом мостике определяет неустойчивость состояния его вещества, масса которого не в состоянии поглотить полностью подводимую к нему энергию.

В таблице 1.1 приведены тепло- и электрофизические свойства ряда контактных металлов. Контактные металлы в таблице 1.1 расположены в порядке возрастания их дугостойкости [1.2, с. 224]. Из результатов исследований, приведённых в работах [1.3 и 1.5] следует, что порядок контактных металлов с наибольшей склонностью к протеканию взрывной формы разрушения мостиков при отключении токов КЗ имеет обратную последовательность, чем указанную в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Тепло- и электрофизические свойства контактных материалов.

металл	<i>Ag</i>	<i>Cu</i>	<i>Ni</i>	<i>Fe</i>	<i>W</i>
$T_{пл}, K$	1235	1356	1728	1808	3863
$T_{кип}, K$	2485	2840	3003	3027	5933
$\rho_{тв}, г/см^3$	10,5	9,02	8,9	7,82	19,3
$\rho_{пл}, г/см^3$	9,32	8,29	-	7,2	-
$\rho_{кип}, г/см^3$	9,0	7,73	-	6,86	-
$C, кал/г \cdot K, ТВ$	0,0544	0,0931	0,106	0,117	0,0321
$C, кал/г \cdot K, Ж$	0,0656	0,11	0,142	-	-
$\lambda, Вт/м \cdot K, ТВ$	429	401	91	80	174
$a, см^2/с, ТВ$	1,74	1,17	0,23	0,23	0,64
$a, см^2/с, Ж$	0,55	0,42	0,12	0,07	0,14
$\rho, 10^{-6}, Ом \cdot см$	1,63	1,73	7,2	9,98	13,5
$W_{исп}, Дж/г$	2360	5280	7030	7030	4690
$m_o, 10^{-24}, г$	179,1	105,1	97,5	92,7	305,2

Например, жидкометаллический мостик из *W* из-за более высокого удельного сопротивления, чем у *Ni*, может быстрее накопить энергию, достаточную для электрического его взрыва. Эта энергия должна, очевидно, превышать энергию сублимации: удельная энергия испарения (сублимации) *W* ниже, чем у *Ni*:

$$W_{суб}^W = 4620 Дж/г < 7030 Дж/г = W_{суб}^{Ni}$$

Поэтому, можно принять, что добавка *Ni* в металлокерамический контакт на основе *W* снижает вероятность разрушения мостика электрическим взрывом.

Если сравнивать эффекты разрушения мостиков из *Ag* и *Cu*, показанные на рис 1.1, то следует заметить, что, независимо от практического равенства их удельных сопротивлений и коэффициентов температуропроводности, жидкий мостик из *Ag* может быстрее испариться, чем из *Cu*. Температура кипения *Ag* и, особенно, удельная энергия испарения ниже, чем у *Cu*:

$$T_{кип}^{Ag} = 2485 K < 2840 K = T_{кип}^{Cu};$$

$$W_{суб}^{Ag} = 2360 Дж/г < 5280 Дж/г = W_{суб}^{Cu}$$

В [1.4] приводятся данные многочисленных исследований электрических пробоев и возбуждение искровых и дуговых разрядов в условиях вакуума, которые сопровождаются взрывами микровыступов на поверхности электродов.

## 1.1. Возбуждение дугового разряда размыканием контактов

Взрывные процессы при протекании электрического тока исследовались при электрическом пробое на острие и возбуждении искрового разряда током автоэлектронной эмиссии, на взрывающихся проволочках, с помощью воздействия лазерного луча на поверхности металлов и т.д. В результате проведённых исследований был установлен ряд условий, при которых могли происходить электрические взрывы на поверхности опорных пятен электрических разрядов.

Одной из главных причин микровзрывов при электрическом пробое вакуумного межэлектродного промежутка является джоулев разогрев микровыступов на поверхности катода током автоэлектронной эмиссии, плотность которого может достигать  $10^8 \div 10^9 \text{ A/cm}^2$ . Электрический взрыв микровыступов приводит к выбросу струи плазмы. Взрывная эмиссия электронов (ВЭЭ) также может вызываться термоэлектронной эмиссией из-за перегрева микровыступов, которая завершается их взрывом. Порция электронов, выбрасываемая в результате ВЭЭ, автором [1.4] названа *эктоном* (ЕС – первые буквы английских слов explosion centre, перевод которых – «центр взрыва»).

В результате взрыва микровыступа происходит выброс капель, скорость которых составляет  $(2 \div 4) \cdot 10^4 \text{ см/с}$ . Эта скорость обусловлена большим давлением извергающейся струи плазмы на жидкий металл, которое может достигать  $10^8 \div 10^9 \text{ Па}$ . Передний фронт струи плазмы под воздействием этого давления приобретает скорость  $(1 \div 2) \cdot 10^6 \text{ см/с}$ .

При лазерном облучении металла его поверхности может происходить плавление, испарение или взрыв в зависимости от значения мощности, приходящей на единицу площади лазерного пятна. В таблице 1.2 приведены физические явления в пятне лазерного облучения на титановой мишени в зависимости от плотности мощности [1.4. с.64].

**Таблица 1.2**

Процесс	Плотность мощности, $\text{Вт/см}^2$
Плавление	$10^5$
Испарение	$10^6 \div 10^8$
Взрыв	$>10^8$

В [1.2] показано, что интенсивное испарение  $Zn$ ,  $Cu$  и  $W$  происходит при плотности мощности, близкой к  $10^8 \text{ Вт/см}^2$ .

Следовательно, взрывной процесс на поверхности металла может протекать при плотности мощности  $\geq 10^8 \text{ Вт/см}^2$ , приходящей на неё.



Взрыв некоторого объёма металла может происходить, если удельная энергия, вложенная в его массу, будет достигать определённого критического значения. Согласно [1.4] взрыв микровыступов может произойти, если удельная энергия их металла превысит удельную энергию сублимации в 2÷3 раза. В состоянии неидеальной плотной плазмы её удельная энергия может достигать значения  $10^5$  Дж/г. В процессе сублимации металл из твёрдого состояния переходит в газообразное. При электрическом взрыве металла он подвергается превращению из твёрдого состояния в жидкое, затем происходит фазовый переход его вещества в агрегатное состояние, представляющее собой ассоциацию нескольких атомов и молекул, газ и образование плазмы.

На вероятность протекания взрывного разрушения вещества существенно влияет и скорость введения в него энергии. В случае дуговых разрядов скорость введения энергии в массу металла, по которому протекает ток, может служить скоростью его нарастания.

С точки зрения, изложенной в [1.4], скорость нарастания тока, приводящая к взрыву микровыступов на медном катоде вакуумных дуговых разрядов, может достигать значения  $\frac{di}{dt} \sim 10^8$  А/с. При  $\frac{di}{dt} > 10^8$  А/с на катоде происходят качественные изменения, которые приводят к изменению спектра излучения плазмы, возникновению новых ячеек, резкому повышению скорости перемещения пятен и т. д.

Приведённый обзор исследований взрывных механизмов разрушения микровыступов на опорных пятнах дуговых разрядов, взрывающихся проволок, которые могут быть моделью для исследования разрушений жидкометаллических мостиков, и на поверхности пятен лазерного облучения, а также установленных критических параметров, при которых протекают взрывные процессы металлов, дают возможность применения последних для оценки вероятности протекания взрывных процессов жидкометаллических мостиков на размыкаемых контактах при отключении токов КЗ.

### 1.2 Разрушение мостика джоулевым теплом

Исследования гашения дуги большой мощности в низковольтных выключателях показали, что размыкание серебросодержащих металлокерамических контактов при отключении токов КЗ может протекать либо спокойно, либо взрывообразно [1.1, ч. I, с. 196; ч. II, с. 14].

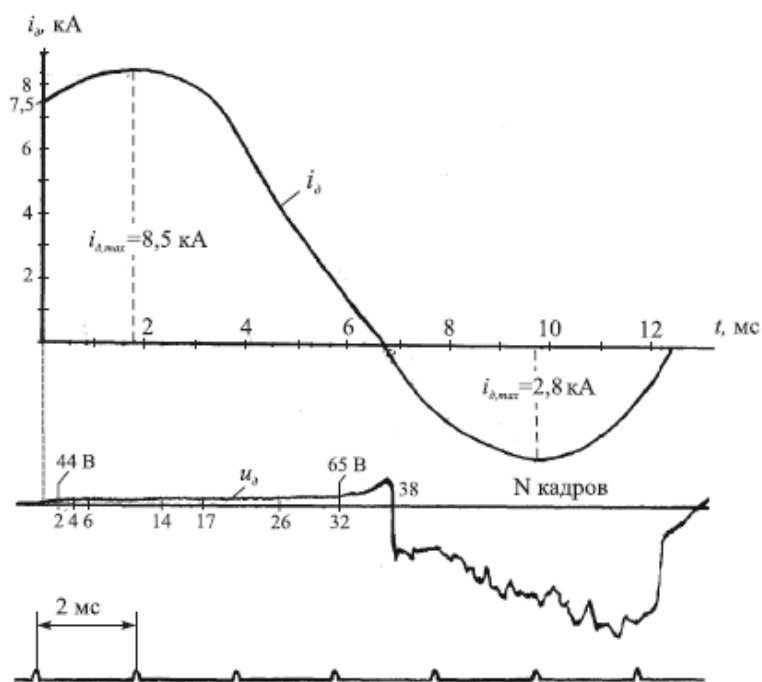
На рис. 1.2 приведены осциллограммы тока и напряжения дуги при отключении тока в испытательном контуре при фазном напряжении  $U_{\phi}=420 \text{ В}$  и  $\cos\varphi=0,2$ : а –  $I=6,4 \text{ кА}$ ; б –  $I=16,0 \text{ кА}$ .

Из осциллограмм на рис. 1.2 видно, что контакты разомкнулись в первом случае при токе  $7,5 \text{ кА}$ , а во втором – при токе  $13 \text{ кА}$ .

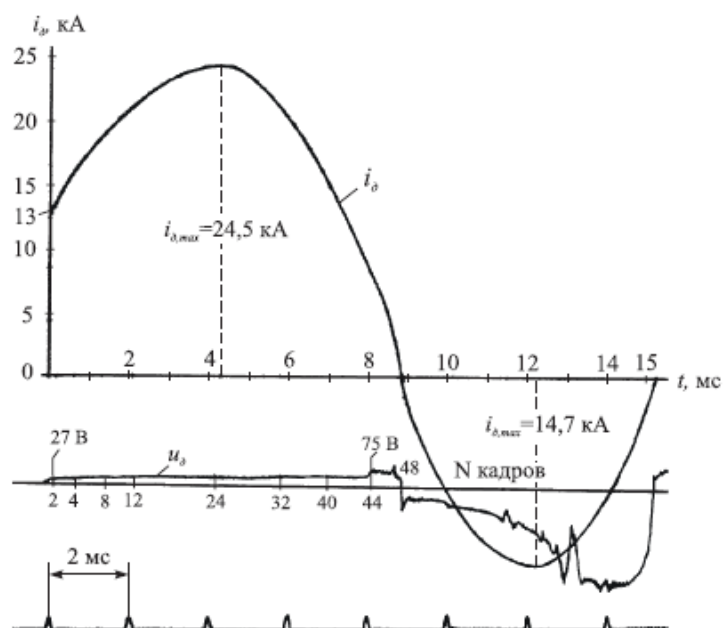
На рис. 1.3 приведены осциллограммы напряжения дуги на размыкаемых серебросодержащих контактах и фотографии кадров 2 – скоростной киносъёмки дуги из тех же опытов, осциллограммы которых показаны на Рис. 1.2.

Из рис. 1.3 видно, что при мгновенном значении тока, равном  $7,5 \text{ кА}$ , жидкометаллический мостик разрушился спокойно и при токе  $13,0 \text{ кА}$  из межконтактного зазора истекает струя плазмы. При токах не превышающих  $12,0 \text{ кА}$  на серебросодержащих контактах, как правило, дуговой разряд возбуждается через  $(0,5\div 1,0) \text{ мс}$  после момента времени размыкания контактов в результате спокойного разрушения мостика. В таком случае напряжение на контактах растёт плавно от значения падения напряжения на переходном сопротивлении замкнутых контактов до напряжения дугообразования, которое на серебросодержащих контактах можно принять равным  $20 \text{ В}$ .

На рис. 1.4 схематично показана спокойная форма разрушения жидкометаллического мостика. В результате растягивания мостика, действия электромагнитного давления, сжимающего его канал, и сил поверхностного натяжения он приобретает форму тела вращения с уменьшенным сечением в средней его части.



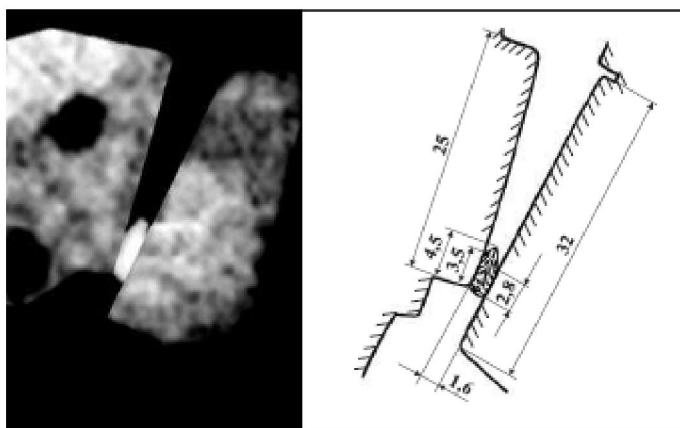
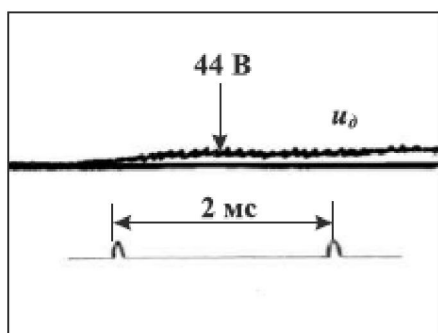
а)



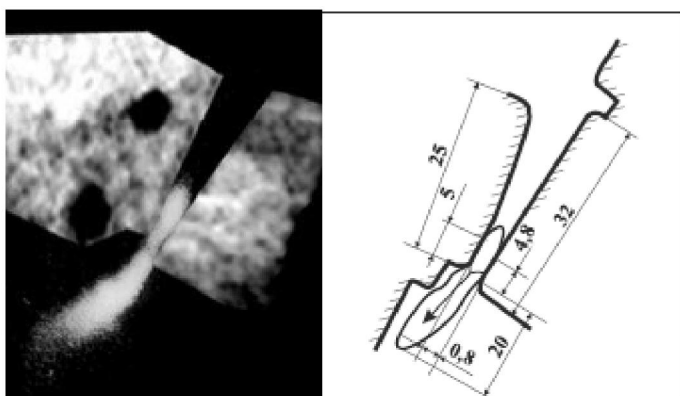
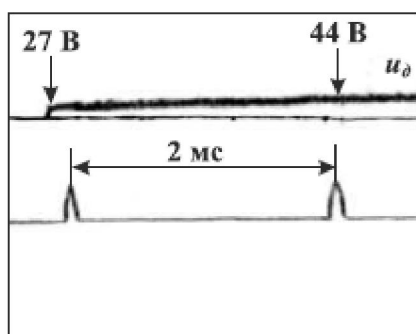
б)

Рис. 1.2 Осциллограммы тока и напряжения дуги при отключении тока в контуре при фазном напряжении  $U_\phi = 420$  В и  $\cos\phi = 0,2$ : а –  $I = 6,4$  кА; б –  $I = 16,0$  кА.

## 1.2. Разрушение мостика джоулевым теплом



а)



б)

Рис. 1.3 Осциллограммы напряжения  $u_d$  и фотографии дуги на размыкаемых серебро-содержащих контактах. В момент времени размыкания контактов мгновенное значение тока составляло: а –  $i_d = 7,5 \text{ кА}$ ; б –  $i_d = 13,0 \text{ кА}$ ; время горения дуги  $t_d = 0,334 \text{ мс}$ , время экспозиции одного кадра  $\Delta t = 0,167 \text{ мс}$ .

Размеры даны в мм.

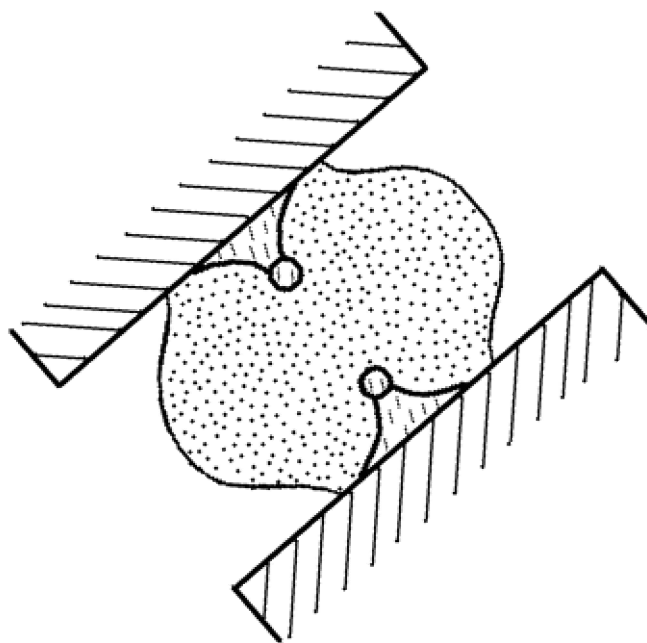
При достаточно больших значениях силы токов под действием электродинамических сил может произойти перетяжка и разрыв жидкометаллического мостика. В момент времени разрыва мостика возбуждается дуговой разряд. Остатки расплава на опорных пятнах дуги приобретают форму конусов под действием сил поверхностного натяжения и на их вершинах образуются капли. В результате протекания по ним тока в перешейке, соединяющем конус расплава с каплей, возникает электродинамическая сила, которая стремится оторвать каплю от перешейка. Эту силу можно определить по формуле:

$$f = 1,02 \cdot 10^{-8} \cdot i^2 \cdot \ln \frac{r_k}{r_n},$$

где  $i$  – мгновенное значение тока,  $A$ ;  $r_k$  и  $r_n$  – радиусы капли и перешейка соответственно,  $см$ . Если принять отношение  $\frac{r_k}{r_n} = 5$ , то тогда при токе  $7,5 \cdot 10^3 A$  значение силы отрыва капли составит:

$$f = 1,02 \cdot 10^{-8} \cdot (7,5 \cdot 10^3 A)^2 \cdot \ln 5 = 0,918 \text{ кгс}.$$

Капли на обоих электродах под воздействием таких значительных сил отрываются от конусов расплава и устремляются навстречу друг другу. Капли при столкновении сливаются и образуют одну каплю. Капля, находясь в канале дуги, может либо испариться, либо раздробиться, либо быть выдавлена из канала дуги.



**Рис. 1.4. Спокойная форма разрушения мостика.**

Попробуем оценить, хотя бы грубо, судьбу капли в этом конкретном эксперименте.

## 1.2. Разрушение мостика джоулевым теплом

В [1.1, ч. II, с. 69-70] показано, что диапазон размеров капель в дугогасительных камерах низковольтных автоматических выключателей при отключении токов КЗ изменяется от долей микрометров до единиц миллиметров. В зазоре между контактами  $\delta=1,6$  мм (рис. 1.3, а) может разместиться капля диаметром до 1,0 мм.

Согласно [1.1, ч. II, с. 69-70] через каплю может протекать ток, если:

$$\Delta U > (U_k + U_a),$$

где  $\Delta U = E d_k$  – напряжение в плазме на участке протяжённостью равной диаметру капли и  $(U_k + U_a) = 20$  В – среднее значение суммы приэлектродных падений напряжений на электродах из Ag. Если принять за напряжённость поля  $E$  в плазме дуги её среднее значение:

$$E_{cp} = \frac{u_d}{\delta} = \frac{20 \text{ В}}{0,16 \text{ см}} = 125 \text{ В/см},$$

то будем иметь:

$$\Delta U = E_{cp} \cdot d_k = 125 \text{ В/см} \cdot 0,1 \text{ см} = 12,5 \text{ В}.$$

Так как  $\Delta U = 12,5 \text{ В} < (U_k + U_a) = 20 \text{ В}$ , то, следовательно, ток через каплю протекать не может и она не будет нагреваться джоулевым теплом.

В таком случае капля будет нагреваться за счёт плотности мощности, приходящей на её поверхность, которую в первом приближении можно принять равной:

$$q_k = \frac{\Delta P}{S_k} = \frac{7,5 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot 12,5 \text{ В}}{3,14 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2} = 29,9 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2,$$

где  $\Delta P = i \cdot \Delta U$  – мощность, сосредоточенная в плазме дуги в зоне расположения капли и  $S_k = 4 \cdot \pi \cdot r_k^2 = 4 \cdot \pi \cdot (0,05 \text{ см})^2 = 3,14 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$  – площадь поверхности капли.

При плотности мощности  $29,9 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$  капля Ag может находиться только в расплавленном состоянии. Для того чтобы она могла интенсивно испаряться, плотность мощности должна быть не менее  $10^7 \text{ Вт/см}^2$ . Следователь-

но, капля  $Ag$  диаметром  $1,0$  мм в канале дуги, ток который составляет  $7,5$  кА, полностью испариться не может.

В [1.1, ч. II, с. 82] показано, что капли  $Ag$  в канале дуги под воздействием теплового потока могут дробиться на более мелкие части. Минимальный (критический) радиус капли из  $Ag$  после её дробления в данном случае составит:

$$r_{к.кр} \sim 122 \sqrt{\frac{1}{q_k}} = 122 \cdot \sqrt{\frac{1}{29,9 \cdot 10^{12} \text{ эрг}/(с \cdot см^2)}} = 0,18 \cdot 10^{-4} \text{ см},$$

где  $q_k$  – плотность мощности, приходящая на каплю, в  $\text{эрг}/(с \cdot см^2)$ .

Капли, радиус которых  $r_k < r_{к.кр}$ , взрываться не будут. Капли, имеющие радиус на два порядка больше критического, также взрываться не могут.

Таким образом, при размыкании серебросодержащих контактов при токе  $7,5$  кА и спокойном разрушении жидкометаллического мостика капли, диаметром  $\sim 1,0$  мм, образованные из его расплава и находящиеся в канале дуги, взрываться не могут. Но такие относительно крупные капли могут либо выпасть из канала дуги под воздействием силы тяжести, либо быть выдавлены электромагнитным давлением, сжимающим канал дуги.

Капли, диаметр которых менее  $36 \cdot 10^{-4}$  см, под воздействием тепловых потоков будут интенсивно дробиться на более мелкие части.

Взвесь относительно мелких капель, диаметр которых составляют долю микрометра, в составе ионизированных паров металла контактов на начальном этапе их размыкания образуют неидеальную плазму дугового разряда.

Масса капель, образованных из расплава мостика и раздробленных и выброшенных из канала дуги, составляют эрозию контактов на мостиковом этапе размыкания контактов.

При значении тока  $7,5 \cdot 10^3$  А и падении напряжения на мостике,  $u_m = 16$  В за время его сосуществования  $t_m = 0,5 \cdot 10^{-3}$  с может выделиться следующее количество энергии:

$$\Delta W_m = i \cdot u_m \cdot t_m = 7,5 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot 16 \text{ В} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 60 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

## 1.2. Разрушение мостика джоулевым теплом

---

Согласно рис. 1.3, а объём мостика можно принять равным:

$$V_m = \delta \cdot S_{m.cp} = 0,16 \text{ см} \cdot 0,079 \text{ см}^2 = 0,0126 \text{ см}^3,$$

где  $\delta=0,16 \text{ см}$  – протяжённость мостика, равная раствору контактов, и  $S_{m.cp}=0,079 \text{ см}^2$  – среднее значение площади его сечения

$$(S_{m.cp} = \frac{S_{m.k} + S_{m.a}}{2} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_{m.k}^2 + d_{m.a}^2) = \frac{\pi}{8} \cdot [(0,35 \text{ см})^2 + (0,28 \text{ см})^2] = 0,079 \text{ см}^2).$$

Масса мостика из жидкого  $Ag$  при его температуре плавления равна:

$$m_m = \rho_{Ag} \cdot V_m = 9,32 \text{ г/см}^3 \cdot 0,0126 \text{ см}^3 = 0,117 \text{ г}.$$

Удельный вклад энергии в массу мостика в таком случае составляет:

$$\Delta \omega_m = \frac{\Delta W_m}{m_m} = \frac{60 \text{ Вт} \cdot \text{с}}{0,117 \text{ г}} = 513 \text{ Вт} \cdot \text{с/г}.$$

Плотность тока в мостике:

$$j_m = \frac{i}{S_{m.cp}} = \frac{7,5 \cdot 10^3 \text{ А}}{0,079 \text{ см}^2} = 9,5 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2.$$

Электромагнитное давление в канале мостика составляет:

$$\begin{aligned} P_m &= P_{атм} + 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot i \cdot j_m \text{ атм} = \\ &= 1,0 \text{ атм} + 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot 7,5 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot 9,5 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2 = 8,0 \text{ атм}. \end{aligned}$$

Скорость роста тока в мостике равна:

$$\frac{i}{t_m} = \frac{7,5 \cdot 10^3 \text{ А}}{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 1,5 \cdot 10^7 \text{ А/с}.$$

Сравним полученные результаты расчётов параметров, характеризующих механизм разрушения жидкометаллического мостика, с критическими параметрами, при которых происходит взрыв металлов при протекании по ним токов:



- $\Delta\omega_m^{Ag} = 513 \frac{Дж}{г} \ll 2360 \frac{Дж}{г} = W_{исп}^{Ag}$  ;
- $j_m = 9,5 \cdot 10^4 \frac{А}{см^2} \ll (10^8 \div 10^9) \frac{А}{см^2}$  ;
- $P_m = 8,0 \text{ атм} = 8 \cdot 10^5 \text{ Па} \ll (10^8 \div 10^9) \text{ Па}$  ;
- $\frac{i}{t_m} = 1,5 \cdot 10^7 \frac{А}{с} < 10^8 \text{ А/с}$  .

Из приведённого сравнения параметров однозначно следует, что размыкание серебросодержащих контактов при токе  $7,5 \cdot 10^3 \text{ А}$  действительно должно протекать при спокойном разрушении жидкометаллического мостика.

На рис. 1.3, б видно, что при мгновенном значении тока  $13,0 \text{ кА}$  напряжение на контактах в момент времени их размыкания скачком достигает значения  $27 \text{ В}$ , вполне достаточного для возбуждения дугового разряда. Через  $0,334 \text{ мс}$  после момента времени размыкания контактов из канала дуги вырывается струя плазмы. Тот факт, что напряжение на контактах при их размыкании скачком достигло значения дугообразования и из канала дуги истекает струя плазмы, вызывает предположение о взрывной форме разрушения жидкометаллического мостика. Оценим параметры мостика в этом случае.

При среднем значении тока  $13,0 \text{ кА}$  и напряжении  $27 \text{ В}$  за время  $t = 0,334 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  в зазоре между контактами выделилось следующее количество энергии:

$$\Delta W = i \cdot u \cdot t = 13 \cdot 10^3 \text{ А} \cdot 27 \text{ В} \cdot 0,334 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 117 \text{ Вт} \cdot \text{с} .$$

Исходя из рис. 1.3,б можно предположить, что объём жидкометаллического мостика был равен:

$$V_m = \delta \cdot S_{m.cp} = 0,08 \text{ см} \cdot 0,188 \text{ см}^2 = 0,015 \text{ см}^3 ,$$

где  $\delta = 0,08 \text{ см}$  – протяжённость мостика и  $S_{m.cp} = 0,188 \text{ см}^2$  – среднее значение площади сечения мостика

## 1.2. Разрушение мостика джоулевым теплом

---

$$(S_{м.ср} = \frac{S_{м.к} + S_{м.а}}{2} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_{м.к}^2 + d_{м.а}^2) = \frac{\pi}{8} \cdot [(0,5 \text{ см})^2 + (0,48 \text{ см})^2] = 0,188 \text{ см}^2).$$

Масса жидкометаллического мостика при температуре плавления  $Ag$  составляет:

$$m_m = \rho_{Ag} \cdot V_m = 9,32 \text{ г/см}^3 \cdot 0,015 \text{ см}^3 = 0,14 \text{ г}.$$

Удельная энергия, введённая в массу мостика, в этом случае имеет значение:

$$\Delta\omega_m = \frac{\Delta W}{m_m} = \frac{117 \text{ Вт} \cdot \text{с}}{0,14 \text{ г}} = 836 \text{ Вт} \cdot \text{с/г}.$$

Это значение удельной энергии, введённой в жидкометаллический мостик из  $Ag$ , значительно ниже его энергии сублимации:

$$\Delta\omega_m = 836 \text{ Дж/г} \ll 2360 \text{ Дж/г} = W_{суб}^{Ag}.$$

Отсюда можно сделать вывод, что и при токе равном  $13,0 \text{ кА}$  размыкание контактов не может сопровождаться взрывной формой разрушения мостика.

Средняя плотность тока в начальный момент времени образования мостика составляет:

$$j_m = \frac{i}{S_{м.ср}} = \frac{13 \cdot 10^3 \text{ А}}{0,188 \text{ см}^2} = 6,9 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2.$$

То есть в начальный момент времени образования мостика плотность тока, равная  $6,9 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2$ , привести его к электрическому взрыву не может. Однако мостик под воздействием электродинамических сил подвергается перегрузке. Если допустить, что в последний момент времени существования мостика минимальная площадь его сечения составит  $S_{м.мин} = 0,01 \text{ см}^2$ , то тогда плотность тока в самом узком месте мостика может быть равной:

$$j_{м.макс} = \frac{i}{S_{м.мин}} = \frac{13 \cdot 10^3 \text{ А}}{0,01 \text{ см}^2} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2.$$

Избыточное электромагнитное давление в самом узком месте в мостике, в таком случае, достигнет значения:

$$\begin{aligned} P_{м.маx} &= 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot i \cdot j_{м.маx} = \\ &= 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot 13,0 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot 1,3 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2 = 167 \text{ атм} = 1,67 \cdot 10^7 \text{ Па} . \end{aligned}$$

Следовательно, жидкометаллический мостик из *Ag* даже в конце времени своего сосуществования при токе  $13 \cdot 10^3 \text{ A}$  взорваться не мог, так как и плотность тока, и давление в мостике оказываются значительно ниже критических значений, при которых может произойти электрический взрыв металлов:

- $j_{м.маx} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2 \ll 10^8 \text{ A/cm}^2$  ;
- $P_{м.маx} = 1,67 \cdot 10^7 \text{ Па} < 10^8 \text{ Па}$  .

Заметим, что при токе  $16,0 \text{ кА}$  размыкание контактов из серебра, показанного на рис. 1.1, также происходило без электрического взрыва.

Вместе с тем, на рис. 1.3,б видно, что напряжение на размыкаемых контактах скачком достигает значения дугообразования и из зазора между контактами вырывается струя плазмы. Поясним оба указанных факта.

Скорость развёртки регистрации напряжения катодным осциллографом составляла  $10 \text{ м/с}$ . То есть время длительностью  $100 \text{ мкс}$  на осциллограмме укладывалось в  $1,0 \text{ мм}$ . Можно предположить, что жидкометаллический мостик между контактами при токе  $13,0 \text{ кА}$  существовал  $\sim 100 \text{ мкс}$ . Действительный ход изменения напряжения на мостике наблюдать не представлялось возможным. Поэтому изменение напряжения на мостике на расстоянии менее  $1,0 \text{ мм}$  на осциллограмме имеет вид скачка. При исследовании мостиковой стадии эрозии контактов временное разрешение регистрирующей аппаратуры, очевидно, должно быть  $\leq 10^{-6} \text{ с}$ .

Для объяснения причин извержения струи плазмы из межконтактного зазора на начальном этапе их размыкания обратимся к рис. 1.5, на котором схематично утрировано изображено извержение струи плазмы из межконтактного зазора.

## 1.2. Разрушение мостика джоулевым теплом

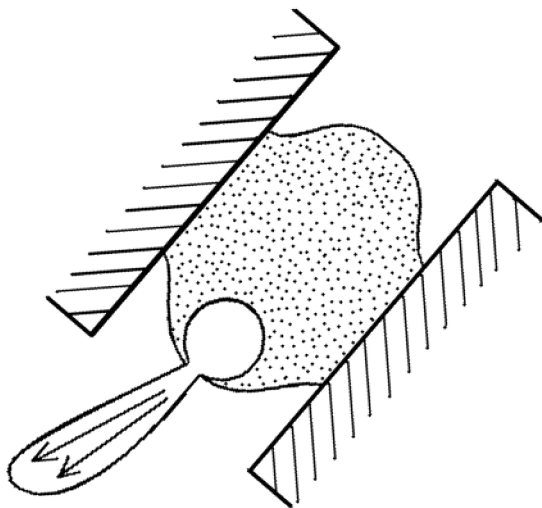


Рис. 1.5. Схематическое изображение извержения струи плазмы из капли через прорывающуюся её оболочку.

Ранее было показано образование капли в канале дуги после спокойного разрушения жидкометаллического мостика. Капля в канале дуги подвергается давлению:

$$P_k = P_{\text{кан}} + \frac{2 \cdot \sigma}{r_k},$$

где  $P_{\text{кан}} = (9,87 \cdot 10^{-9} \cdot i \text{ A} \cdot j_{\text{кан}} \text{ A/cm}^2 \text{ атм}) \cdot 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ дин/cm}^2$  – давление в канале дуги;  $2 \cdot \sigma / r_k$  лапласовское давление в капле за счёт сил поверхностного натяжения [6],  $\sigma = 980 \text{ дин/cm}$  – коэффициент поверхностного натяжения  $A_g$  в жидком состоянии и  $r_k = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  – радиус капли.

Плотность тока в канале дуги равна:

$$j_{\text{кан}} = \frac{i_d}{S_{\text{кан}}} = \frac{13 \cdot 10^3 \text{ A}}{0,28 \text{ см}^2} = 4,6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2,$$

где  $S_{\text{кан}} = \pi \cdot r_{\text{кан}}^2 = \pi \cdot (0,3 \text{ см})^2 = 0,28 \text{ см}^2$  – площадь сечения канала дуги (рис. 1.3,б).

Давление в капле в таком случае составит:

$$\begin{aligned} P_k &= (9,87 \cdot 10^{-9} \cdot 13 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot 4,6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2) \cdot 1,01^6 \text{ дин/cm}^2 + \frac{2 \cdot 980 \text{ дин/cm}}{0,15 \cdot 10^{-4} \text{ см}} = \\ &= 6 \cdot 10^6 \text{ дин/cm}^2 + 1,3 \cdot 10^6 \text{ дин/cm}^2 = 7,3 \cdot 10^6 \text{ дин/cm}^2. \end{aligned}$$

В результате превышения давления жидкого металла в капле над нормальным атмосферным, температура его кипения также будет превышать температуру кипения металла при нормальном давлении. Если капля окажется на периферии канала дуги и она будет соприкасаться с внешней средой, то её жидкий металл окажется перегретым и он будет бурно вскипать. В результате фазового перехода металла капли из жидкого состояния в газообразное образовавшиеся пары могут прорвать оболочку капли и будут истекать во внешнюю среду в виде струи плазмы.

По данным [1.7] при давлении 8,0 атмосфер температура насыщенных паров *Ag* составляет  $T_{нас}=3020$  К. Плотность насыщенного пара *Ag* в капле можно определить по формуле:

$$\rho = m_0 \cdot n_0,$$

где  $m_0 = 179,1 \cdot 10^{-24}$  г – масса атома *Ag* и  $n_0$  – концентрация паров *Ag*,  $см^{-3}$ , которую можно определить из формулы:

$$P = n_0 \cdot k \cdot T,$$

где  $P$  – давление паров,  $дин/см^2$ ,  $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/К – постоянная Больцмана,  $T$  – температура паров, К. В рассматриваемом примере можно принять для оценочных расчётов, в устье истечения струи из капли концентрацию насыщенного пара равной:

$$n_0 = \frac{P_k}{k \cdot T_{нас}} = \frac{7,3 \cdot 10^6 \text{ дин/см}^2}{1,38 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/К} \cdot 3020 \text{ К}} = 1,75 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

Плотность паров, истекающих из капли:

$$\rho_{пар} = m_0 \cdot n_0 = 179,1 \cdot 10^{-24} \text{ г} \cdot 1,75 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} = 31,3 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3.$$

Скорость истечения пара *Ag* в устье капли может составлять:

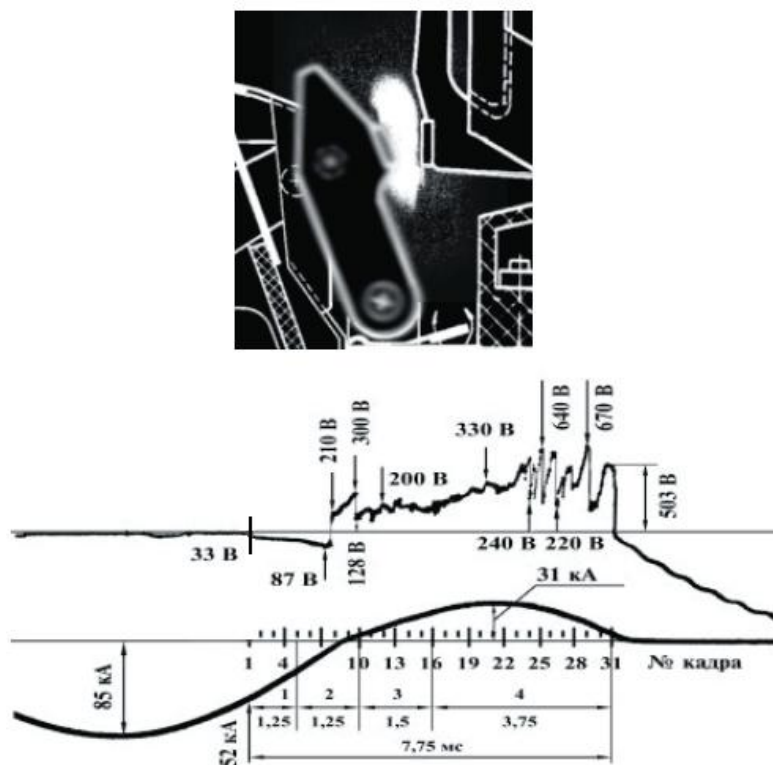
$$v_{пар} = \left( \frac{2 \cdot P_k}{\rho_{пар}} \right)^{1/2} = \left( \frac{2 \cdot 7,3 \cdot 10^6 \text{ дин/см}^2}{31,3 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3} \right)^{1/2} = 6,83 \cdot 10^4 \text{ см/с}.$$

## 1.2. Разрушение мостика джоулевым теплом

Скорость переднего фронта светящейся струи, показанной на рис. 1.3, б, по экспериментальным данным [1, ч. II, с. 34] составляет  $27 \text{ м/с}$ . Снижение скорости течения переднего фронта струи плазмы от устья её истечения происходит за счёт аэродинамического сопротивления, которое оказывает ей воздух окружающей среды.

Результаты оценочных расчётов параметров струи плазмы, истекающей из плавающей капли жидкого металла в канале мощной дуги, достаточно убедительно объясняют возможность её истечения. Однако истечение струи плазмы из межконтактного зазора происходит не в момент времени размыкания контактов, а после момента времени возбуждения дугового разряда.

На рис. 1.6 приведена фотография первого кадра скоростной киносъёмки размыкания контактов и осциллограмма тока и напряжения дуги.



**Рис. 1.6.** Взрывной процесс размыкания контактов при мгновенном значении тока, равном  $52 \text{ кА}$ . Время экспозиции одного кадра  $0,25 \text{ мс}$ .

В момент времени размыкания контактов мгновенное значение тока было равно  $52 \text{ кА}$  и напряжение на контактах скачком достигло  $33 \text{ В}$ . На фотографии видно, что размыкание контактов имеет явно взрывную форму. За время съёмки первого кадра в межконтактном зазоре выделилось энергии:

$$\Delta W = i_{\partial} \cdot u_{\partial} \cdot \Delta t = 52 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot 33 \text{ B} \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ c} = 429 \text{ Вт} \cdot \text{c} .$$

По фотографии на рис. 1.6 размеры мостика определить невозможно. Поэтому объём и массу мостика в этом случае определим с помощью расчёта. За расчётную модель мостика примем модель струи жидкого металла, образующейся на катоде вакуумной дуги (см. рис. 1.7) [1.4, с.237]. Жидкометаллический мостик можно представить в виде двух струй жидкого металла, направленных навстречу друг другу. Струи жидкого металла на катоде подвергаются взрыву [1.4, с. 289]. На месте взорванной струи образуется кратер. Принято [1.4, с. 338], что расширение кратера прекращается, «тогда, когда джоулев диаметр сравнивается с диаметром теплопроводности». Из рис. 1.7 видно, что диаметр кратера равен диаметру основания струи жидкого металла.

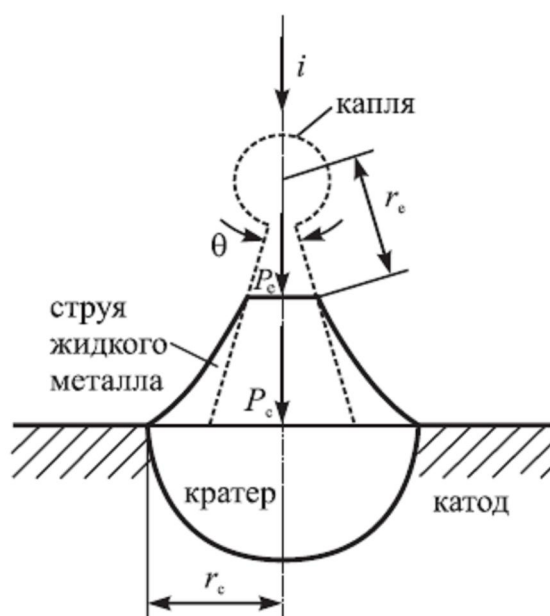


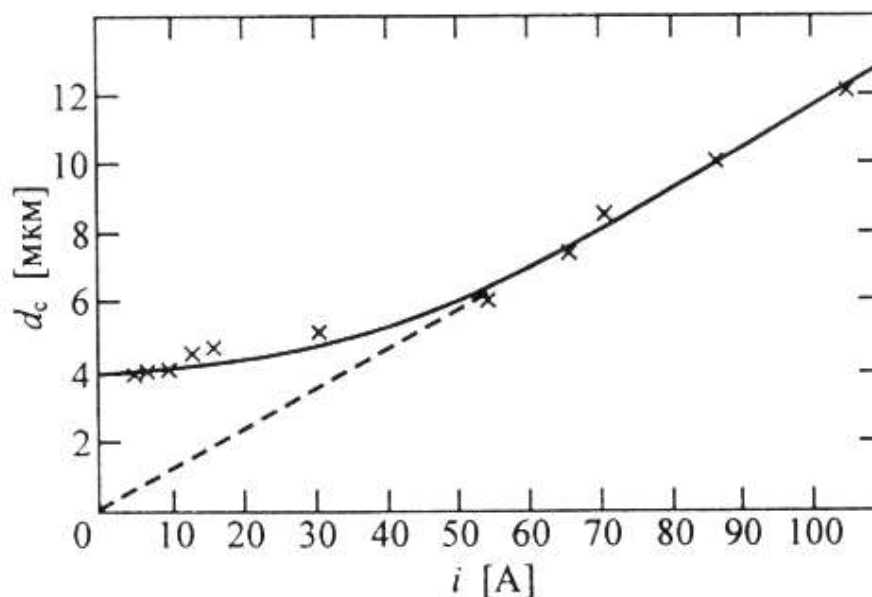
Рис.1.7 [1.4]. Струя жидкого металла,  $r_c$  – радиус зоны расплавленного металла,  $P_c$  – давление плазмы на жидкий металл,  $i$  – ток.

На рис. 1.8 [1.4, с. 338] показан график зависимости диаметра кратера на медном катоде от значения силы тока. При силе тока, превышающей 50 А, зависимость  $d_{\kappa}(i)$  становится линейной. Диаметр кратера определяется формулой [1.4, с. 339]:

$$d_{\kappa} = \frac{i}{2 \cdot \pi \cdot (a \cdot \bar{h})^{1/2}},$$

## 1.2. Разрушение мостика джоулевым теплом

где  $a$  – коэффициент температуропроводности и  $\bar{h}$  – удельное действие для взрыва струи жидкого металла.



**Рис. 1.8 [1.4].** Зависимость наиболее вероятного диаметра кратера от катодного тока для вакуумной дуги с медным катодом, имеющей единичное катодное пятно.

Если применить приведённую формулу для грубой оценки диаметра основания мостика при отключении тока КЗ, то в рассматриваемом примере будем иметь:

$$d_M = \frac{i_\partial}{2 \cdot \pi \cdot (a \cdot \bar{h})^{1/2}} =$$

$$= \frac{52 \cdot 10^3 \text{ A}}{2 \cdot \pi \cdot (0,55 \text{ см}^2/\text{с} \cdot 2 \cdot 10^9 \text{ A}^2 \cdot \text{с}/\text{см}^4)^{1/2}} \cong 0,25 \text{ см},$$

где для жидкого  $Ag$   $a = 0,55 \text{ см}^2/\text{с}$  [1.4, с.123] и  $\bar{h} = 2 \cdot 10^9 \text{ A}^2 \cdot \text{с}/\text{см}^4$  [1.4, с.109].

Полученное значение диаметра основания мостика сопоставимо со значениями диаметров оснований мостиков при отключении токов равных  $7,5 \cdot 10^3 \text{ A}$  ( $d_m = 0,35 \text{ см}$ ) и  $13 \cdot 10^3 \text{ A}$  ( $d_m = 0,48 \text{ см}$ ). Однако, следует заметить, что масса жидкого металла мостика при токе  $52 \cdot 10^3 \text{ A}$ , при котором про-



## Глава 1. Возбуждение дугового разряда при отключении токов

исходит его взрыв, вероятно должно быть меньше, чем при токах  $7,5 \cdot 10^3 \text{ A}$  и  $13 \cdot 10^3 \text{ A}$ , при которых мостики испаряются. Убедимся, что мостик при токе  $52 \cdot 10^3 \text{ A}$  действительно взрывается.

Объём мостика, принятого за цилиндр, равен:

$$V_m = \pi \cdot r_m^2 \cdot \delta = \pi \cdot (0,125 \text{ см})^2 \cdot 0,05 \text{ см} = 2,45 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3,$$

где  $\delta = v_k \cdot \Delta t = 2 \cdot 10^2 \text{ см/с} \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 0,05 \text{ см}$  – длина мостика,  
 $v_k = 2 \cdot 10^2 \text{ см/с}$  – средняя скорость размыкания контактов и  
 $\Delta t = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  – время экспозиции одного кадра при киносъёмке.

Масса жидкого  $\text{Ag}$ , составляющая мостик, при температуре его плавления равна:

$$m_m = \rho_{жс} \cdot V_m = 9,32 \text{ г/см}^3 \cdot 2,45 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3 = 2,28 \cdot 10^{-2} \text{ г}.$$

Удельная энергия жидкого металла мостика, в таком случае, оказывается равной:

$$\Delta \omega_m = \frac{\Delta W}{m_m} = \frac{429 \text{ Дж}}{2,28 \cdot 10^{-2} \text{ г}} = 1,88 \cdot 10^4 \text{ Дж/г}.$$

Значение  $\Delta \omega_m = 1,88 \cdot 10^4 \text{ Дж/г}$  значительно превосходит удельную энергию сублимации  $\text{Ag}$ :

$$\Delta \omega_m = 1,88 \cdot 10^4 \text{ Дж/г} \gg 2,36 \cdot 10^3 \text{ Дж/г} = \Delta W_{исп}^{Ag}.$$

Следовательно, жидкометаллический мостик из  $\text{Ag}$  при токе  $52 \cdot 10^3 \text{ A}$  действительно должен взорваться.

Плотность тока в мостике может достигнуть значения:

$$j_m = \frac{i}{S_m} = \frac{52 \cdot 10^3 \text{ A}}{4,9 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2} = 1,06 \cdot 10^6 \text{ A/см}^2,$$

## 1.2. Разрушение мостика джоулевым теплом

---

где  $S_m = \pi \cdot r_m^2 = \pi \cdot (0,125 \text{ см})^2 = 4,9 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ .

Давление в канале мостика в таком случае может иметь значение:

$$\begin{aligned} P_m &= 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot j_m \frac{A}{\text{см}^2} \cdot i \text{ А} = \\ &= 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot 1,06 \cdot 10^6 \frac{A}{\text{см}^2} \cdot 52 \cdot 10^3 \text{ А} = 5,44 \cdot 10^2 \text{ атм} = 5,44 \cdot 10^7 \text{ Па} . \end{aligned}$$

Значения плотности тока  $1,06 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2$  и давления  $5,44 \cdot 10^7 \text{ Па}$  ниже на два порядка и на порядок соответственно значений  $10^8 \text{ А/см}^2$  и  $10^8 \text{ Па}$ , при которых происходят электрические взрывы металлов. Однако следует учесть, что достаточно высокое давление в жидкометаллическом мостике приводит его к перетяжке и разрыву. Если в процессе перетяжки мостика его сечение в самой узкой части уменьшится до  $0,01 \text{ см}^2$ , то плотность тока и давление будут равны:

$$\begin{aligned} j_{m.max} &= \frac{i}{S_{m.min}} = \frac{52 \cdot 10^3 \text{ А}}{0,01 \text{ см}^2} = 5,2 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2 ; \\ P_{m.max} &= 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot j_{m.max} \cdot i = \\ &= 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot 5,2 \cdot 10^6 \frac{A}{\text{см}^2} \cdot 52 \cdot 10^3 \text{ А} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ атм} = 2,7 \cdot 10^8 \text{ Па} . \end{aligned}$$

Давление, равное  $2,7 \cdot 10^8 \text{ Па}$ , вполне достаточно для возбуждения взрывной формы разрушения жидкометаллического мостика.

Здесь целесообразно оценить скорость роста тока в мостике, возникающем при размыкании контактов. Определить точное время разрушения мостика по осциллограмме на рис. 1.6 не представляется возможным. Поэтому примем его равным времени экспозиции одного кадра скоростной киносъёмки. Тогда скорость роста тока в мостике составит:

$$\frac{i}{\Delta t} = \frac{52 \cdot 10^3 \text{ А}}{0,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 2,08 \cdot 10^8 \text{ А/с} .$$

Согласно точке зрения, изложенной в [1.4], при  $di/dt > 10^8 \text{ A/c}$  на катоде происходят качественные изменения, которые приводят к изменению спектра излучения плазмы, возникновению новых ячеек, резкому повышению скорости перемещения пятен и т.д.

При исследовании дуги большой мощности [1.1] использовались металло-керамические серебрясодержащие контакты на основе никеля. Энергия сублимации *Cu*, *Ag*, *Ni*, и *Fe* по данным [1.7] составляет:

$$Ag - 2,36 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}; Cu - 5,28 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}; Ni \text{ и } Fe - 7,03 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}.$$

Следовательно, для взрыва *Ag* требуется меньше удельной энергии, чем для взрыва *Cu* и тем более *Ni*. Поэтому в серебрясодержащих контактах, композиция которых состоит из 70% *Ag* и 30% *Ni*, взрыву подвержено в основном *Ag*. Исходя из изложенного вытекает, что скорость роста тока в мостике на серебрясодержащих контактах равная  $2,08 \cdot 10^8 \text{ A/c}$  приводит к взрывному механизму формирования дугового разряда и на его опорных пятнах следует ожидать протекание весьма бурных процессов.

Заметим, что в рассматриваемом примере скорость ввода Джоулева тепла в жидкометаллический мостик равна:

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{429 \text{ Дж}}{0,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 1,72 \cdot 10^6 \text{ Дж/с}.$$

Введение параметра скорости роста джоулева тепла обосновывается тем, что при размыкании контактов имеет место и скорость роста напряжения. При спокойном разрушении мостика напряжение на размыкаемых контактах растёт плавно. При взрывном разрушении мостика напряжение на контактах в момент времени их размыкания возрастает скачком и может достигать разных значений. Для учёта влияния значения напряжения на размыкаемых контактах на вероятность разрушения мостика взрывом целесообразно учитывать скорость ввода энергии в мостик. Скорость роста энергии, вводимой в мостик равной  $1,7 \cdot 10^6 \text{ Дж/с}$ , можно принимать за критическое значение, которое приводит к взрывному разрушению жидкометаллического мостика из *Ag*.

## 1.3. Разрушение жидкометаллического мостика на размыкаемых контактах импульсным магнитным полем

Жидкометаллический мостик, возникающий при отключении тока между размыкаемыми контактами может быть разрушен не только джоулевым теплом, но и механически с помощью импульсного магнитного поля.

В некоторых конструкциях контакторов и пускателей применяют для более интенсивного гашения дуги магнитное дутьё, создаваемое серийными катушками в сочетании с ферромагнитными системами. В [1.8] показано, что напряжённость поля магнитного дутья, создаваемого серийными катушками в аппаратах с номинальным током до  $1000\text{ А}$  может достигать нескольких сот эрстед. Из-за конструктивных особенностей устройств магнитного дутья в их магнитных системах при достаточно больших значениях силы токов наступает насыщение и рассеивание магнитного поля.

Движущей силой, приводящей дугу в движение, является сила взаимодействия тока  $I$  с внешним магнитным полем  $H$ , которая, отнесённая к единице длины канала дуги, определяется по формуле [1.8]:

$$f = 1,02 \cdot I \cdot H \cdot 10^{-4} \text{ г/см},$$

где  $I$  – ток, протекающий по дуге,  $A$  и  $H$  – напряжённость внешнего магнитного поля, Э. Подчеркнём, что основной параметр, определяющий движущую силу, воздействующую на дугу, определяется произведением  $I \cdot H$ . Так как напряжённость поля, равная  $1,0$  Э, соответствует магнитной индукции  $B=1,0\text{ Гс}$ , то в дальнейшем для оценки силы, воздействующей на дугу, будет использоваться параметр  $I \cdot B$ ,  $A \cdot \text{Гс}$ .

По данным [1.8] дуга по параллельным электродам с расстоянием между ними  $10\text{ мм}$  при  $I \cdot B = 10^3\text{ А} \cdot 10^3\text{ Гс} = 10^6\text{ А} \cdot \text{Гс}$  может двигаться со скоростью  $145\text{ м/с}$ . При расстояниях между электродами в диапазоне  $1,0\text{-}2,0\text{ мм}$  и  $I \cdot B = 400\text{ А} \cdot 930\text{ Гс} = 3,72 \cdot 10^5\text{ А} \cdot \text{Гс}$  дуга может двигаться со скоростью  $90\text{-}100\text{ м/с}$ . Однако, при токе  $7 \cdot 10^3\text{ А}$  между медными электродами при расстоянии между ними  $1,0\text{ мм}$  и железными  $2,0\text{ мм}$  возникала жидкокапельная перемычка, которая оставалась неподвижной.

При токе  $400\text{ А}$  жидкометаллический мостик возникал при расстоянии между электродами  $0,3\text{ мм}$ . При  $I \cdot B = 3,72 \cdot 10^5\text{ А} \cdot \text{Гс}$  этот мостик мог двигаться по электродам со скоростью  $\sim 3\text{ м/с}$ . Если представить, что жидкометаллический мостик возник на размыкающихся контактах, длина которых равна  $20\text{ мм}$ , то при скорости его движения  $3,0\text{ м/с}$  он сможет выйти из межконтактного зазора за время:

$$t_{.м} = \frac{l}{v_{.м}} = \frac{20 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{3,0 \text{ м/с}} = 6,67 \text{ мс.}$$

Среднестатистическое время неподвижности дуги при отключении токов КЗ при скорости размыкания контактов  $2,0 \text{ м/с}$  по данным [1.1. ч. II, с. 54] составляет  $5,45 \text{ мс}$ . За это время переменный ток КЗ в электрической цепи будет нарастать и может достичь практически максимального своего значения. Для быстросрабатывающих токоограничивающих выключателей это недопустимо.

Экспериментально установлено, что при отключении токов КЗ дуга начинает двигаться по контактам при достижении зазора между ними не менее  $(8 \div 10) \text{ мм}$ . Скорость размыкания контактов автоматических выключателей отечественного и зарубежного производства, как правило, составляет не более  $2,0 \text{ м/с}$ . Зазор, равный  $\delta = 10 \text{ мм}$ , при скорости размыкания контактов  $v = 2,0 \text{ м/с}$  будет достигнут за время:

$$t = \frac{\delta}{v} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{2,0 \text{ м/с}} = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 5,0 \text{ мс.}$$

Более того, напряжение на неподвижной дуге между контактами не превышает  $60 \text{ В}$  и оно намного ниже амплитудного значения фазного напряжения сети, составляющего  $341 \text{ В}$  или  $592 \text{ В}$  в зависимости от номинального напряжения сети [1.1, ч. II, с. 241]. При таком соотношении напряжения на дуге и фазного тока дуги не может заметно ограничиться по отношению к ожидаемому току КЗ. По этим двум причинам ток КЗ после размыкания контактов в течение  $\sim 5,0 \text{ мс}$  будет нарастать.

Если придать контактам скорость размыкания  $\sim (6 \div 8) \text{ м/с}$ , то время нарастания тока КЗ будет равным [1.1, ч. II, с. 119]:

$$t_{\delta, \text{max}} = \frac{l}{v} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{(6 \div 8) \text{ м/с}} = (1,67 \div 1,25) \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Время  $(1,67 \div 1,25) \text{ мс}$  оказывается также достаточно продолжительным, так как именно за это время не только продолжает нарастать ток КЗ, но и контакты подвергаются максимальной эрозии [1.1, ч. II, с. 129]. Поэтому при размыкании контактов к дуге необходимо приложить внешнее импульсное магнитное поле, которое выбросило бы дугу из зазора между контактами, равного  $(1,0 \div 2,0) \text{ мм}$ . При указанных условиях время задержки дуги на контактах и нарастания тока КЗ составит:

$$t_{\delta, \text{max}} = \frac{l}{v} = \frac{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{(6 \div 8) \text{ м/с}} = (0,33 \div 0,25) \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

### 1.3. Разрушение... мостика... магнитным полем

Так как время  $t_{0,max}=(0,33\div 0,25)$  мс меньше времени существования жидкометаллического мостика, возникающего в момент размыкания контактов, которое по экспериментальным данным составляет  $\sim 0,5$  мс, то при выполнении вышеуказанных условий, нарастание тока дуги практически прекратится «мгновенно» и жидкометаллический мостик досрочно разрушится. Оба указанных обстоятельства, в свою очередь, увеличат эксплуатационный срок службы выключателя.

Для подтверждения возможности дробления жидкометаллического мостика и капель металлов с помощью импульсных магнитных полей был изготовлен макет (рис. 1.9), состоящий из электродов (1) и катушек (2), включённых последовательно и согласно между собой и электродами.

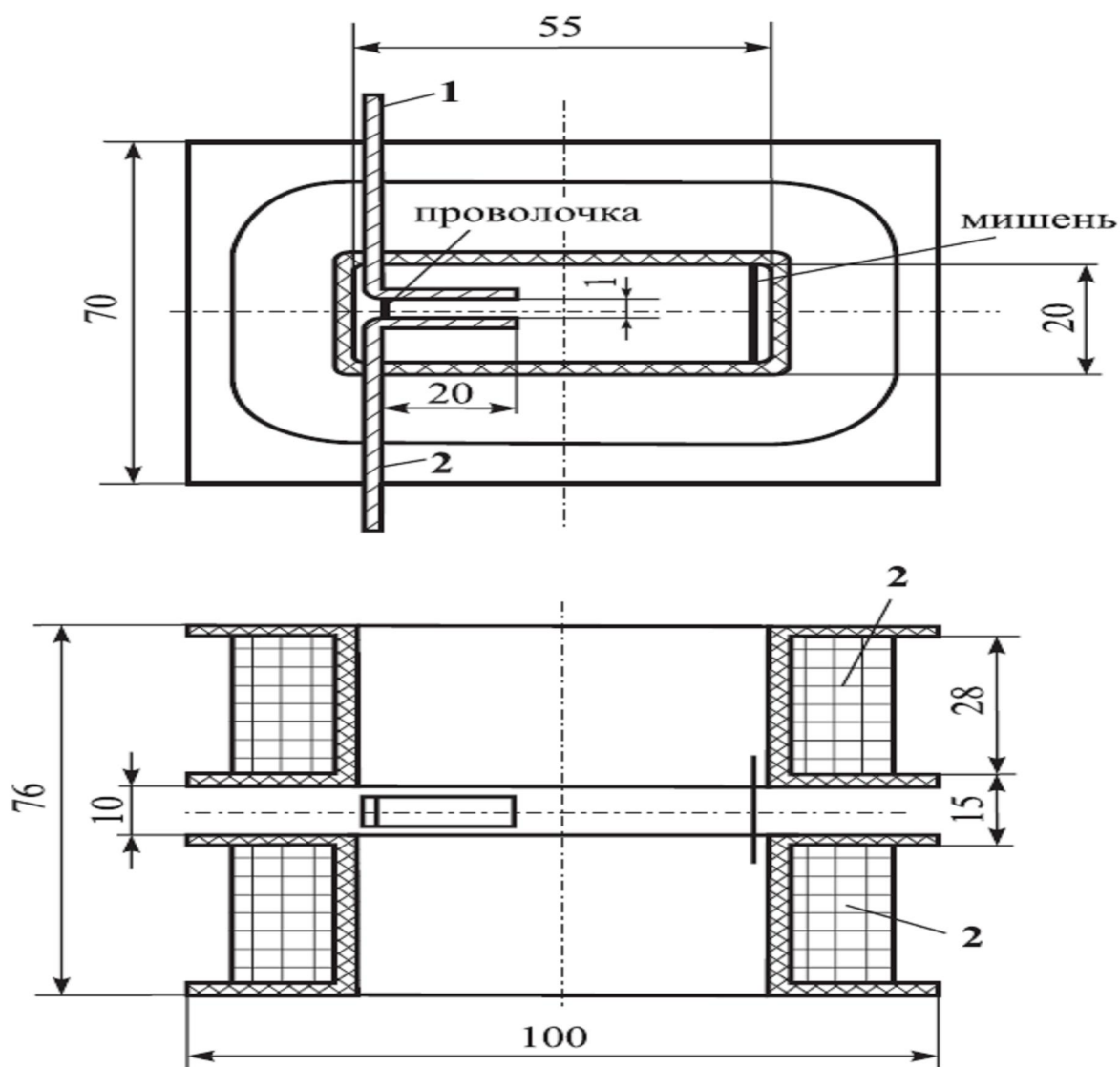


Рис. 1.9. Схема макета для исследования магнитного взрыва медной проволоки между электродами.

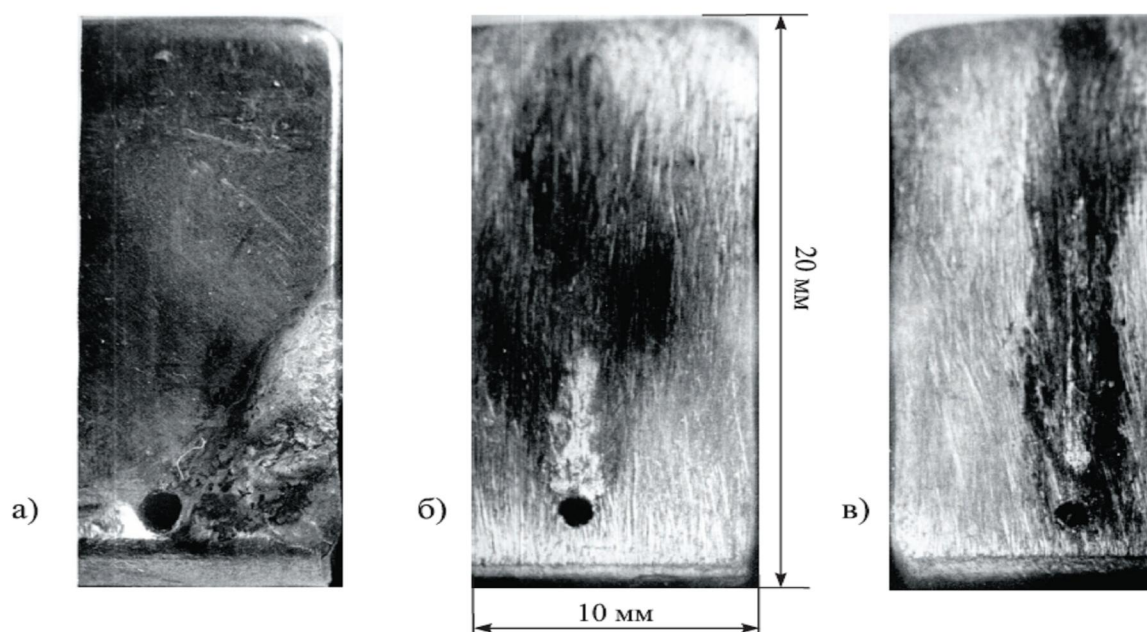
По договорённости с заведующим электрофизической лаборатории Белорусской АН д.т.н. М. К. Мицкевичем и его сотрудником к.ф.-м.н. А. И. Бушик, эксперименты были проведены на оборудовании указанной лаборатории, оснащённой достаточно мощной конденсаторной установкой с напряжением заряда до  $600\text{ В}$  и сверхскоростной киносъёмочной камерой СФР. Между электродами устанавливался зазор в  $1\text{ мм}$ , который перемыкался медной проволочкой диаметром  $0,35\text{ мм}$ . Синхронно с разрядом запускалась кинокамера. Скорость киносъёмки составляла  $250000\text{ кадр/с}$ . На расстоянии приблизительно  $40\text{ мм}$  от электродов в направлении выброса потока плазмы устанавливалась стеклянная мишень, которая должна была улавливать капли. После каждого проведённого эксперимента фотографировались остатки перегоревшей проволочки на поверхности электродов, следы, оставленные опорными пятнами дуги при её движении, и капли, осевшие на мишени. На месте взорванной проволочки возбуждалась дуга. Капли, образованные в результате взрыва проволочки, представляют собой её осколки.

По кинограмме сверхскоростной киносъёмки определялась форма и протяжённость потока плазмы, скорость распространения фронта потока плазмы и движения дуги по электродам.

При отсутствии внешнего магнитного поля, дуга, максимальное мгновенное значение силы тока которой составляло  $2150\text{ А}$ , возникшая в результате перегорания медной проволочки, смещалась на край электродов и оставляла значительные оплавления. На электродах наблюдались расплавленные остатки проволочки (рис. 1.10, а). На мишени капли отсутствовали.

При наличии импульсного поля с максимальной индукцией около  $3000\text{ Гс}$  и токе  $2150\text{ А}$  на месте взрыва медной проволочки наблюдались незначительные оплавленные её остатки. Следы дуги на электродах относительно широкие (наибольший их размер составлял  $6\text{ мм}$ ), занимали поверхность электродов на всём их протяжении от места расположения проволочки до их передней кромки. На электродах следы оплавления отсутствовали (рис. 1.10, б). Скорость распространения фронта потока плазмы дуги в направлении действия магнитного поля была более  $400\text{ м/с}$ . На мишени оказалось множество капель металла с размерами до  $200\text{ микрон}$ .

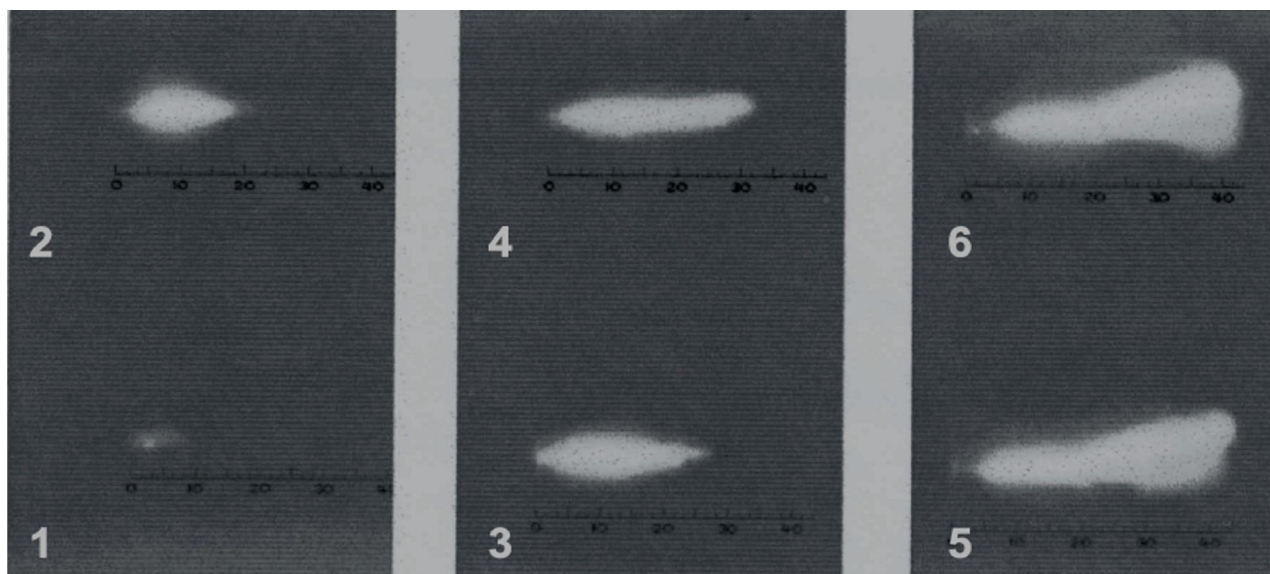
При приложении импульсного магнитного поля с максимальной магнитной индукцией  $12700\text{ Гс}$  на электродах остались слабые следы в виде дорожки шириной  $3\text{ мм}$  без оплавлений и треков движения очень мелких капелек жидкой меди (рис. 1.10, в).



**Рис. 1.10.** Вид поверхности электродов в результате пережигания медной проволоочки диаметром  $0,35\text{ мм}$  в зазоре между электродами, равном  $1,0\text{ мм}$ . Максимальное мгновенное значение тока равно  $2150\text{ А}$ . а) Следы дуги на электродах в случае отсутствия внешнего магнитного поля, б) Следы дуги на электродах при воздействии импульсного магнитного поля с индукцией  $3000\text{ Гс}$ . в) Следы дуги на электродах при воздействии импульсного магнитного поля с индукцией  $12700\text{ Гс}$ .

На Рис. 1.11 показаны последовательные кадры сверхскоростной киносъёмки перегорания проволоочки, выброса дуги и потока плазмы из межконтактного промежутка с зазором  $1\text{ мм}$  импульсным магнитным полем с индукцией в максимуме  $B=12700\text{ Гс}$ . В данном случае, время сосуществования проволоочки составило  $130\text{ мкс}$ . В это время входит и время перегорания проволоочки. Скорость движения фронта потока плазмы составила  $720\text{ м/с}$ , а скорость движения самой дуги  $158\text{ м/с}$ . Магнитное поле выдувает из межконтактного промежутка одновременно и плазму в виде факелов и саму дугу. Но скорость движения фронта потока плазмы значительно выше скорости движения самой дуги. Мощное импульсное магнитное поле вместе с выбросом плазмы в виде факелов очищает межконтактный промежуток от остатков взорванной проволоочки и паров металла.



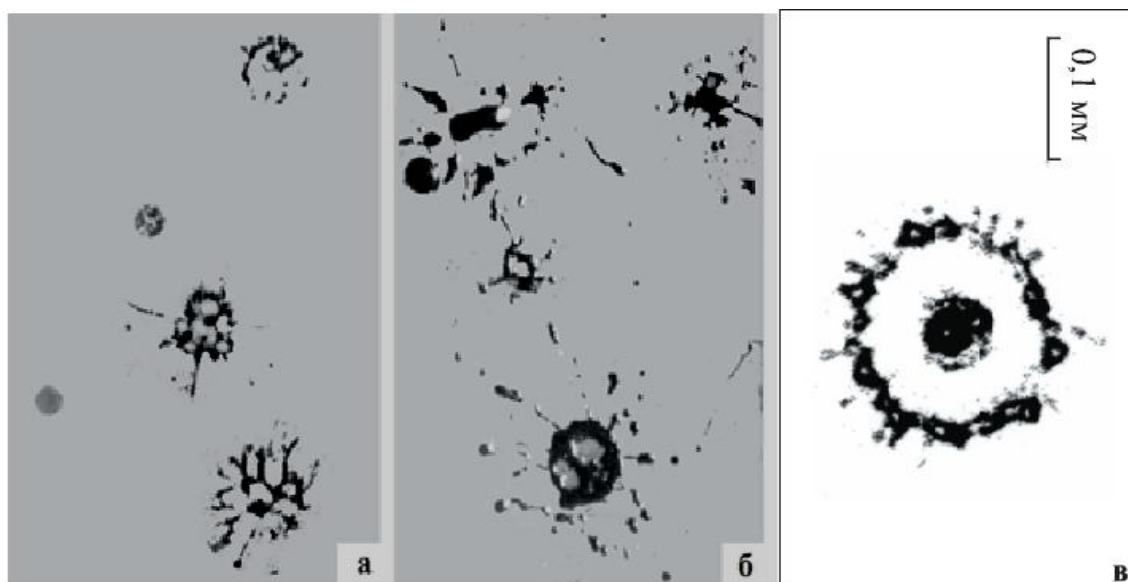


**Рис. 1.11.** Кадры сверхскоростной киносъёмки дуги в межконтактном промежутке 1 мм. Максимальная сила тока 2150 А, максимальная индукция магнитного поля 1,27 Тл, время неподвижности дуги 130 мкс, скорость фронта плазмы 720 м/с, скорость движения дуги 158 м/с.

На рис. 1.12 показано несколько фрагментов из общего роя раздробленных капель, осевших на стеклянных мишенях. На photographs хорошо видны капли различной формы с широким спектром их размеров. Жидкие капли при полёте в результате воздействия сил аэродинамического давления приобретают форму плоских дисков, в которых возникают прорывы, и в дальнейшем происходит их дробление (рис. 1.12, а и б).

Особо отметим интересный факт, заключающийся в том, что на мишенях нашлось много семейств капель, у которых в центре совершенно правильного круга, образованного мелкими каплями, расположена относительно большая капля (рис. 1.12, в). При полёте крупные капли не просто дробятся, а с их поверхности срываются более мелкие, которые рассеиваются по конусу с углом в вершине  $\sim 20^\circ$ . При соударении капель с поверхностью мишени они приобретают несколько вытянутую форму в радиальном направлении от центра круга. В ряде случаев у мелких капель имеются хвостики в виде тонких нитей, которые показывают направление полёта капель.

### 1.3. Разрушение... мостика... магнитным полем



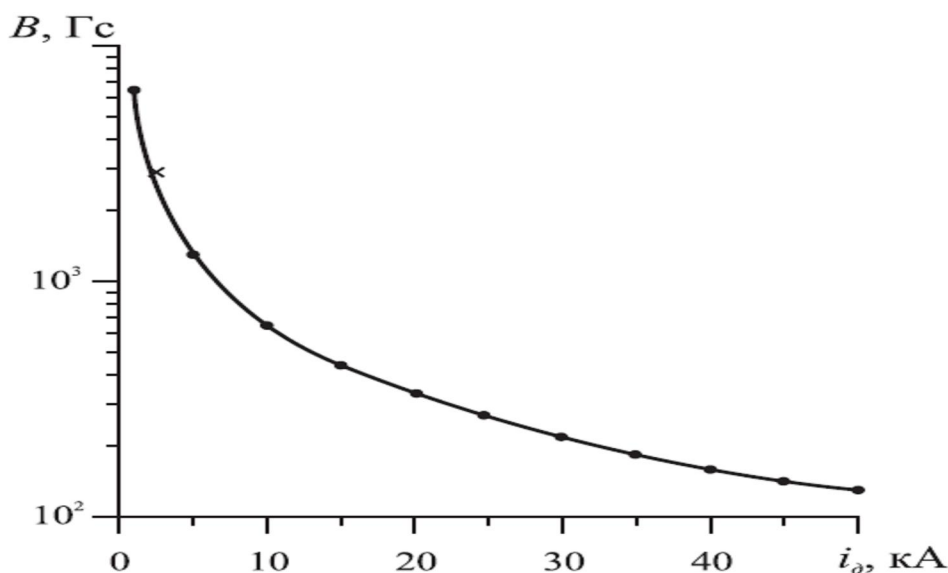
**Рис. 1.12. Отдельные фрагменты раздробленных капель, являющихся остатками взорванной проволочки, осевших на мишенях.**

Наконец, можно сделать вывод, что дуга при скорости движения 100-150 м/с и длине контактов 20 мм может покинуть межконтактный промежуток с зазором 1 мм за время 0,15-0,2 мс. Для того, чтобы дуга начала движение по контактам, фронт потока плазмы должен двигаться со скоростью не менее 250 м/с, при которой будут дробиться относительно крупные капли [1.1, ч. II, с. 74].

В соответствии с экспериментальными данными, для обеспечения дробления мостика и капель произведение значения силы тока дуги  $i_d$  и индукции  $B$  магнитного поля в зазоре между контактами должно быть не менее:

$$i_d \cdot B = 2150 \text{ А} \cdot 3000 \text{ Гс} = 6,5 \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{Гс}.$$

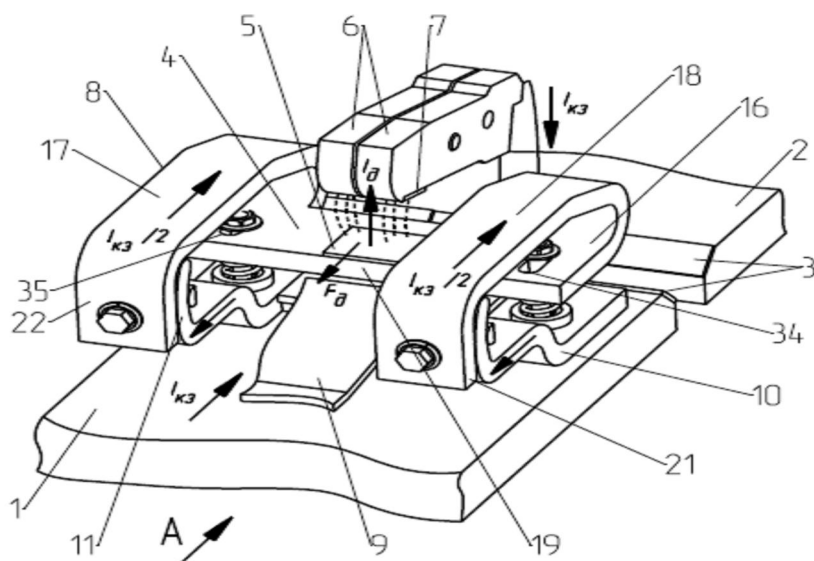
На рис. 1.13 приведён график минимальной магнитной индукции  $B$  в зазоре между контактами, необходимой для обеспечения движения дуги и дробления мостика и крупных капель из меди, в зависимости от мгновенного значения силы тока  $i_d$ . Необходимое значение магнитной индукции в зазоре между контактами должно быть обеспечено либо за счёт контура тока контактной системы, либо внешних электромагнитных устройств. Заметим, что такие условия позволили бы успешно гасить дугу и при отключении малых критических и многократно номинальных токов.



**Рис. 1.13.** Минимальная магнитная индукция  $B$  в зазоре между контактами, необходимая для обеспечения дробления мостика и крупных капель из меди и начала движения дуги, в зависимости от мгновенного значения силы тока  $i_d$ .

Для быстродействующего токоограничивающего выключателя на 6300 А номинального тока и номинального напряжения сети до 660 В была разработана оригинальная конструкция серийной катушки магнитного дутья, совмещённая с конструкцией малоподвижного дугогасительного контакта без применения ферромагнитной системы, показанной на рис. 1.14 [1.9].

Малоподвижный дугогасительный контакт, устанавливаемый на верхнем токопроводе выключателя, представляет собой серийную электромагнитную катушку, состоящую из двух параллельных витков, соединённых перемычкой, на которую припаивается металлокерамический контакт (КМК). Размыкаемые контакты располагаются между двумя витками внутри их окна. Подобное взаимное расположение размыкаемых контактов и окна катушки обеспечивает максимальное воздействие магнитного поля катушки на электрическую дугу, возникающую при отключении как малых критических и номинальных токов, так и токов перегрузки и короткого замыкания. Серийная катушка должна обеспечить минимальное время неподвижности дуги на контактах при их размыкании.



**Рис. 1.14. Контактная система, совмещенная с серийной катушкой магнитного дутья.**

Для оценки воздействия магнитного дутья на жидкометаллический мостик и дугу в зоне их возникновения были рассчитаны форма магнитных полей (рис. 1.15) и численные значения магнитной индукции, при значениях токов 63 и 630 А, соответствующих малым критическим токам для автоматических выключателей и при номинальном токе 6300 А. Результаты расчётов приведены в таблице 1.3. Расчёты были выполнены для межконтактного зазора, равного 2,0 мм, то есть длина дуги равна 2,0 мм и её диаметр был принят равным 2,0 мм.

При токе в контуре 63 А магнитная индукция в зоне размыкания контактов от серийной катушки может составить (8÷11) Гс, скорость движения дуги по данным [1.8] будет не менее 10 м/с и она погаснет за время менее 0,1 с.

При токе 630 А магнитная индукция в зазоре между контактами может составить 60 Гс, а скорость движения дуги не менее 20 м/с и время гашения дуги при этом не превысит 10 мс.

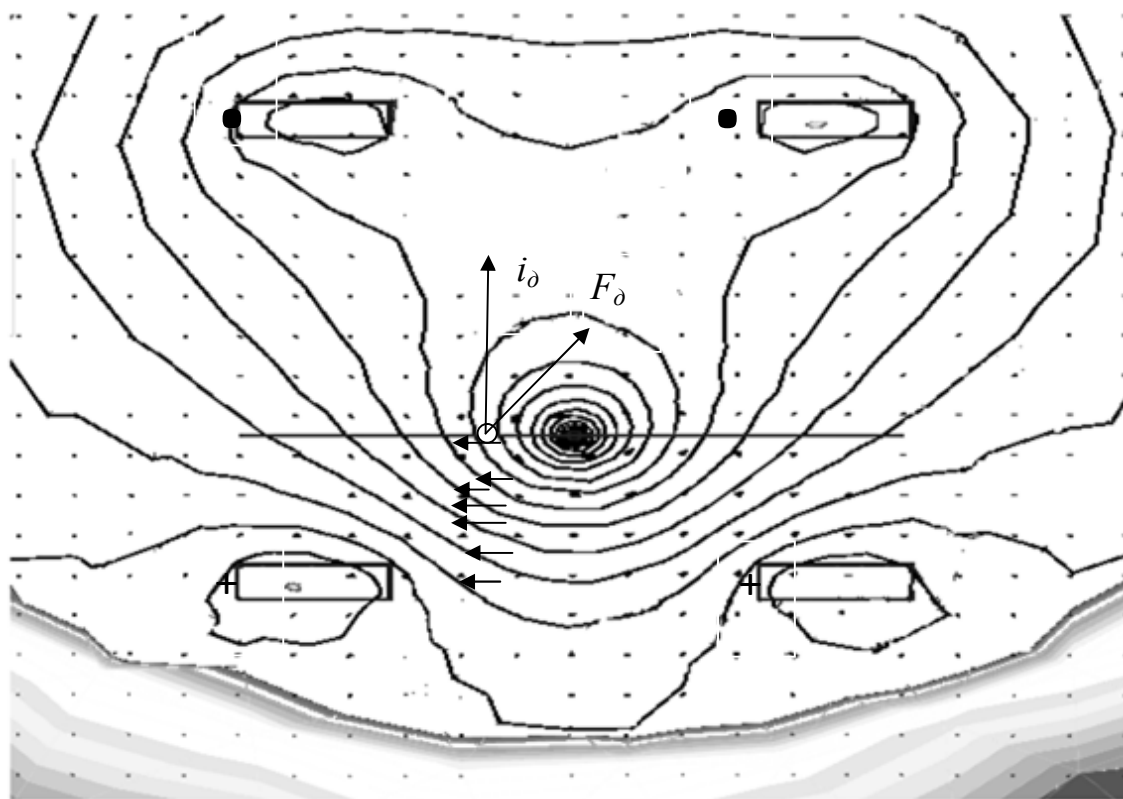


Рис. 1.15. Форма магнитного поля, создаваемого серийной катушкой, в зоне возникновения дуги.

Следовательно, с помощью магнитного дутья, создаваемого серийной катушкой дуга при любых значениях малых критических токов будет успешно гаситься.

При номинальном токе  $6300\text{ А}$  магнитная индукция в межконтактном зазоре может превысить значение  $1000\text{ Гс}$ . В таком случае произведение  $I \cdot B$  может составить  $\geq 7 \cdot 10^6\text{ А} \cdot \text{Гс}$ . При  $I \cdot B \geq 6,5 \cdot 10^6\text{ А} \cdot \text{Гс}$  дуга и капли жидкого металла взорванного мостика могут быть выброшены из межконтактного зазора  $1,0\text{ мм}$  за время  $0,15 \div 0,2\text{ мс}$ . Таким образом будет достигнут максимальный эффект по ограничению роста тока КЗ. Дуга будет двигаться по контактам со скоростью  $\geq 100\text{ м/с}$ , передний фронт плазмы и увлекаемые ею капли будут двигаться со скоростью до  $400\text{ м/с}$ . При такой скорости движения капли из  $\text{Ag}$ ,  $\text{Cu}$  и  $\text{Ni}$  будут дробиться на мелкие части, что позволит дуге свободно двигаться между контактами и за их пределами [1.2, ч. II, с. 74, рис. 4.38]. Поверхность контактов практически не будет подвергаться оплавлению и их износ будет незначительным, а эксплуатационный срок службы выключателя существенно увеличится.

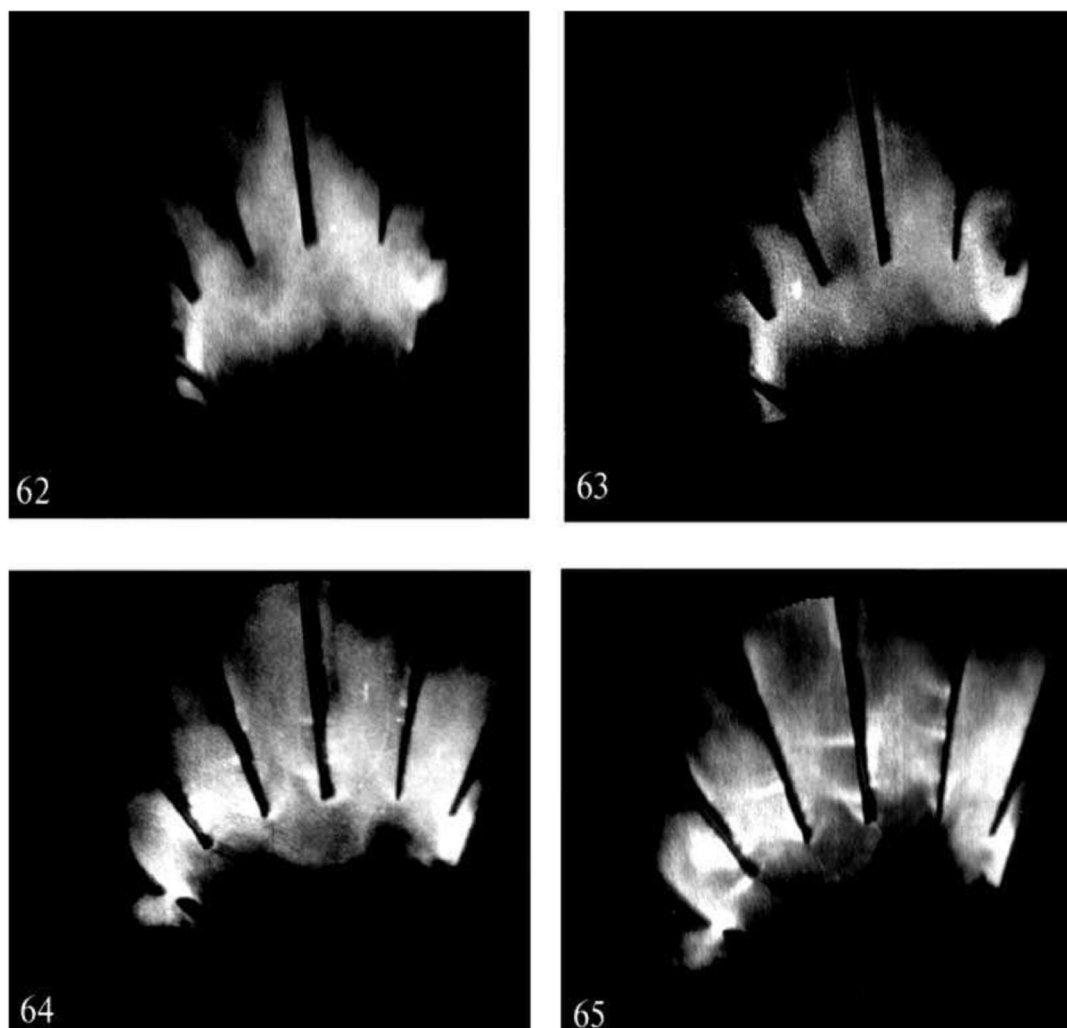
#### 1.4. Возбуждение дуги вдуванием в ... промежуток

**Таблица 1.3. Параметры магнитного дутья, создаваемого серийной катушкой.**

Ток испытательного контура, $A$	Момент времени размыкания контактов $мс$	Мгновенное значение тока дуги $A$	Результирующее значение индукции $Гс$	$I \cdot B$ $A \cdot Гс$	Примечание
63	5,0	89	11,0	980	$v_{\delta} = 10 м/с$ дуга погаснет
630	5,0	890	65,0	$5,8 \cdot 10^4$	$v_{\delta} = 20 \div 30 м/с$ дуга погаснет
6300	1,0	2753	386	$1,06 \cdot 10^6$	взрыв мостика $v_{\delta} = 150 м/с$
	2,0	5237	743	$3,9 \cdot 10^6$	
	3,0	7208	1037	$7,47 \cdot 10^6$	
	4,0	8473	1236	$1,05 \cdot 10^7$	
	5,0	8910	1320	$1,18 \cdot 10^7$	
	6,0	8473	1280	$1,09 \cdot 10^7$	
	7,0	7208	1120	$8,08 \cdot 10^6$	
	8,0	5237	855	$4,48 \cdot 10^6$	
	9,0	2753	509	$1,4 \cdot 10^6$	

#### 1.4. Возбуждение дуги вдуванием плазмы в межэлектродный промежуток

В [1.10, с. 137] приводится пример возбуждения дуги не размыканием контактов, а впрыскиванием плазмы в межэлектродный промежуток с последующим его электрическим пробоем. В таком случае дуга возбуждалась благодаря автоэлектронной эмиссии с катода. Возбуждение дуги можно получить вдуванием плазмы в межэлектродный промежуток, в котором она возникнет в результате термоэлектронной эмиссии. В качестве примера на рис 1.16 представлены несколько кадров скоростной киносъемки возбуждения дуги в дугогасительной камере с деионными пластинами, в результате втекания плазмы.



**Рис 1.16. Возбуждение дуги между деионными пластинами дугогасительной решётки в результате втекания плазмы при  $i_{d.max}=2,5$  кА; экспозиция одного кадра 0,167 мс.**

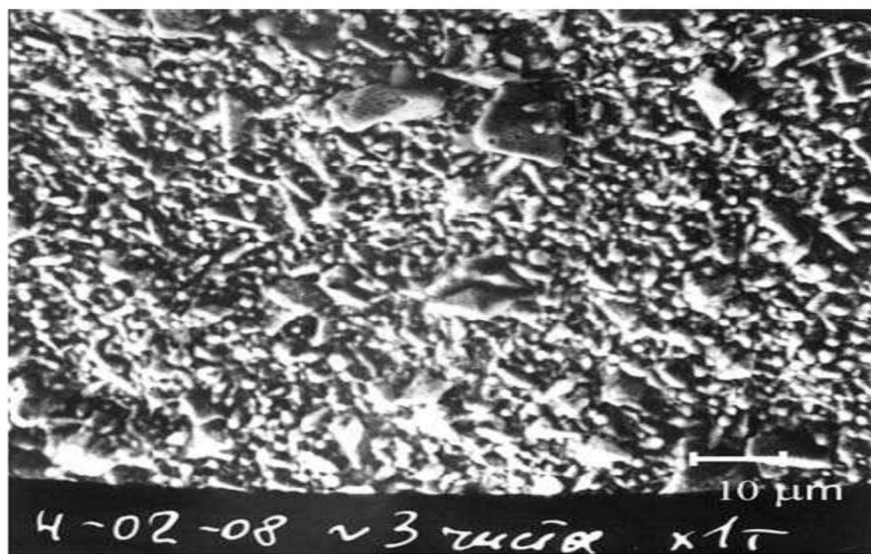
Максимальное мгновенное значение тока дуги достигало  $i_{d.max}=2,5$  кА при фазном напряжении 420 В. Расстояние между нижними кромками пластин равно 24 мм. Плазма диффузной дуги постепенно обволакивает поверхность пластин, температура которых равна температуре окружающей среды. Через 0,7 мс после соприкосновения плазмы с поверхностью пластин на катодных и анодных её сторонах появились яркосветящиеся точки. Из этих точек развились дискретные струйки плазмы, образовавшие в дальнейшем между деионными пластинами дуговой разряд с расщеплённым ядром. В данном случае дуга возбудилась между электродами, которые предварительно были холодными, благодаря термоэлектронной эмиссии.

По осциллограмме, приведённой в [1.1, ч. II, с. 292, рис. 6.20], видно наведение потенциалов на деионных пластинах в момент времени размыкания

#### 1.4. Возбуждение дуги вдуванием в ... промежутки

контактов при отключении электрической цепи, то есть задолго до момента времени начала втекания плазмы в промежутки между деионными пластинами. Поскольку при наведении потенциалов на деионных пластинах их поверхности приобретали определённую полярность, то при втекании плазмы в дугогасительную решётку электроны устремляются к аноду, а ионы – к катоду.

На поверхности омеднённых деионных пластин находятся микронеровности (см. рис. 1.17).



**Рис 1.17. Неэродированный участок поверхности электролитического покрытия из меди деионной пластины (увеличение в 1000 раз).**

Такие микроструктуры могут быть центрами концентрации зарядов, на которых сосредотачиваются силовые линии электрического поля. Под воздействием этого поля центры концентрации зарядов подвергаются бомбардировке электронами и ионами, которая вызывает образование микроструек плазмы.

В [1.1, рис. 21, с. 40] показана дугогасительная камера выключателей на 4000 и 6300 А номинального тока, наибольшая отключающая способность которых при номинальном напряжении 380 В составляет 65 и 115 кА действующего значения соответственно. На рис 1.18. приведена осциллограмма тока и напряжения при отключении тока в контуре 65 кА в операции О. Максимальное мгновенное значение тока дуги оказалось в фазе В и составило  $i_{d,max}=79,4$  кА.



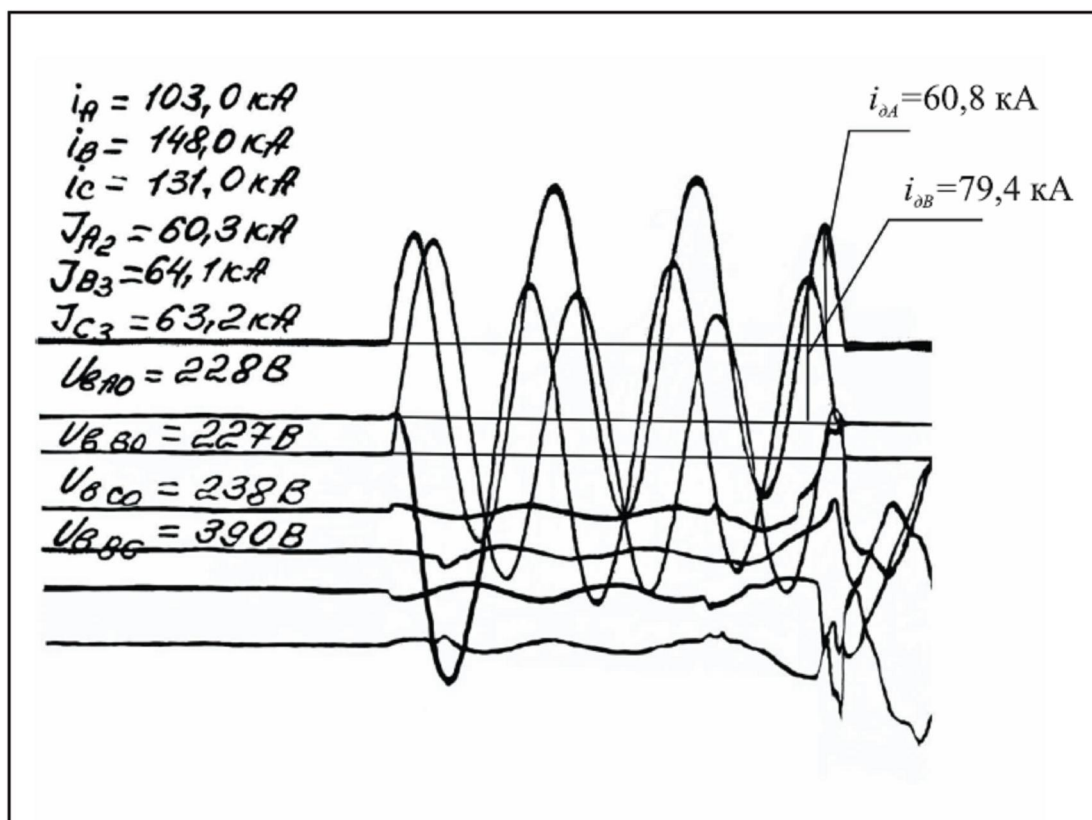
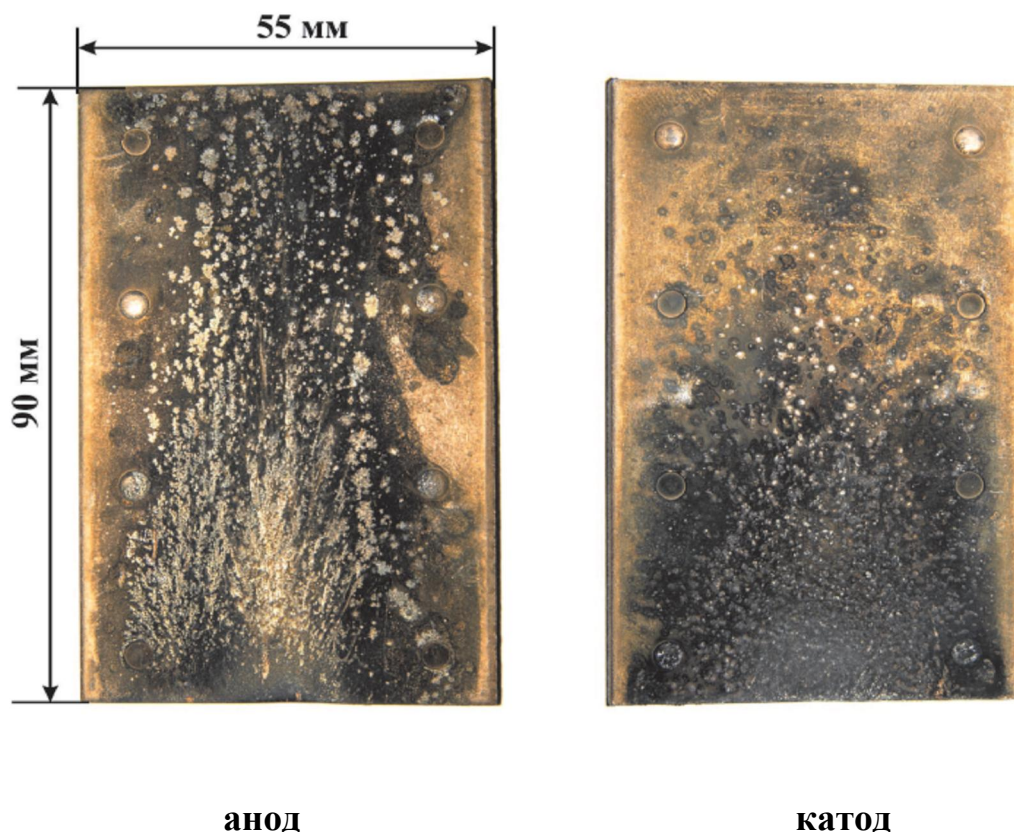


Рис. 1.18. Осциллограмма тока и напряжения дуги при отключении тока в контуре 65 кА выключателем в операции «О».

На рис. 1.19. показаны деионные пластины после отключения тока 65 кА в режиме О-ВО-ВО. Расстояние между деионными пластинами в решётке составляло 17 мм. Дуга полностью входила в решётку и приобретала диффузную форму с расщеплённым ядром. Дискретные эрозионные следы дуги равномерно распределены по всей площади пластин. Эрозия пластин оказалась поверхностной и незначительной, практически без потери её массы.

#### 1.4. Возбуждение дуги вдуванием в ... промежуток



**Рис. 1.19. Эрозионные следы дуги с расщеплённым ядром на катодной и анодной сторонах деионной пластины после отключения тока 65 кА в режиме О-ВО-ВО.**

Средняя плотность тока дуги, рассредоточенная равномерно по всей площади деионной пластины, которая равна  $S_{\text{д.пл}}=49,5 \text{ см}^2$ , составляет:

$$j_{\text{ср.д.пл}} = \frac{i_{\text{д.мах}}}{S_{\text{д.пл}}} = \frac{79400 \text{ А}}{4950 \text{ мм}^2} = 16 \text{ А / мм}^2.$$

Плотность мощности, приходящая на всю поверхность одной стороны деионной пластины, составляет:

- на катодную сторону:

$$q_{\text{к.д.пл}} = \frac{i_{\text{д.мах}} \cdot U_{\text{эф.к}}}{S_{\text{д.пл}}} = \frac{79400 \text{ А} \cdot 6,2 \text{ В}}{49,5 \text{ см}^2} = 9,95 \cdot 10^3 \text{ Вт / см}^2;$$

- на анодную сторону:

$$q_{\text{а.д.пл}} = \frac{i_{\text{д.мах}} \cdot U_{\text{эф.а}}}{S_{\text{д.пл}}} = \frac{79400 \text{ А} \cdot 13,8 \text{ В}}{49,5 \text{ см}^2} = 2,21 \cdot 10^4 \text{ Вт / см}^2.$$

Здесь  $U_{эф.а}=6,2 В$  – катодный и  $U_{эф.к}=13,8 В$  – анодный эффективные потенциалы на медных электродах по данным [1.11].

Плотность мощности, приходящая как на катод, так и на анод явно недостаточна для оплавления всей их поверхности. Поэтому в межэлектродном промежутке протяжённостью 17 мм образуется диффузная дуга с расщеплённым ядром.

По фотографиям, приведённым на рис. 1.19, определение размеров опорных пятен дискретных струек плазмы диффузной дуги с расщеплённым ядром вызывает большие трудности. Поэтому, для оценочных расчётов параметров дискретных струек плазмы обратимся к данным, приведённым в [1.1, ч. I, с. 258, таблица 3.4], которые были получены при отключении тока в контуре 50 кА действующего значения дугогасительной решёткой с омеднёнными деионными пластинами с расстоянием между ними 16 мм. То есть условия для отключения токов КЗ в обоих опытах практически были равными. Максимальный диаметр анодных опорных пятен дискретных струек плазмы составлял 0,15 см, а их площадь  $S_{он.д.см}=1,77 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ .

Количество относительно крупных опорных пятен дискретных струек плазмы на аноде за одно отключение тока КЗ по рис. 1.19 можно принять  $n_{д.см} \sim 115$ . Среднее значение тока дискретной струйки плазмы в данном опыте может быть равным:

$$i_{д.см} = \frac{i_{д.макс}}{n_{д.см}} = \frac{79400 \text{ А}}{115} = 690 \text{ А}.$$

Это значение тока равно максимальному среднему значению тока дискретных струек плазмы (683 А), приведённому в [1.1, ч. I, с.258].

Плотность мощности, приходящая на опорное пятно дискретной струйки плазмы на аноде, составляет:

$$q_{он.д.см} = \frac{i_{д.см.ср} \cdot U_{эф.а}}{S_{он.д.см}} = \frac{690 \text{ А} \cdot 13,8 \text{ В}}{1,77 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2} = 5,38 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2.$$

При плотности мощности  $\geq 10^5 \text{ Вт/см}^2$  весь металл на площади опорного пятна дискретной струйки плазмы будет находиться в расплавленном состоянии.

#### 1.4. Возбуждение дуги вдуванием в ... промежутке

Время прогрева поверхности опорного пятна дискретной струйки плазмы под воздействием плотности мощности  $5,38 \cdot 10^{12} \text{ эрг}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$  от температуры окружающей среды  $T_0=313 \text{ K}$  ( $40^\circ\text{C}$  – стандартная расчётная температура) до температуры плавления  $\text{Cu}$   $T_{\text{пл}}=1356 \text{ K}$  составляет [1.13, с. 54]:

$$\tau_{\text{он.пл}} = \frac{\pi \lambda c \rho (T_{\text{пл}} - T_0)^2}{4 q_{\text{он.д.см}}^2} = \frac{\pi \cdot 352 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{K}} \cdot 0,461 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{K}}}{4 (5,38 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2})^2} \times$$

$$\times 8,29 \text{ г}/\text{см}^3 \cdot (1356 \text{ K} - 313 \text{ K})^2 = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

Здесь  $\lambda = 352 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{K}}$  – теплопроводность  $\text{Cu}$  при температуре  $1200 \text{ K}$ ,  $c = 0,461 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{K}}$  – удельная теплоёмкость  $\text{Cu}$  при температуре  $1300 \text{ K}$ ,  $\rho = 8,29 \text{ г}/\text{см}^3$  – плотность  $\text{Cu}$  при температуре плавления  $T_{\text{пл}}=1356 \text{ K}$  [1.1, таблица 1.8, с. 69].

Время прогрева поверхности опорного пятна дискретной струйки плазмы от температуры плавления до температуры кипения  $\text{Cu}$   $T_{\text{кип}}=2840 \text{ K}$ :

$$\tau_{\text{он.кип}} = \frac{\pi \lambda c \rho (T_{\text{кип}} - T_{\text{пл}})^2}{4 q_{\text{он.д.см}}^2} = \frac{\pi \cdot 352 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{K}} \cdot 0,62 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{K}}}{4 (5,38 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2})^2} \times$$

$$\times 7,73 \text{ г}/\text{см}^3 \cdot (2840 \text{ K} - 1356 \text{ K})^2 = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ с},$$

где  $\rho = 7,73 \text{ г}/\text{см}^3$  – плотность  $\text{Cu}$  при температуре кипения  $T_{\text{кип}}$ ,  $c = 0,62 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{K}}$  – удельная теплоёмкость меди при температуре  $1800 \text{ K}$  [1.1, ч. I, с. 106].

Общее время достижения поверхностью опорного пятна дискретной струйки плазмы температуры кипения на  $\text{Cu}$  под воздействием плотности мощности  $q_{\text{он.д.см}} = 5,38 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{см}^2$  составляет:

$$\tau_{\text{кип}} = \tau_{\text{он.пл}} + \tau_{\text{он.кип}} = (0,4 + 1,0) \cdot 10^{-4} \text{ с} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

По экспериментальным данным исследования гашения дуги большой мощности в выключателях [1.1] время существования дискретных струек плазмы составляет от 0,2 до 2,8 мс. То есть на опорном пятне дискретной струйки плазмы образуется расплав, температура которого за время её существования может достигать температуры кипения металла электрода.

Для сравнения времени привязки опорных пятен дуги к деионным пластинам с покрытием  $Cu6$  и  $Ni6$  примем плотность мощности, приходящая на опорное пятно дискретной струйки плазмы диффузной дуги с расщеплённым ядром, равной  $5,38 \cdot 10^5 \text{ Вт} / \text{см}^2$ .

Время прогрева поверхности опорного пятна дискретной струйки плазмы плотностью мощности  $5,38 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}$  от температуры окружающей среды  $T_0=313\text{K}$  до температуры плавления  $Ni$   $T_{пл}=1728\text{K}$  составляет:

$$\tau_{он.пл} = \frac{\pi \lambda c \rho (T_{пл} - T_0)^2}{4q_{он.д.см}^2} = \frac{\pi \cdot 72 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}} \cdot 0,595 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}}}{4(5,38 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2})^2} \times$$

$$\times 7,764 \text{ г} / \text{см}^3 \cdot (1728\text{K} - 313\text{K})^2 = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

Здесь  $\lambda = 72 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}}$  – теплопроводность  $Ni$  при температуре 1000 К,

$c = 0,595 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}}$  – удельная теплоёмкость  $Ni$  при температуре 1100 К,

$\rho = 7,764 \text{ г} / \text{см}^3$  – плотность жидкого  $Ni$  при температуре 1773 К [1.1, таблица 1.8, с. 69].

Время прогрева поверхности опорного пятна дискретной струйки плазмы от температуры плавления до температуры кипения  $Ni$   $T_{кип}=3003\text{K}$ :

$$\tau_{он.кип} = \frac{\pi \lambda c \rho (T_{кип} - T_{пл})^2}{4q_{он.д.см}^2} = \frac{\pi \cdot 72 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}} \cdot 0,595 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}}}{4(5,38 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2})^2} \times$$

$$\times 7,714 \text{ г} / \text{см}^3 \cdot (3003\text{K} - 1728\text{K})^2 = 1,47 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

#### 1.4. Возбуждение дуги вдуванием в ... промежутки

Общее время достижения поверхностью опорного пятна дискретной струйки плазмы температуры кипения на покрытии из  $Ni$  под воздействием плотности мощности  $5,38 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$  составляет:

$$\tau_{\text{кин}} = \tau_{\text{он.пл}} + \tau_{\text{он.кин}} = (1,82 + 1,47) \cdot 10^{-5} \text{ с} = 3,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

Оценим время привязки опорных пятен дискретных струек плазмы к деионным пластинам, изготовленным из ст. 08, без покрытия под воздействием плотности мощности  $5,38 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ . В таком случае время прогрева поверхности опорного пятна дискретной струйки плазмы от температуры окружающей среды  $T_0=313 \text{ К}$  до температуры плавления ст.08  $T_{\text{пл}}=1808 \text{ К}$  составляет:

$$\tau_{\text{он.пл}} = \frac{\pi \lambda c \rho (T_{\text{пл}} - T_0)^2}{4q_{\text{он.д.ст}}^2} = \frac{\pi \cdot 29 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}} \cdot 0,666 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}}}{4(5,38 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2})^2} \times$$

$$\times 7,3 \text{ г/см}^3 \cdot (1808 \text{ К} - 313 \text{ К})^2 = 8,64 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Здесь  $\lambda = 29 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}}$  – теплопроводность ст. 08 при температуре  $1200 \text{ К}$ ,

$c = 0,666 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}}$  – удельная теплоёмкость ст. 08 при температуре  $1300 \text{ К}$ ,

$\rho \sim 7,3 \text{ г/см}^3$  – плотность Fe при температуре  $1808 \text{ К}$  [1.1. таблица 1.8, с. 69].

Время прогрева поверхности опорного пятна дискретной струйки плазмы от температуры плавления до температуры кипения ст. 08  $T_{\text{кин}}=3023 \text{ К}$ .

$$\tau_{\text{он.кин}} = \frac{\pi \lambda c \rho (T_{\text{кин}} - T_{\text{пл}})^2}{4q_{\text{он.д.ст}}^2} = \frac{\pi \cdot 29 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}} \cdot 0,666 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}}}{4(5,38 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2})^2} \times$$

$$\times 6,86 \text{ г/см}^3 \cdot (3023 \text{ К} - 1808 \text{ К})^2 = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ с},$$

где  $\rho = 6,86 \text{ г/см}^3$  – плотность Fe при температуре кипения  $T_{\text{кин}}$ .

Общее время достижения поверхностью опорного пятна дискретной струйки плазмы температуры кипения ст.08 под воздействием плотности мощности  $5,38 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$  составляет:

$$\tau_{кин} = \tau_{он.пл} + \tau_{он.кин} = (8,64 + 5,3) \cdot 10^{-6} \text{ с} = 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

Таким образом, время привязки опорных пятен дуги к электродам при одной и той же плотности мощности зависит от их материала:

$$\tau_{кин}^{Cu} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ с} > 3,29 \cdot 10^{-5} \text{ с} = \tau_{кин}^{Ni} > 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ с} = \tau_{кин}^{Fe}.$$

Однако следует особо обратить внимание на целесообразность покрытия деионных пластин защитными окисными плёнками (например, воронением). В случае воронения деионных пластин время привязки опорных пятен дуги при вхождении её в дугогасительную решётку будет минимальным. Многочисленные опорные пятна дискретных струек плазмы в случае диффузной дуги с расщеплённым ядром будут иметь минимальные поперечные размеры, равномерно покрывать всю поверхность деионных пластин без заметной их эрозии [1.1, ч. I, с. 233, рис. 3.37, с. 235], а также см. [1.1, ч. II, рис. 5.23 (цветная вкладка)].

Следует также заметить, что время привязки к электродам опорных пятен дуги зависит от силы её тока. При  $i_{д.мах}=79,4 \text{ кА}$  плотность мощности, приходящая на опорное пятно дискретной струйки плазмы в диффузной дуге с расщеплённым ядром, составила  $5,38 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ , и время привязки дуги к электроду из ст.08 составило  $1,39 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ . В [1.1.] показано, что при токе в испытательном контуре  $5,9 \text{ кА}$  плотность мощности, приходящая на опорное пятно дискретной струйки плазмы, составила  $4,16 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ . Время привязки дискретной струйки плазмы к электроду из ст. 08 при плотности мощности  $4,16 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$  составило  $2,32 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  [1.1, ч. II, с. 195].

Среднее значение плотности тока в опорном пятне дискретной струйки плазмы составляет:

$$j_{он.д.см} = \frac{i_{д.см.ср}}{S_{он.д.см}} = \frac{690 \text{ А}}{1,17 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2} = 3,9 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2.$$

Давление в прианодной зоне дискретной струйки плазмы:

$$P_{д.см.} = P_{атм} + 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot j_{он.д.см} \cdot i_{д.см.ср} = 1,0 \text{ атм} + 9,87 \cdot 10^{-9} \times \\ \times 3,9 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2 \cdot 690 \text{ А} = 1,27 \text{ атм}.$$

#### 1.4. Возбуждение дуги вдуванием в ... промежуток

Эффективную температуру плазмы дискретной струйки можно определить из формулы:

$$q_{изл} = 5,6 \cdot 10^3 \cdot \beta \cdot \left( \frac{T_{эф}}{100} \right)^4 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2},$$

[1.1, ч. II, с. 365], если принять, что вся энергия плазмы из канала струйки теряется путём излучения в окружающую среду. Такое допущение может быть приемлемо, если эффективная температура плазмы окажется достаточно высокой [1.1, ч. II, с. 115, рис 4.60 и с. 118, рис. 4.62].

$$T_{эф.д.ст} = 10^2 \left( \frac{q_{изл}}{5,6 \cdot 10^3 \cdot \beta} \right)^{1/4} = 10^2 \left( \frac{5,38 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}}{5,6 \cdot 10^3 \cdot 0,6} \right)^{1/4} = 2 \cdot 10^4 \text{ К}.$$

Здесь  $\beta=0,6$  – коэффициент черноты для плазмы дуги, горящей в парах металлов [1.12].

Действительно, эффективная температура дискретной струйки плазмы оказалась достаточно высокой, поэтому принятое допущение вполне уместно.

Концентрация одноатомных паров Cu при  $T_{эф} = 2,0 \cdot 10^4 \text{ К}$  и давлении  $\sim 1,0 \text{ атм}$  имеет значение [1.1, ч. I, с. 69, таблица 1.7]:

$$n_0 = n_{кин} \cdot \frac{T_{кин}}{T_{эф}} = 1,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \frac{2840 \text{ К}}{20000 \text{ К}} = 0,227 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

Степень ионизации паров Cu при  $T_{эф} = 2,0 \cdot 10^4 \text{ К}$  и давлении  $\sim 1,0 \text{ атм}$  можно принять равной  $x_e \sim 1,0$  [1.1, с. 327]. Концентрация электронов в такой плазме равна:

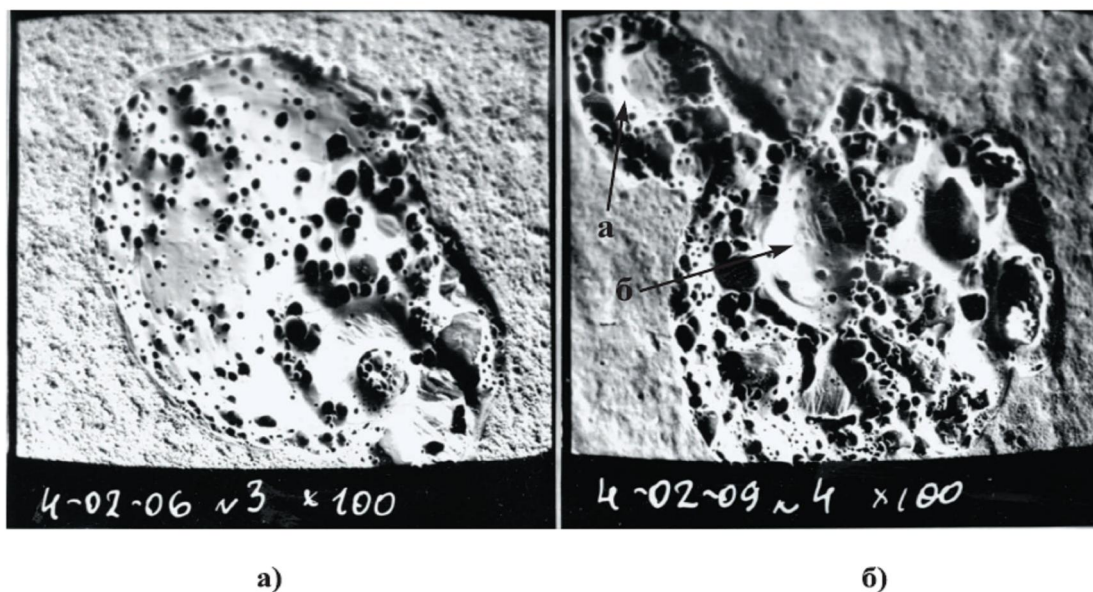
$$n_e = n_0 \cdot \frac{x_e}{1 + x_e} = 0,227 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \cdot 0,5 = 0,114 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

Направленная скорость электронов в дискретной струйке плазмы составляет:

$$v_e = 0,593 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{\Delta U_\delta} = 0,593 \cdot 10^8 \sqrt{79 \text{ В}} = 5,27 \cdot 10^8 \text{ см} / \text{с}.$$



На рис. 1.20 приведены микроэлектронные фотографии характерных следов дискретных струек плазмы на анодной стороне деионных стальных пластин с покрытием Си6.

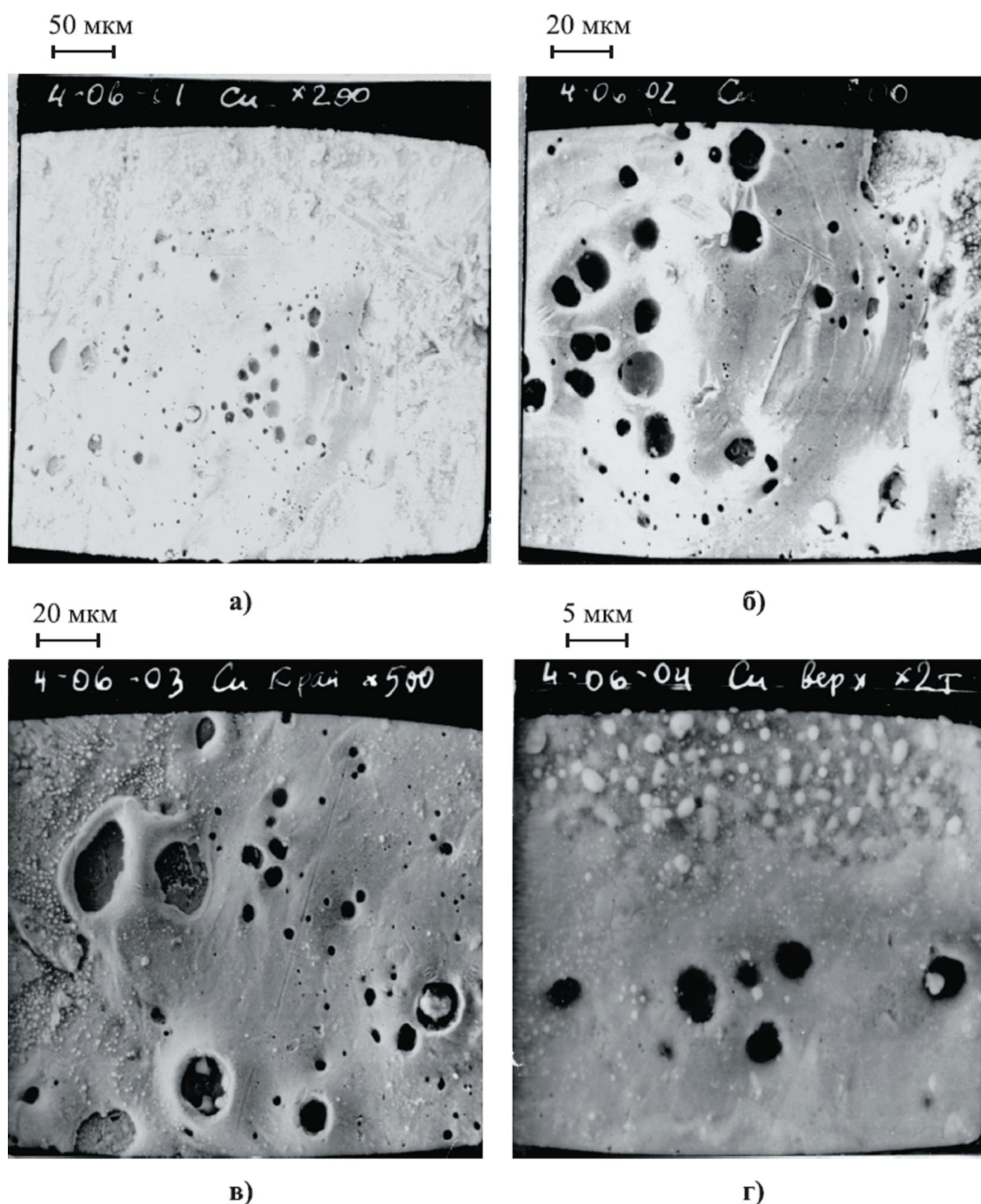


**Рис. 1.20.** Следы дискретных струек плазмы на анодной стороне деионных пластин из ст. 08, покрытых гальваническим путём Си6:

а)  $i_{d,max}=9,3 \text{ кА}$  ( $\times 100$ ); б)  $i_{d,max}=13,7 \text{ кА}$  ( $\times 100$ ).

На рис 1.21 приведены электронномикроскопические фотографии отдельных зон эрозионного поражения деионной пластины, показанной на рис. 1.19.

#### 1.4. Возбуждение дуги вдуванием в ... промежутке



**Рис 1.21. Вид отдельных зон эрозионного поражения деионных пластин на Рис. 1.19: а)  $\times 200$ ; б)  $\times 500$ ; в)  $\times 500$ ; г)  $\times 2000$ .  $i_{d,max} = 79,4$  кА.**

На рис. 1.20 и рис. 1.21 видны многочисленные кратеры, из которых истекали микроструи плазмы, создающие общий поток плазмы дискретных струек. Диаметры кратеров на медном аноде изменяются от долей до 15 мкм. Для оценочных расчётов параметров микроструек плазмы средний диаметр их кратеров на аноде примем равным  $d_{a,sp} = 7 \cdot 10^{-4}$  см. Среднее значение площади такого кратера составляет:

$$S_{a.cp} = \pi \cdot r_{a.cp}^2 = \pi \cdot (3,5 \cdot 10^{-4} \text{ см})^2 = 38,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2.$$

Поскольку общий поток плазмы дискретных струек образуют потоки плазмы микроструек, то за их эффективную температуру примем  $T_{эф} = 2,0 \cdot 10^4 \text{ К}$  и концентрацию электронов  $n_e = 0,114 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Если к плазме, в которой концентрация электронов составляет  $n_e = 0,114 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , приложено напряжение  $\Delta U_d \approx 79 \text{ В}$ , то средняя направленная скорость электронов будет иметь значение  $v_e = 5,27 \cdot 10^8 \text{ см/с}$  и средняя плотность тока:

$$j_k = 3,34 \cdot 10^{-10} \cdot e \cdot n_e \cdot v_e = 3,34 \cdot 10^{-10} \cdot 4,8 \cdot 10^{-10} \times \\ \times 0,114 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \cdot 5,27 \cdot 10^8 \text{ см/с} = 9,63 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2.$$

Сила тока микроструйки плазмы на аноде, в таком случае, будет равной:

$$i_a = j_k \cdot S_{a.cp} = 9,63 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2 \cdot 38,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 = 3,7 \text{ А}.$$

Оценим время возникновения тонкого слоя жидкого пятна на поверхности омеднённого электрода, имеющего исходную температуру  $T_0 = 313 \text{ К}$ . Плотность мощности, приходящая на анодное пятно площадью  $S_{a.cp} = 38,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$ , в рассматриваемом случае равна:

$$q_a = \frac{i_a \cdot U_{эф.a}^{Cu}}{S_{a.cp}} = \frac{3,7 \text{ А} \cdot 13,8 \text{ В}}{38,5 \text{ см}^2} = 1,33 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2.$$

Время достижения поверхностью медного анода площадью  $S_{a.cp} = 38,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$  температуры плавления, а затем и температуры кипения под воздействием плотности мощности  $q_a = 1,33 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$  соответственно равно:

#### 1.4. Возбуждение дуги вдуванием в ... промежутке

$$\tau_{a.nl} = \frac{\pi \lambda c \rho (T_{nl} - T_0)^2}{4q_a^2} = \frac{\pi \cdot 3,52 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}} \cdot 0,461 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}}}{4(1,33 \cdot 10^{15} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2})^2} \times$$

$$\times 8,29 \text{ г} / \text{см}^3 \cdot (1356 \text{ К} - 313 \text{ К})^2 = 6,49 \cdot 10^{-10} \text{ с}.$$

$$\tau_{a.kun} = \frac{\pi \lambda c \rho (T_{kun} - T_{nl})^2}{4q_a^2} = \frac{\pi \cdot 3,52 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}} \cdot 0,621 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}}}{4(1,33 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2})^2} \times$$

$$\times 7,79 \text{ г} / \text{см}^3 \cdot (2840 \text{ К} - 1356 \text{ К})^2 = 1,66 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

$$\tau_{kun} = \tau_{a.nl} + \tau_{a.kun} = (0,649 + 1,66) \cdot 10^{-9} \text{ с} = 2,31 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

То есть время образования расплава площадью  $S_{a.cp} = 38,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$  под воздействием плотности мощности  $q_a = 1,33 \cdot 10^8 \text{ Вт} / \text{см}^2$  составляет  $2,31 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ , и оно на несколько порядков меньше времени образования расплава на опорном пятне дискретной струйки плазмы площадью  $1,77 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$  под воздействием плотности мощности  $5,38 \cdot 10^5 \text{ Вт} / \text{см}^2$  ( $\tau_{kun}^{Cu} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ).

Согласно [1.4, с. 354] время формирования кратера, образующегося за счёт Джоулева разогрева металла токами, диффузии тепла путём теплопроводности, можно определить по формуле:

$$t_{кр} = \frac{r_{кр}^2}{4 \cdot a},$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности металла, который зависит от его температуры;  $r_{кр}$  – радиус кратера.

В рассматриваемом примере время формирования кратера на медном аноде, радиус которого  $r_{a.cp} = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ , составляет:

$$t_{кр.a} = \frac{r_{a.cp}^2}{4 \cdot a_{жс}} = \frac{(3,5 \cdot 10^{-4} \text{ см})^2}{4 \cdot 0,42 \text{ см}^2 / \text{с}} = 7,29 \cdot 10^{-8} \text{ с},$$

где  $a_{ж} = 0,42 \text{ см}^2 / \text{с}$  – коэффициент температуропроводности *Си* в жидком состоянии [1.4, с.123].

Обратим внимание на то, что время достижения расплавом *Си* температуры кипения несколько меньше времени формирования кратера:

$$t_{a.кин} = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ с} < 7,29 \cdot 10^{-8} \text{ с} = t_{кр.а}.$$

Это означает, что кратер образуется в результате возникновения микропузырька. Отсюда следует, что под воздействием теплового потока плазмы, натекающей на поверхность деионной пластины, вначале за время  $\sim 10^{-9}$  с на центре концентрации зарядов образуется пятно расплава, а затем на нём за время  $\sim 10^{-8}$  с возникает микропузырёк, который, взрываясь, извергает микроструйку ионизированных паров металла. На месте взорвавшегося микропузырька остаётся кратер.

Вокруг разрозненно возникших кратеров на аноде возникает расплав *Си*, который постепенно расширяется. Расплав вокруг близлежащих кратеров затем сливается. На поверхности расплава возникает пузырьковое кипение с взрывающимися микропузырьками. На расширившемся расплаве образуется опорное пятно дискретной струйки плазмы. Большое число одновременно функционирующих микроструек плазмы, хаотично расположенных на опорном пятне, приводит к образованию под воздействием собственного магнитного поля электромагнитного плазменного вихря дискретной струйки плазмы [1.1, ч. I, с. 246].

Очевидно, избыточное давление в микроструйке плазмы, истекающей из микропузырька, равно

$$P_k = 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot j_k \cdot i_k = 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot 9,63 \cdot 10^6 \frac{A}{\text{см}^2} \cdot 3,7 A = 0,35 \text{ атм.}$$

не может привести при взрыве микропузырька к значительному износу деионных пластин.

Приведённые результаты расчётов и экспериментальных исследований эрозионных следов на деионных пластинах дугогасительной решётки низковольтных выключателей при отключении токов КЗ дают основание сделать вывод, что при натекании плазмы на электрод фундаментальным пусковым механизмом возбуждения дугового разряда является единичный взорвавшийся микропузырёк на его поверхности. Время задержки возбуждения дискретной микроструйки плазмы на аноде из *Си* от момента времени начала натекания плаз-

#### 1.4. Возбуждение дуги вдуванием в ... промежуток

мы на центр концентрации зарядов до момента времени начала истечения ионизированных паров металла, проводящих ток, может составлять  $(10^{-9} \div 10^{-8})$  с.

В [1.14] обстоятельно показано, что эрозионные следы дуговых разрядов на катоде и аноде из разных материалов имеют разный вид, структуру и геометрические размеры. Например, на катоде диаметры микрократеров изменяются от 0,3 до 5,0 мкм. В [1.1, ч. I, с. 222] также показано различие форм, структур и размеров катодных и анодных следов на разных материалах электродов при отключении выключателями токов КЗ.

Для оценочных расчётов времени возбуждения микроструек плазмы, истекающих с катода, примем за средний диаметр их кратеров  $d_{к.ср} = 2 \cdot 10^{-4}$  см. Среднее значение площади кратеров равно:

$$S_{к.ср} = \pi \cdot r_{к.ср}^2 = \pi \cdot (1 \cdot 10^{-4} \text{ см})^2 = 3,14 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2.$$

Время формирования кратера на медном расплаве диаметром  $2 \cdot 10^{-4}$  см составляет:

$$t_{кр.к} = \frac{r_{кр}^2}{4 \cdot a_{жс}} = \frac{(1 \cdot 10^{-4} \text{ см})^2}{4 \cdot 0,42 \text{ см}^2 / \text{с}} = 6 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Очевидно, время формирования кратера на катоде, размер которого меньше, чем на аноде, должно быть короче времени формирования кратера на аноде. Действительно:

$$t_{кр.к} = 6 \cdot 10^{-9} \text{ с} < 7,29 \cdot 10^{-8} \text{ с} = t_{кр.а}.$$

То есть при втекании плазмы в межэлектродный промежуток микроструи плазмы, проводящие ток, на катоде и аноде возникают одновременно. Возбуждение первой микроструи плазмы не означает возбуждение самоподдерживающего дугового разряда. Самоподдерживающийся дуговой разряд может возникнуть только тогда, когда электроны с катода достигнут анода и будут подвергаться его бомбардировке, а ионы с анода – катода.

Для оценки времени возбуждения самоподдерживающегося дугового разряда необходимо учесть время пролёта электронами и ионами межэлектродного промежутка.

Среднее расстояние между деионными пластинами в рассматриваемом опы-

те равно  $l=2,5$  см. Электроны при средней их скорости направленного движения  $v_e = 5,27 \cdot 10^8$  см/с достигнут анода за время:

$$t_e = \frac{l}{v_e} = \frac{2,5 \text{ см}}{5,27 \cdot 10^8 \text{ см/с}} = 4,74 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Скорость направленного движения ионов под воздействием напряжения  $\Delta U = 79$  В, приложенного к межэлектродному промежутку, составляет [1.1, ч. II, с. 45]:

$$v_i = 0,134 \cdot 10^6 \sqrt{\Delta U} = 0,134 \cdot 10^6 \sqrt{79 \text{ В}} = 1,19 \cdot 10^6 \text{ см/с.}$$

Время пролёта ионов от анода до катода будет равно:

$$t_i = \frac{l}{v_i} = \frac{2,5 \text{ см}}{1,19 \cdot 10^6 \text{ см/с}} = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Следовательно, время от момента времени начала натекания потока плазмы на центры концентрации зарядов на катоде до момента времени начала бомбардировки электронами, истекающих с катода, анода составляет:

$$t_{e.k} = t_{кр.к} + t_e = 6 \cdot 10^{-9} \text{ с} + 4,74 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 1,07 \cdot 10^{-8} \text{ с.}$$

Время от момента начала натекания потока плазмы на центры концентрации зарядов на аноде до момента начала бомбардировки катода ионами, истекающими с анода, равно:

$$t_{i.a} = t_{кр.a} + t_i = 7,29 \cdot 10^{-8} \text{ с} + 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ с} \approx 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Поскольку  $t_{i.a} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ с} \gg t_{e.k} = 1,44 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ , то время  $t_{в.д}$  инициирования самоподдерживающегося дугового разряда от момента начала втекания потока плазмы в промежуток между омеднёнными деионными платинами дугогасительной решётки при отключении выключателем тока в контуре 65 кА действующего значения составляет:

$$t_{в.д} = t_{i.a} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

После самовозбуждения дуговой разряд будет самостоятельно функционировать в результате протекания физических процессов на катоде и аноде, обеспечивающих самоподдержание его горения [1.4.].

### 1.5 Формирование дугового разряда

В момент времени обрыва мостика, разрушенного либо спокойным испарением, либо электрическим взрывом, между контактами возникает дуговой разряд. При отключении токов КЗ плотность мощности, приходящая на поверхность опорных пятен как на катоде, так и на аноде на начальном этапе существования дуги составляет единицы  $10^5 \text{ Вт/см}^2$ . Как было показано ранее плотность мощности равная  $10^5 \text{ Вт/см}^2$  способна только расплавить поверхность металла. По мере движения контактов и расширения опорных пятен дуги плотность мощности на опорные пятна снижается до значения единиц  $10^4 \text{ Вт/см}^2$ . Плотность мощности равная  $10^4 \text{ Вт/см}^2$  не способна расплавить металл на всей площади опорного пятна. В [1.1, ч. II] показано, что из-за сложности рельефа на опорных пятнах распределение зарядов на их поверхности очень неравномерно. На тех местах, на которых образуются центры концентрации электрических зарядов, плотность мощности может достичь значения  $\geq 10^8 \text{ Вт/см}^2$ . Плотность мощности, равная  $10^8 \text{ Вт/см}^2$  и более, приводит к электрическим взрывам микронеровностей на поверхности опорных пятен, в результате которых образуются кратеры и из них извергаются микроструйки плазмы. Кратеры и микроструйки плазмы дискретны на поверхности опорных пятен и во времени. Именно первая такая микроструйка плазмы приводит к возбуждению дугового разряда между контактами.

В результате интенсивного поступления паров металлов контактов, дробления капель, возникших при разрушении жидкометаллических мостиков, и образования микрокапель при взрыве микронеровностей на опорных пятнах на начальном этапе возбуждения дуги возникает неидеальная плазма в её канале. Время сосуществования неидеальной плазмы при отключении токов КЗ по экспериментальным данным составляет от 1,0 до 2,0 мс.

В [1.1, ч. II, с. 61] показано, что при условии  $\frac{l_d}{r_{on}} \leq 1,0$  ( $l_d$  – протяжённость дуги, которая может быть равна раствору контактов  $\delta$ ,  $r_{on}$  – радиус опорного пятна дуги) плазма в канале дуги насыщена парами металла контактов и каплями. При значении  $\frac{l_d}{r_{on}} \sim 0,6 \div 0,8$  плазма в канале дуги начинает насыщаться газом окружающей среды. При  $\frac{l_d}{r_{on}} > 1,0$  плазму в канале дуги можно



принимать за идеальный газ. Причём, чем выше будет температура плазмы, тем в большей степени её можно принимать за идеальную.

Структуры опорных пятен и канала дуги, которые взаимно связаны, по мере расхождения контактов меняются. При  $\frac{l_d}{r_{on}} \ll 1,0$  дуговой разряд может представлять собой контрагированную дугу со сплошным ядром [1.1, ч. II, рис.5.17 (цветная вкладка)]. При значении  $\frac{l_d}{r_{on}} < 1,0$  дуговой разряд приобретает вид короткой контрагированной дуги с дискретным ядром [1.1, ч. II, рис 5.18 (цветная вкладка)]. В таком случае опорное пятно дуги на размыкаемых контактах имеет сплошное оплавление, которое наблюдается на разрывных контактах.

При  $\frac{l_d}{r_{on}} < 1,0$ , как экспериментально установлено [1.1, ч. II, с. 61], дуга устойчиво стоит между контактами. При скорости размыкания контактов  $2,0$  м/с среднестатистическое время неподвижности дуги составляет  $5,45$  мс. Подвижность дуга приобретает при  $\frac{l_d}{r_{on}} \geq 1,0$ . Плазма дуги насыщается газом окружающей среды и инерционность её массы резко падает.

Таким образом, размыкание контактов при отключении относительно большой силы тока сопровождаются следующими последовательно протекающими физическими процессами:

- возникновение и разрушение жидкометаллического мостика;
- формирование короткой контрагированной дуги со сплошным ядром с отношением  $\frac{l_d}{r_{on}} \ll 1,0$ , канал которой насыщен неидеальной плазмой и микрокаплями, обладающая относительно высокой инерционностью и удерживающая дугу в неподвижном положении;

- формирование короткой контрагированной дуги с дискретным ядром с отношением  $\frac{l_d}{r_{on}} < 1,0$ , плазма в канале которой начинает насыщаться газом окружающей среды;
- формирование контрагированной дуги с дискретным ядром с отношением  $\frac{l_d}{r_{on}} \geq 1,0$ , плазму которой насыщенную газом окружающей среды можно отнести к идеальной. Дуга приобретает подвижность и выходит из межконтактного зазора.

### Выводы к главе 1

Приведённые результаты экспериментальных и теоретических исследований возбуждения дугового разряда на размыкаемых серебросодержащих контактах и вдуванием плазмы в разрядный промежуток между деионными пластинами дугогасительной решётки при отключении токов КЗ низковольтными выключателями и в опубликованных работах авторов [1.2, 1.3, 1.4, 1.8 и 1.14] дают возможность сделать следующие выводы:

1.1. Жидкометаллический мостик, возникающий при размыкании контактов, может разрушиться либо спокойным испарением, либо электрическим (тепловым) взрывом, либо импульсным магнитным (механическим) взрывом.

1.2. Форма разрушения жидкометаллического мостика зависит от силы тока (плотности мощности), материала контактов, удельной энергии, вводимой в его массу, плотности тока, давления и скорости нарастания тока в его канале, а также напряжённости магнитного поля, воздействующего на его тело.

1.3. Электрический взрыв жидкометаллического мостика вызывает ввод удельной энергии в массу его тела, превышающей энергию сублимации материала контактов в  $2 \div 3$  раза, плотность тока ( $10^8 \div 10^9$ )  $A/cm^2$ , давление ( $10^8 \div 10^9$ )  $Pa$  и скорость нарастания тока  $\sim 10^8$   $A/c$  в его канале и плотность мощности  $\geq 10^8$   $Вт/cm^2$ , приходящей на его опорное пятно.

1.4. Электрический взрыв металлического мостика при размыкании серебрясодержащих контактов при отключении низковольтными выключателями тока КЗ может произойти при мгновенном значении тока не менее 50 кА.

1.5. Взрывное разрушение жидкометаллического мостика импульсным магнитным полем вызывается при условии:

$$i_m \cdot B \geq 6,5 \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{Гс}.$$

1.6. На начальном этапе формирования дугового разряда на размыкаемых контактах плотность мощности приходящей на его опорные пятна составляет единицы  $10^5 \text{ Вт/см}^2$ , которая способна расплавить металл на всей их площади. По мере расхождения контактов и расширения опорных пятен дуги плотность мощности, приходящей на них, снижается до единиц  $10^4 \text{ Вт/см}^2$ , которая не может обеспечить плавление металла на всей площади опорных пятен.

1.7. На микронеровностях, которые образованы на поверхности контактов, имеющие сложный рельеф, возникают центры концентрации зарядов, на которых плотность мощности достигает значения  $\geq 10^8 \text{ Вт/см}^2$ , приводящая к образованию микропузырьков и их взрыву.

1.8. Взрывы микропузырьков приводят к образованию кратеров и истечению микроструек плазмы, которые дискретны как на поверхности опорного пятна, так и во времени.

1.9. Возбуждение дугового разряда на размыкаемых контактах при отключении токов КЗ сопровождаются ряд последовательно протекающих физических процессов:

- возникновение жидкометаллического мостика и его разрушение;
- формирование короткой контрагированной дуги со сплошным ядром, канал которой насыщен неидеальной плазмой и микрокаплями;
- формирование короткой контрагированной дуги с дискретным ядром, канал которой составляет идеальная плазма.

1.10. При натекании плазмы диффузной дуги на поверхность деионных пластин дугогасительной решётки вначале под воздействием её теплового потока на центрах концентрации зарядов образуются пятна расплавов за время  $\sim 10^{-9} \text{ с}$ , а затем на них за время  $(10^{-9} \div 10^{-8}) \text{ с}$  возникают микропузырьки, которые взрываясь извергают микроструи плазмы.

1.11. На поверхности расплава, на которой возникает пузырьковое кипение с взрывающимися микропузырьками и истечение микроструек плазмы, образуется опорное пятно дискретной струйки плазмы дугового разряда с расщеплённым ядром.

1.12. Пусковым механизмом возбуждения дугового разряда при натекании плазмы на электрод являются единичные взорвавшиеся микропузырьки на его поверхности.

1.13. Время возбуждения микроструек плазмы на катоде и аноде имеют разное значение. Значения силы токов и плотности мощности, приходящих на центры концентрации зарядов, находящихся на катоде имеют меньшее значение, чем на аноде. Размеры кратеров на катоде изменяются от 0,3 до 5,0 мкм, а на аноде они достигают 15 мкм. Поэтому, время формирования кратеров на катоде может составить  $6,0 \cdot 10^{-9}$  с, а на аноде  $7,29 \cdot 10^{-8}$  с.

1.14. Время привязки опорных пятен диффузной дуги с расщеплённым ядром к аноду при одном и том же токе и плотности мощности, приходящей на опорное пятно дискретных струек плазмы, зависит от вида материала электродов. Например, при силе тока дискретной струйки плазмы 690 А и плотности мощности, приходящей на её опорное пятно,  $5,38 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> время их привязки составляет:

$$t_{Cu} = 2,75 \cdot 10^{-4} \text{ с} > t_{Ni} = 6,69 \cdot 10^{-5} \text{ с} > t_{Fe} = 2,71 \cdot 10^{-5} \text{ с}.$$

1.15. Время привязки опорных пятен дискретных струек плазмы также зависит от значения силы тока дуги  $i_{d,max}$ . Например, при  $i_{d,max} = 79,4$  кА время привязки составляет  $2,71 \cdot 10^{-5}$  с, при  $i_{d,max} = 5,9$  кА –  $2,32 \cdot 10^{-3}$  с.

### Список литературы к главе 1

1.1 Мещеряков, В. П. Электрическая дуга большой мощности в выключателях / В. П. Мещеряков. – Ульяновск; часть I, 2006; часть II, 2008.

1.2 Буткевич, Г. В. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов / Г. В. Буткевич, Г. С. Белкин, Н. А. Ведешенков, М. А. Жаворонков. – М.: Энергия, 1978.

1.3 Раховский, В. И. Разрывные контакты электрических аппаратов / В. И. Раховский, Г. В. Левченко, О. К. Теодорович. – М.; Л.: Энергия, 1966.

## Глава 1. Возбуждение дугового разряда при отключении токов

1.4 *Месяц, Г. А.* Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга / Г. А. Месяц. – М.: Наука, 2000.

1.5 *Melchert, F.* Uber das Verhalten Kontakten bei lichtbogen freime Schalten sehr hoher Strome / F. Melchert, Diss. – TH. Braunschweig, 1957.

1.6 *Гегузин, Я. Е.* Капля / Я. Е. Гегузин. – М.: Наука, 1987.

1.7 *Герасимов, Я. И.* Химическая термодинамика в цветной металлургии. Справочное руководство в 8 т. Т.2. Термодинамика меди, свинца, олова, серебра и их важнейших соединений / Я. И. Герасимов, А. Н. Крестовников, А. С. Шахов. – М.: Металлургиздат, 1961. Т.4. Термодинамика алюминия, сурьмы, магния, никеля, висмута, кадмия и их важнейших соединений. – М.: Металлургиздат, 1965.

1.8 *Брон, О. Б.* Электрическая дуга в аппаратах управления / О. Б. Брон. – М.; Л.: ГЭИ, 1954.

1.9 Патент на полезную модель №95895. 24.02.2010. Контактная система с магнитным дутьём. Патентообладатель ОАО «Контактор». Авторы: *Мещеряков В. П., Топчий А. С., Синдюков О. П.*

1.10 *Брон, О. Б.* Потоки плазмы в электрической дуге включающих аппаратов / О. Б. Брон, Л. К. Сушков. – Л.: Энергия, 1975.

1.11 *Daalder, J. E.* Energy dissipation in the cathode of a vacuum arc / J. E. Daalder. – J. Phys. D: Appl. Phys. – Vol. 10. 1977.

1.12 *Лесков, Г. И.* Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970.

1.13 *Полежаев, Ю. В.* Тепловая защита / Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич. – М.: Энергия, 1976.

1.14 *Мицкевич М. К.* Электроэрозионная обработка металлов / М. К. Мицкевич, А. И. Бушик, И. А. Бакуто, В. А. Шилов, И. Г. Девойно. – Минск: Наука и техника, 1988.

## Глава 2

### Форма и структура дугового разряда большой мощности и его опорных пятен

Форма и структура дугового разряда непосредственно связана с формой и структурой его следов на опорных пятнах. Экспериментально, с помощью скоростной киносъёмки, наблюдали открытую дугу относительно небольшой мощности, ток которой обычно не превышал 1000 А. В таких случаях дуга представляет собой столб или шнур [2.1].

На рис. 2.1 показаны две фотографии дуги, ток которой составлял 200 и 500 А [2.2, с. 145]. При этих значениях силы тока дуга действительно имеет форму шнура или столба. Поэтому в технической литературе электрическую дугу традиционно схематично показывают в виде столба. Исходя из такого представления формы дуги строились и теоретические её модели. Наибольший интерес у специалистов вызывала упрощённая каналовая модель дуги [2.3]. В такой модели дуги подразумевается, что её канал имеет сплошное ядро, а её опорное пятно – сплошное оплавление.

Однако, с помощью скоростной киносъёмки дуги между угольными электродами, расстояние между которыми составляло 40 мм, было выявлено при токе 1400 А расщеплённое ядро [2.2. с. 39] (см. рис. 2.2).

Образование расщеплённого ядра объяснялось дроблением катодного опорного пятна дуги. «Волокна», образующие канал дуги с расщеплённым ядром, ведут себя динамично: перемещаются, исчезают и возникают вновь. Спектральный анализ показал, что «волокна» состоят из паров материала катода.

Многочисленные испытания низковольтных автоматических выключателей на электрическую износостойкость при номинальном токе, превышающем 2000 А, и наибольшую отключающую способность при отключении токов КЗ показали два основных вида электрической эрозии деионных пластин дугогасительных решёток. В дугогасительных решётках, в которых расстояния между деионными пластинами составляют от 2,0 до 5,0 мм, имеет место сплошное оплавление поверхности опорных пятен дуги. Дугогасительные решётки таких конструкций подвергаются значительному электрическому износу и имеют ограниченный эксплуатационный срок службы.

## 2.1. Форма дугового разряда на размыкаемых контактах...

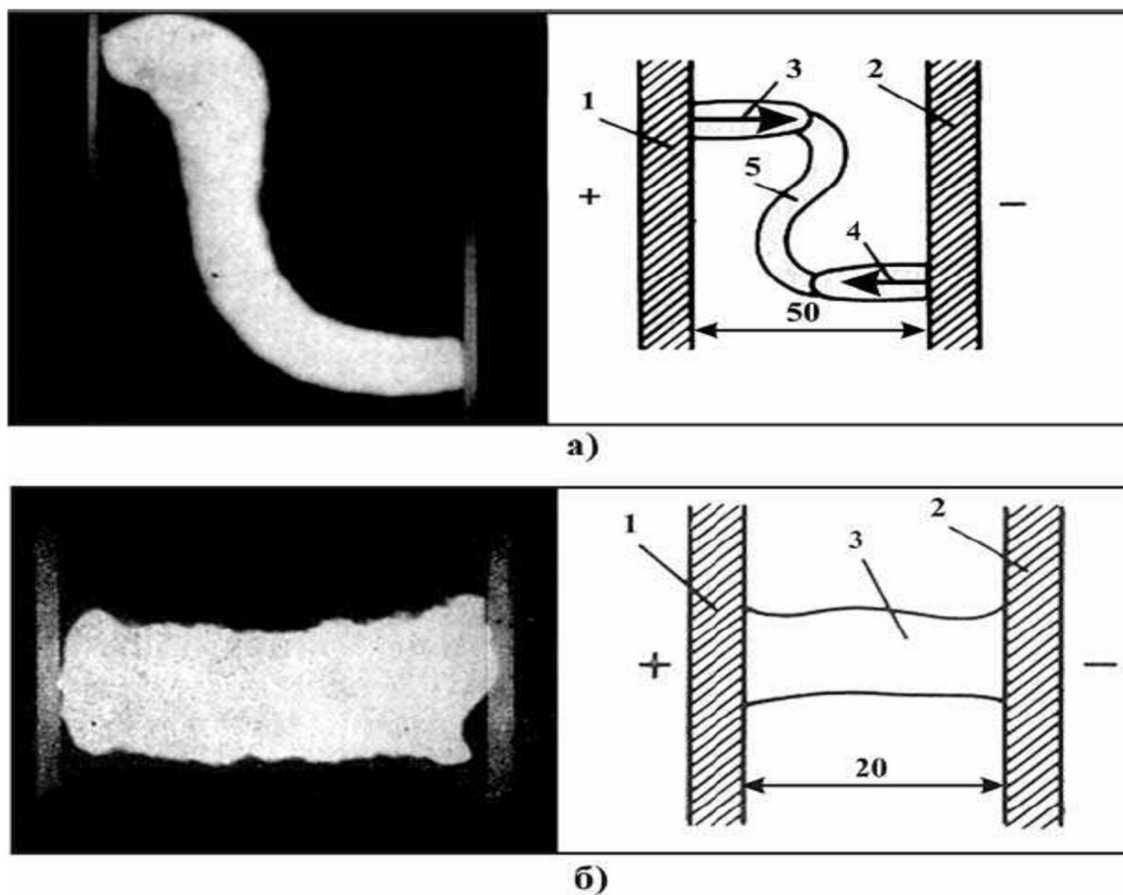


Рис. 2.1 [2.2]. Форма дуги между параллельными электродами: а)  $I=200\text{ A}$ ; б)  $I=500\text{ A}$ .

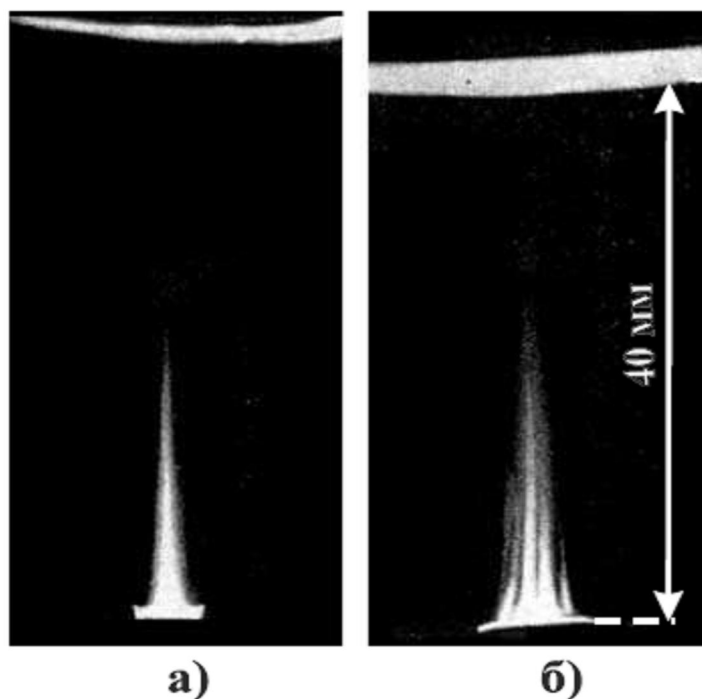


Рис. 2.2 [2.2]. Дуга между угольными электродами: а) сплошное ядро,  $I=490\text{ A}$ ; б) расщеплённое ядро,  $I=1400\text{ A}$ .

В дугогасительных решётках с расстоянием между деионными пластинами, превышающим 8,0 мм, эрозионные следы дугового разряда дискретны. Дугогасительные решётки таких конструкций подвергаются точечному незначительному поражению и имеют неограниченный срок службы.

Поскольку степень эрозионного поражения размыкаемых контактов и фиксированных электродов (деионных пластин) зависит от форм и структур дуговых разрядов и их опорных пятен, то целесообразно изучить причины их возникновения и трансформации. Форма и структура дуги отключения зависит от многих факторов, но определяющим является распределение электрического поля между электродами, на которых горит дуга, и электрических зарядов на её опорных пятнах. Форма и характеристики электрического поля на размыкаемых контактах и фиксированных электродах могут быть различными.

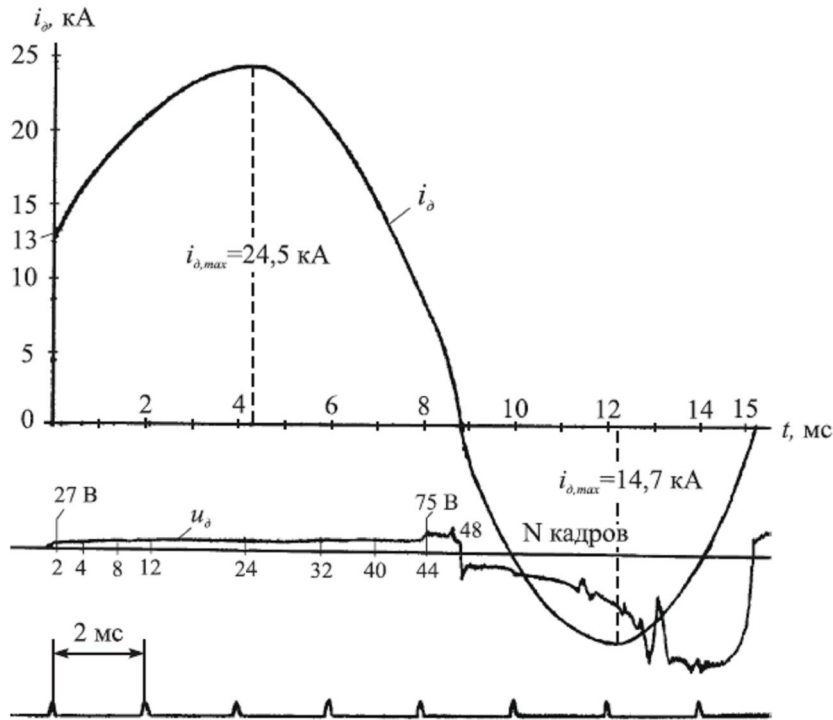
### 2.1 Форма дугового разряда на размыкаемых контактах при отключении токов КЗ

Форма и структура дугового разряда на размыкаемых контактах зависят от многих факторов: формы и структуры электрического поля в его канале, структуры распределения зарядов на опорных пятнах, силы тока, плотности мощности на опорных пятнах, соотношения площади боковой поверхности канала к сумме площадей опорных пятен ( $S_{бок} / (S_{он.к} + S_{он.а}) = l_{\delta} / r_{он}$ ), скорости размыкания контактов, электро- и теплофизических характеристик материала контактов и продолжительности нахождения дуги на контактах. Форма и структура дуги на размыкаемых контактах при отключении тока КЗ имеет ряд своих особенностей.

По мере расхождения контактов геометрические размеры и электрофизические характеристики дуги изменяются. Для анализа изменения формы дуги и физических процессов, протекающих на размыкаемых контактах при отключении тока КЗ, рассмотрим конкретный пример. На рис. 2.3 приведена осциллограмма тока  $i_{\delta}$  и напряжения  $u_{\delta}$  дуги при отключении тока в испытательном контуре 16 кА действующего значения, фазном напряжении 420 В и  $\cos\varphi=0,2$ . Контакты разомкнулись в момент времени, когда мгновенное значение тока было равно 13,0 кА.



## 2.1. Форма дугового разряда на размыкаемых контактах...



**Рис 2.3** Осциллограммы тока и напряжения дуги при отключении тока в контуре  $I=16,0$  кА при фазном напряжении  $U_{\phi}=420$  В и  $\cos\varphi=0,2$ .

От момента времени размыкания контактов ток нарастал до своего максимального мгновенного значения  $i_{\delta, \max}=24,5$  кА и затем стал спадать. Напряжение на контактах в момент времени их размыкания скачком достигло значения  $u_{\delta}=27,0$  В, достаточного для возбуждения дуги.

На рис. 2.4 приведены отдельные наиболее характерные кадры кинограммы возникновения и развития дуги на размыкаемых контактах. Дуга на контактах графически изображена на рис. 2.4 в масштабе фотографий. Стрелками указаны возможные траектории движения частиц в канале дуги и в потоках плазмы.

С целью определения геометрических размеров канала проводимости тока дуги и её опорных пятен с помощью фотометрического метода эквиденсит было выявлено ядро дуги, находящейся на размыкаемых контактах. На рис. 2.5 показан оригинал фотографии неподвижной дуги на контактах, ток которой был равен  $i_{\delta, \max}=24,5$  кА (кадр №24 на рис. 2.4), и семейство эквиденсит третьей ступени. На рис. 2.5, б чётко видно ядро дуги. Обратим внимание на то, что ярко светящаяся область дуги на фотографии оригинала, примыкающая непосредственно к контакту, и границы опорных пятен ядра дуги, полученных с помощью эквиденсит, хорошо совпадают. Поэтому граница опорных пятен дуги на контактах определялась по области яркого свечения дуги, прилегающей не-

## Глава 2. Форма и структура дугового разряда

---

посредственно к поверхности контактов, видимой на фотографии скоростной киносъёмки.

В таблице 2.1 приведены различные геометрические и электрофизические характеристики дуги, в том числе и мгновенное значение мощности, на размыкаемых контактах по результатам обработки осциллограммы (рис. 2.3) и кинограммы (рис. 2.4).

Средняя плотность тока  $j_{on}$  в опорном пятне и средняя удельная электропроводность  $\sigma$  плазмы в канале дуги определялись по формулам:

$$j_{on} = \frac{i_{\delta}}{S_{on}}, \quad \sigma = \frac{i_{\delta} \cdot \delta}{u_{\delta} \cdot S_{on}},$$

где  $i_{\delta}$  и  $u_{\delta}$  – средние значения тока и напряжения дуги за интервал времени  $\Delta t = 0,167$  мс, равный экспозиции одного кадра скоростной киносъёмки;  $S_{on}$  – площадь опорного пятна, форма которого принята круглой,  $\delta$  – раствор контактов. За проводящий ток канала дуги принимался цилиндр, построенный на опорных пятнах, длина которого равна раствору контактов  $\delta$ .

На фотографиях, приведённых на рис. 2.4 и рис. 2.5, видно, что дуговой разряд на серебрясодержащих контактах, скорость размыкания которых составляла 2,0 м/с, имеет форму короткой контрагированной дуги с характерным отношением  $l_{\delta}/r_{on} < 1,0$ . Дуга на размыкаемых контактах остаётся неподвижной [2.4, ч. I, с. 205]. Рассмотрим электрические характеристики короткой контрагированной дуги на размыкаемых серебрясодержащих контактах.

По данным таблицы 2.1 построена вольтамперная характеристика (ВАХ) дуги на размыкаемых контактах, которая приведена на рис. 2.6. По графику видно, что ВАХ неподвижной дуги на размыкаемых контактах имеет полого возрастающий вид.

## 2.1. Форма дугового разряда на размыкаемых контактах...

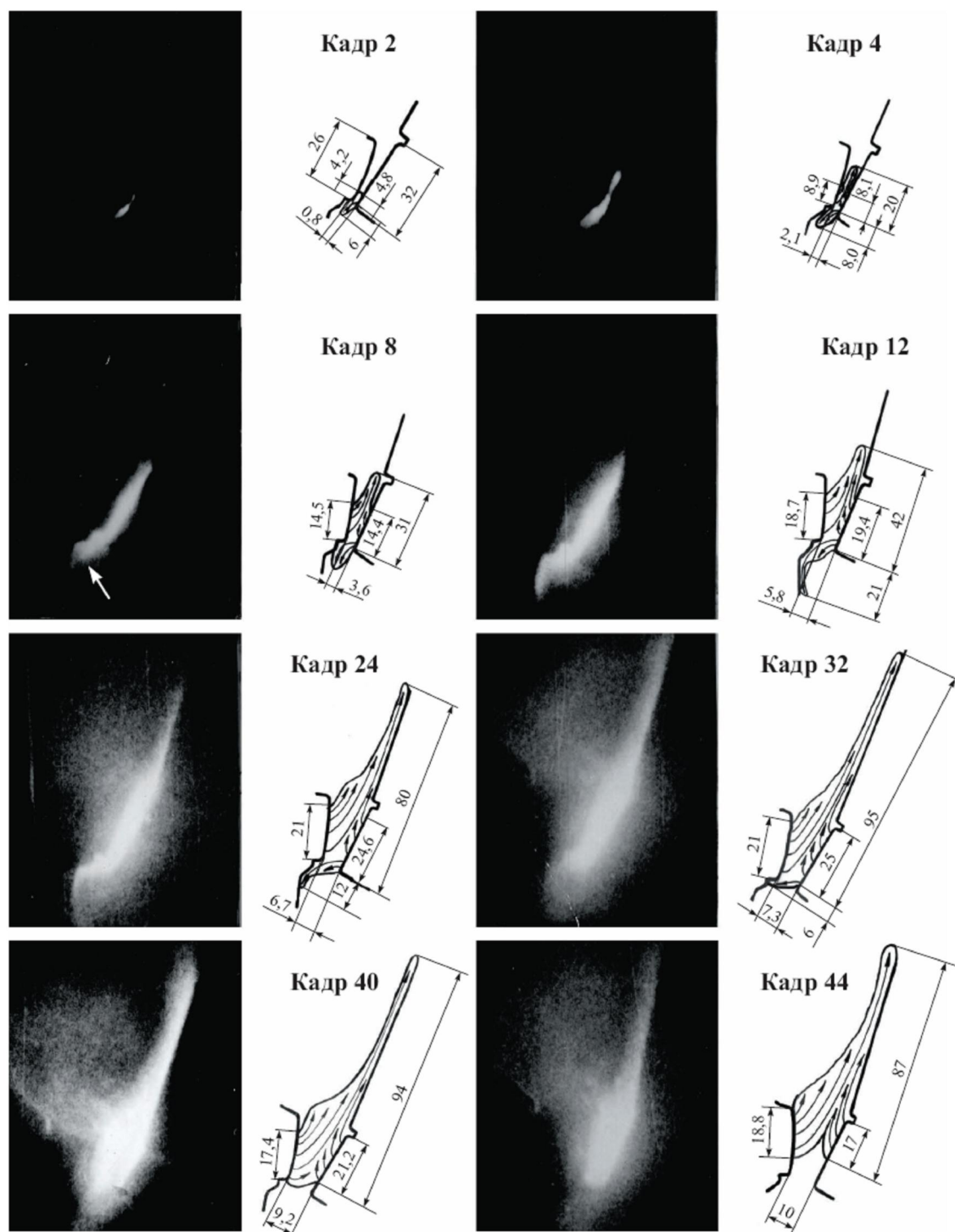


Рис. 2.4. Дуга на размыкаемых контактах при отключении тока в контуре 16,0 кА,  $U_{\phi}=420$  В,  $\cos\varphi=0,2$ : 2 -  $t=0,334$  мс,  $i_{\partial}=13,0$  кА,  $u_{\partial}=27$  В; 4 -  $t=0,668$  мс,  $i_{\partial}=15,0$  кА,  $u_{\partial}=34$  В; 8 -  $t=1,34$  мс,  $i_{\partial}=18,2$  кА,  $u_{\partial}=36$  В; 12 -  $t=2,0$  мс,  $i_{\partial}=21,5$  кА,  $u_{\partial}=44$  В; 24 -  $t=4,0$  мс,  $i_{\partial.max}=24,5$  кА,  $u_{\partial}=44$  В; 32 -  $t=5,34$  мс,  $i_{\partial}=21,9$  кА,  $u_{\partial}=44$  В; 40 -  $t=6,68$  мс,  $i_{\partial}=14,6$  кА,  $u_{\partial}=48$  В; 44 -  $t=7,35$  мс,  $i_{\partial}=9,0$  кА,  $u_{\partial}=75$  В.

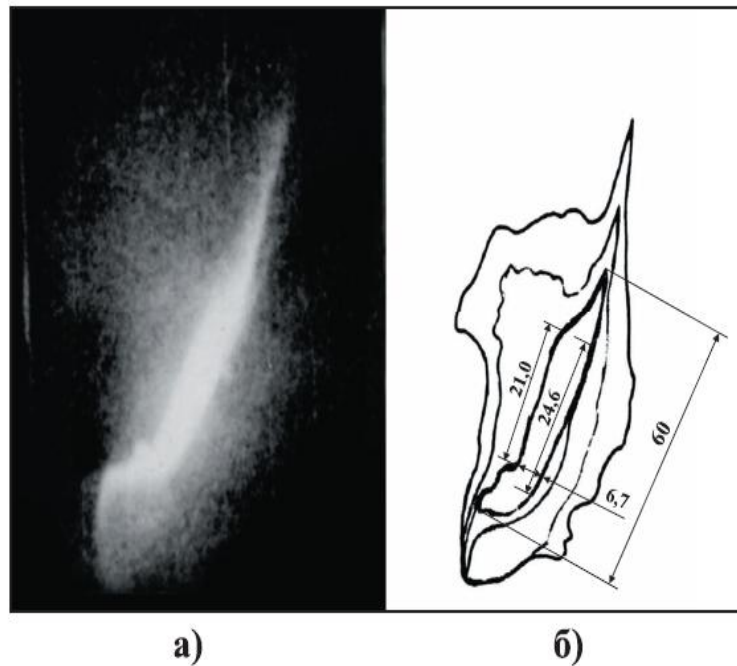


Рис. 2.5. Дуга на размыкаемых контактах. Мгновенное значение тока 24,5 кА. а) оригинал; б) семейство эквиденсит третьей ступени. Четко видно ядро дуги.

Таблица 2.1. Характеристики дуги на размыкаемых контактах при отключении тока в контуре  $I=16,0$  кА при фазном напряжении  $U_{\phi}=420$  В и  $\cos\varphi=0,2$ .

№ кадра	$t_{\partial}$ мс	$i_{\partial}$ кА	$u_{\partial}$ В	$P$ кВт	$\delta$ см	$v_k$ м/с	$d_{оп.к}$ см	$S_{оп.к}$ см <sup>2</sup>	$j_{оп.к}, 10^3$ А/см <sup>2</sup>	$\sigma,$ (Ом·см) <sup>-1</sup>	$d_{оп.а}$ см	$S_{оп.а}$ см <sup>2</sup>	$j_{оп.а}, 10^3$ А/см <sup>2</sup>
2	0,334	13,0	27	351	0,08	2,4	0,48	0,18	71,9	214	0,42	0,14	94,2
4	0,668	15,0	34	510	0,21	3,1	0,81	0,51	29,4	152	0,89	0,62	24,2
8	1,34	18,2	36	655,2	0,36	2,7	1,44	1,63	11,2	112	1,45	1,65	11,0
12	2,00	21,5	44	946	0,58	2,9	1,94	2,95	7,3	96	1,87	2,74	7,8
16	2,67	23,2	44	1020,8	0,63	2,4	2,27	4,05	5,73	82	1,96	3,02	7,7
24	4,00	24,5	44	1078	0,67	1,67	2,46	4,75	5,16	78,5	2,10	3,46	7,1
32	5,34	21,9	44	963,6	0,73	1,37	2,50	4,9	4,47	74,2	2,10	3,46	6,3
40	6,68	14,6	48	700,8	0,92	1,37	2,12	3,53	4,14	72,3	1,74	2,38	6,1
44	7,35	9,0	75	675	1,00	1,36	1,70	2,27	3,96	52,9	1,88	2,75	3,3

## 2.1. Форма дугового разряда на размыкаемых контактах...

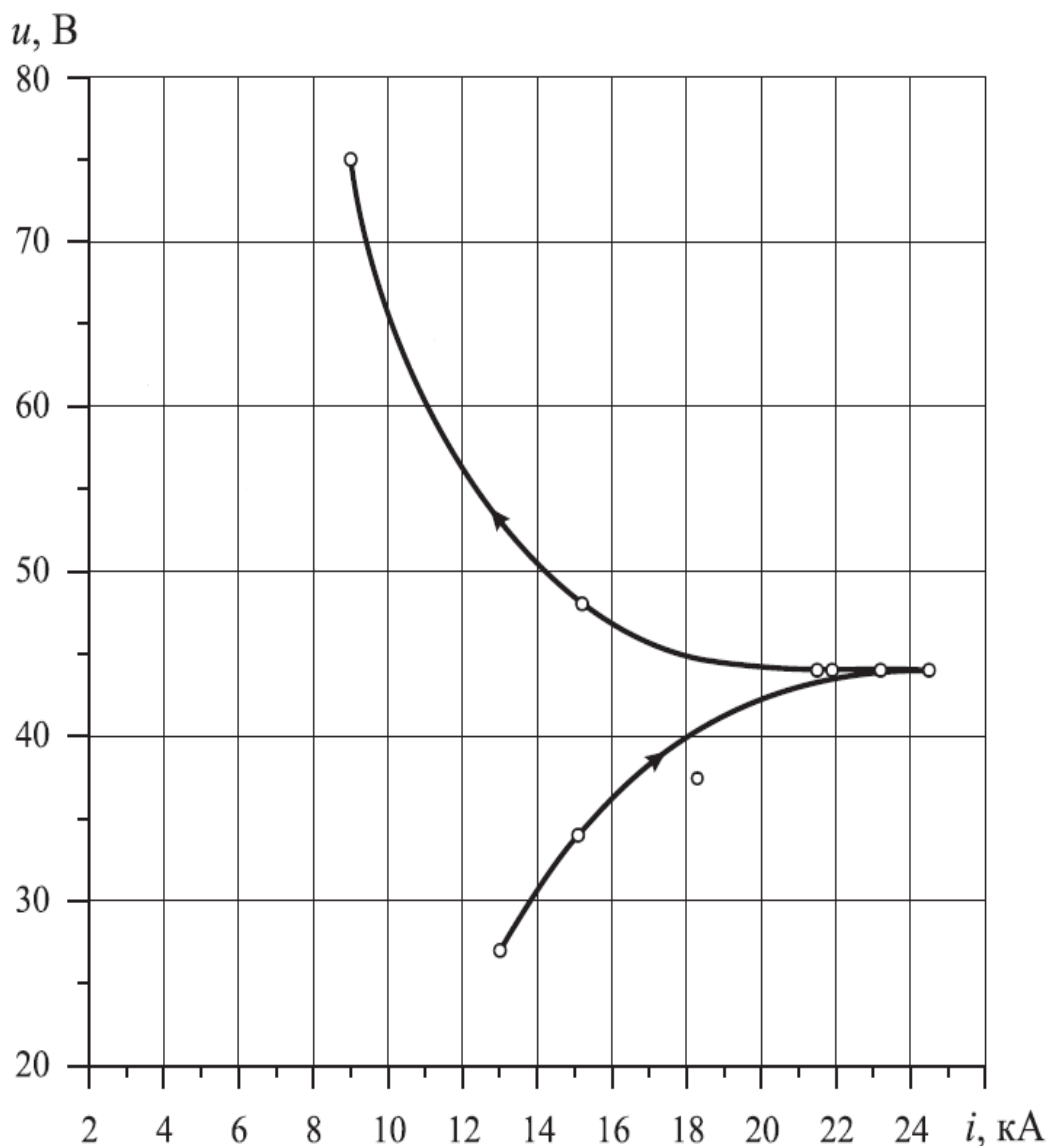


Рис. 2.6. Вольтамперные характеристики дуги на размыкаемых контактах при  $i_{d,max}=24,5$  кА.

В таблице 2.2 приведены значения средней напряжённости электрического поля  $E_{cp}$  между размыкаемыми контактами, рассчитанные по данным таблицы 2.1. На рис. 2.7 показан график средней напряжённости электрического поля между размыкаемыми контактами в зависимости от тока. Средняя напряжённость поля вдоль канала дуги в функции тока по мере расхождения контактов снижается. При возрастании тока до его максимального мгновенного значения спад напряжённости поля  $E_{cp}$  происходит быстро. После перехода тока дуги через максимум скорость спада напряжённости поля снижается. С началом движения дуги по контактам средняя напряжённость поля  $E_{cp}$  возрастает.

Таблица 2.2. Средняя напряжённость электрического поля  $E_{cp}$  и напряжённость  $E_k$  в канале дуги.

$t$ , мс	0,334	0,668	1,34	2,0	2,67	4,0	5,34	6,68	7,35
$i_d$ , кА	13,0	15,0	18,2	21,5	23,2	24,5	21,9	14,6	9,0
$U_d$ , В	27	34	36	44	44	44	44	48	75
$\delta$ , см	0,08	0,21	0,36	0,58	0,63	0,67	0,73	0,92	1,0
$E_{cp}$ , В/см	337	162	100	76	70	66	60	52	75
$E_k$ , В/см	88	67	44	41	38	36	33	30	50

Напряжение на дуге можно представить в следующем виде:

$$u_d = (U_k + U_a) + E_k \cdot l_d, \quad (*)$$

где  $l_d = \delta$  – длина дуги равная раствору контактов,  $E_k$  – напряжённость поля в канале дуги на серебросодержащих контактах по мере их расхождения. Значения  $E_k$  были вычислены из формулы (\*) с использованием данных таблицы 2.1. При определении напряжённости поля в канале дуги  $E_k$  из напряжения на дуге  $u_d$  была вычтена сумма приэлектродных падений напряжений. Для серебросодержащих контактов сумма  $(U_k + U_a) = 20$  В.

Зависимость напряжённости  $E_k$  от тока на размыкаемых контактах показана на рис. 2.7. С ростом тока дуги напряжённость в её канале быстро падает. При снижении тока скорость падения  $E_k$  значительно уменьшается.

На рис. 2.8 приведён график напряжённости электрического поля  $E_k$  в канале дуги на размыкаемых контактах в зависимости от их раствора. Характеристика  $E_k = f(\delta)$  на размыкаемых контактах падающая. Но с началом движения дуги по контактам  $E_k$  резко растёт.

На рис. 2.9 приводится график изменения плотности тока в опорных пятнах на катоде и аноде по мере расхождения контактов, построенным по данным таблицы 2.1.

2.1. Форма дугового разряда на размыкаемых контактах...

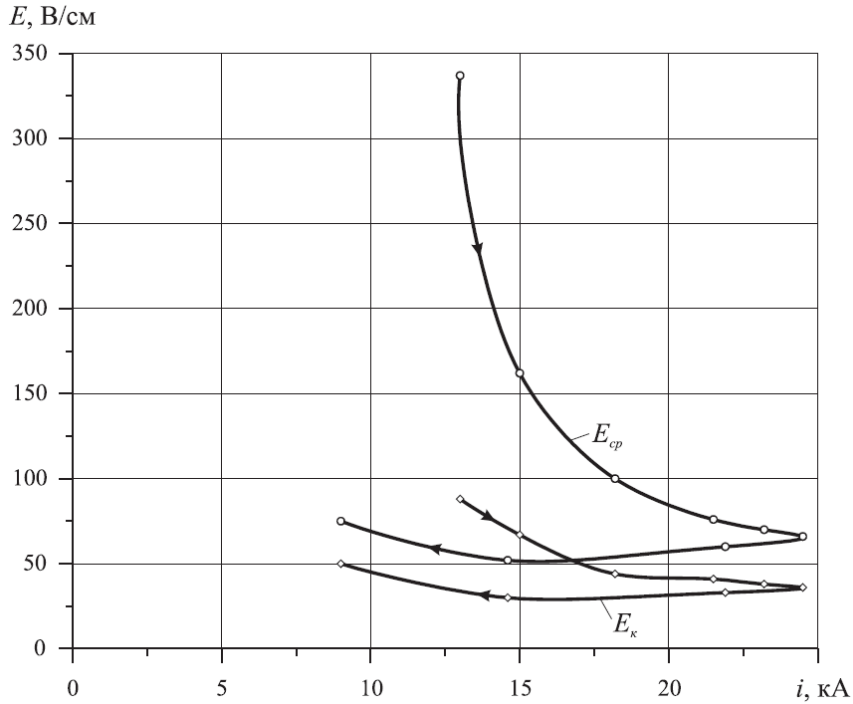


Рис. 2.7. Напряжённость поля  $E$  между размыкаемыми контактами.

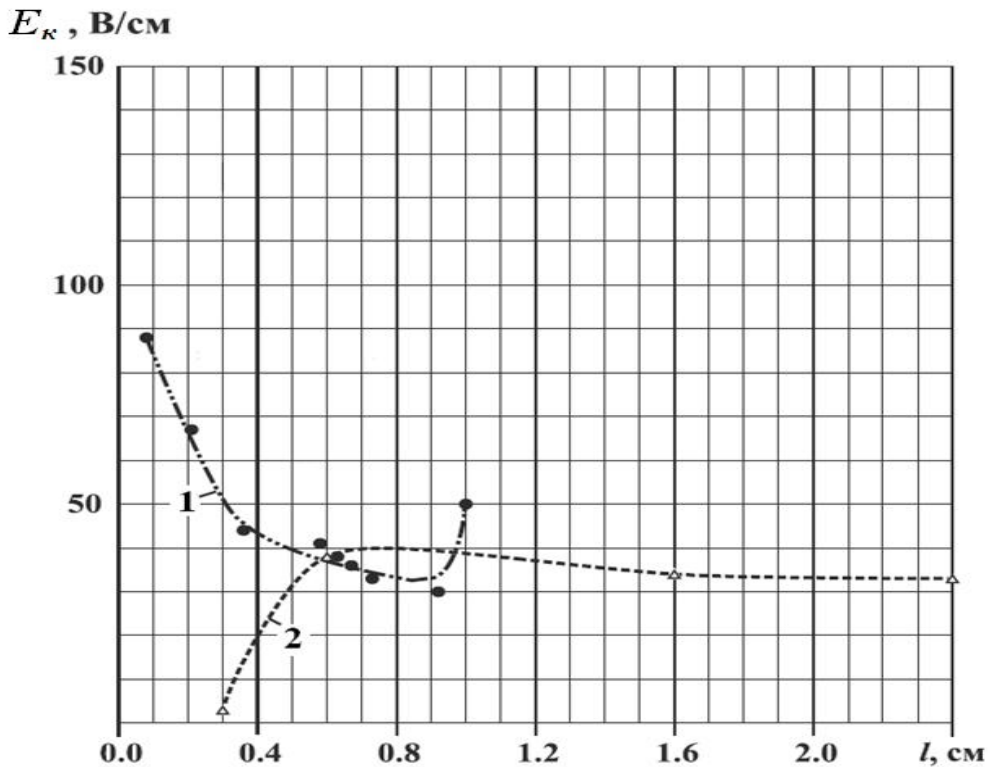
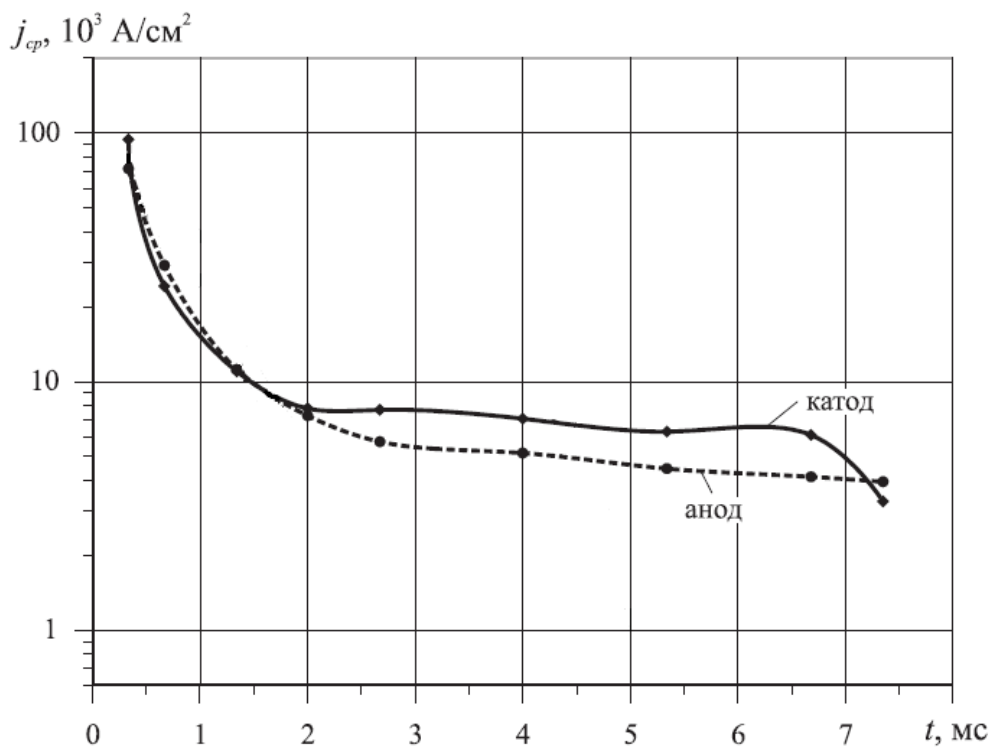


Рис. 2.8. Напряжённость электрического поля  $E_k$  в канале дуги: 1 – на серебрясодержащих контактах в зависимости от их раствора при  $i_{d,max}=24,5$  кА; 2 – между омеднёнными деионными пластинами в дугогасительной решётке в зависимости от расстояния между ними в диапазоне токов  $i_{d,max}=5,9\div 28,3$  кА.



**Рис. 2.9.** Изменение во времени средней плотности тока дуги в опорных пятнах катода и анода по мере расхождения серебрясодержащих контактов при токе дуги  $i_{d,max}=24,5$  кА.

По данным таблицы 2.1 на рис. 2.10 представлены графики изменения удельной электропроводности плазмы в канале короткой контрагированной дуги на размыкаемых серебрясодержащих контактах по мере их расхождения.

Обе характеристики:  $j=f(t)$  и  $\sigma=f(t)$  – ниспадающие. На начальном этапе расхождения контактов в течение первых  $1,5 \div 2,0$  мс характеристики резко падающие. Затем, по мере дальнейшего расхождения контактов, наступает относительно установившейся режим. С началом движения дуги по контактам обе характеристики резко падают.

Обращает на себя внимание общий характер изменения электрических параметров короткой контрагированной дуги на размыкаемых контактах низковольтных выключателей при отключении токов КЗ. Все они, за исключением ВАХ, имеют падающий вид. Для анализа характера изменения электрических параметров короткой контрагированной дуги обратимся к её геометрическим характеристикам, изменяющихся по мере расхождения контактов. В таблице 2.3 приведены численные значения площади боковой поверхности дуги и её опорных пятен на размыкаемых контактах и их отношение ( $S_{бок} / (S_{on.k} + S_{on.a}) = l_{\delta} / r_{on}$ ).



## 2.1. Форма дугового разряда на размыкаемых контактах...

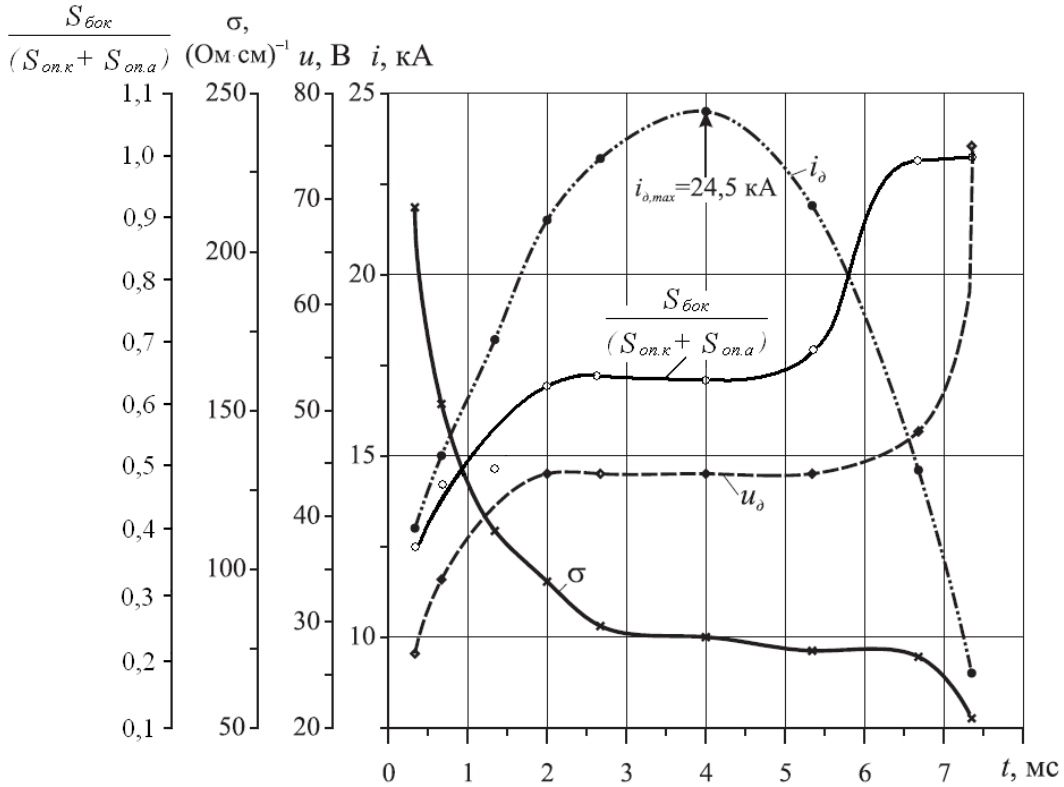


Рис. 2.10. Графики изменения тока  $i_d$  и напряжения  $u_d$  дуги, удельная электропроводность её плазмы  $\sigma$  на размыкаемых контактах при  $i_{d,max}=24,5$  кА, соотношения боковой поверхности канала дуги и суммы площадей её опорных пятен  $S_{бок}/(S_{оп.к}+S_{оп.а})$ .

Таблица 2.3. Площади опорных пятен и боковой поверхности дуги на размыкаемых контактах.

$i_{d,max},$ кА	$t_d, мс$	$S_{оп.к}, см^2$	$S_{оп.а}, см^2$	$S_{оп.к}+S_{оп.а}, см^2$	$S_{бок}, см^2$	$\frac{S_{бок}}{(S_{оп.к}+S_{оп.а})}$
24,5	0,334	0,18	0,14	0,32	0,12	0,375
	0,668	0,51	0,62	1,13	0,53	0,469
	1,34	1,63	1,65	3,28	1,63	0,497
	2,0	2,95	2,74	5,69	3,53	0,620
	2,67	4,05	3,02	7,07	4,49	0,635
	4,0	4,75	3,46	8,21	5,18	0,631
	5,34	4,9	3,46	8,36	5,73	0,685
	6,68	3,53	2,38	5,91	6,12	1,036
	7,35	2,27	2,75	5,02	5,34	1,064

Для наглядного представления о взаимной связи геометрии дуги и её электрических характеристик геометрическая характеристика дуги  $S_{бок} / (S_{он.к} + S_{он.а})$  нанесена на рис. 2.10, на котором показано изменение тока дуги  $i_d$ , её напряжения  $u_d$  на размыкаемых контактах и удельной электропроводности плазмы в канале дуги. Оказывается, несмотря на изменение тока дуги, геометрическая характеристика дуги  $l_d / r_{он}$  и характеристика напряжения дуги  $u_d$  имеют одинаковую форму и во времени соответствуют друг другу. Соответственно этим характеристикам изменяются и характеристики удельной электропроводности плазмы дуги и плотности тока в опорных пятнах как по форме, так и во времени.

Отсюда можно сделать вывод, что формирование дуги и её развитие проходят три этапа. На первом этапе, протекающем от момента времени размыкания контактов  $1,5 \div 2,0$  мс, канал дуги насыщен неидеальной плазмой, состоящей из ионизированных паров металла контактов (в данном случае пары Ag) и имеющей высокую удельную электропроводность. На первом этапе, геометрическая характеристика дуги растёт, но не превышает значения  $< 0,6$ . На втором этапе геометрический параметр дуги  $l_d / r_{он}$  равен  $\sim 0,7$ . На этом этапе, который может продолжаться несколько миллисекунд, объём канала дуги расширяется синхронно во всех направлениях при скорости размыкания контактов  $2,0$  мс. Электрические параметры  $u_d$ ,  $\sigma$  и  $j$  имеют квазипостоянное значение. Плазму дуги, состоящую из ионизированных паров металла контактов, можно принимать за идеальную. На третьем этапе развития дуги на размыкаемых контактах геометрический параметр  $l_d / r_{он}$  от значения  $0,7$  растёт и может составить более  $1,0$ . В таком случае плазма дуги за счёт инжекторного эффекта в приэлектродных областях насыщается газом окружающей среды. Удельная электропроводность плазмы в канале дуги резко снижается, а напряжение на размыкаемых контактах быстро растёт. Инерционность массы плазмы дуги также резко снижается и она приобретает подвижность [2.4, ч. II, с. 69, рис. 4.29].

Строго говоря, за короткую контрагированную дугу следует принимать дугу, геометрический параметр  $l_d / r_{он}$  которой не превышает значение  $0,6$ . Канал дуги в таком случае состоит только из ионизированных паров металла контактов. При  $l_d / r_{он} = 0,6 \div 0,8$  плазма в канале дуги начинает насыщаться газом окружающей среды. По мере увеличения геометрического параметра дуги  $l_d / r_{он}$  состав плазмы её изменяется. В переходной форме дуги масса паров металла контактов её плазмы снижается и увеличивается масса газа окружающей среды. При зна-

## 2.2. Модель дуги со сплошным ядром

---

чении  $l_0/r_{on} \gg 1,0$  форма дуги из короткой контрагированной преобразуется в длинную контрагированную. В таком случае можно принимать, что плазма дуги состоит только из ионизированного газа окружающей среды.

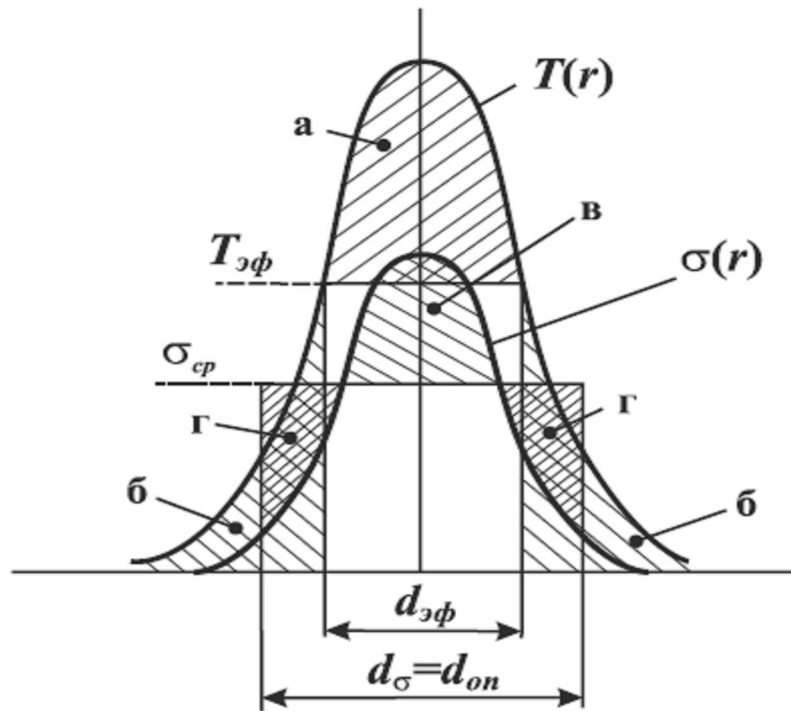
Приведённые электрические характеристики дугового разряда, полученные экспериментально, и его фотографии скоростной киносъёмки на размыкаемых контактах дают представление о форме короткой контрагированной дуги при отключении низковольтными выключателями токов КЗ. Однако структуру канала дуги и её опорных пятен из-за большой яркости свечения плазмы различить не представляется возможным. Экспериментальная регистрирующая аппаратура, в таких случаях, должна обладать временным разрешением  $\sim 10^{-9}$  с и пространственным разрешением  $\sim 10^{-3}$  мм.

Однако следует заметить, что инжекторный эффект, в результате которого газ окружающей среды всасывается в канал дуги, может происходить при условии, если канал имеет дискретную структуру, состоящую из множества отдельных струек плазмы.

## 2.2. Модель дуги со сплошным ядром

В опубликованных работах нередко обращаются к каналовой модели дуги [2.3, с. 61]. В такой модели дуги вместо колокообразного распределения по её сечению температуры  $T(r)$ , плотности тока  $j(r)$  и удельной электропроводности  $\sigma(r)$  принимают равномерное их распределение по всему объёму её канала (рис. 2.11). Параметры дуги характеризуют эффективная температура  $T_{эф}$  и средние значения по всему объёму канала дуги плотности тока  $j_{cp}$  и удельной электропроводности её плазмы  $\sigma_{cp}$ . В такой упрощённой модели дуги подразумевают, что её ядро имеет сплошную структуру.

При значении температуры, равном эффективной температуре  $T_{эф}$ , заштрихованная площадь а на рис. 2.11 равна сумме площадей б. Аналогично значение средней удельной электропроводности  $\sigma_{cp}$  определяется равенством площадей в и г. Однако, при этом диаметр  $d_{эф}$  не равен диаметру опорного пятна  $d_{on}$ . Дело в том, что в пределах цилиндра с основанием  $d_{on}=d_{\sigma}$  плазма имеет удельную электропроводность  $\sigma_{cp}$ , значение которой устанавливается при температуре  $T_{эф}$  на границе цилиндра с основанием  $d_{эф}$ . Так как температура  $T_{эф}$  достаточна высока, то за пределами цилиндра с основанием  $d_{эф}$  плазма обладает ещё достаточно большой электропроводностью.



**Рис. 2.11.** Схематическое изображение графиков распределения  $T(r)$ ,  $\sigma(r)$  и  $T_{эфф}$ ,  $\sigma_{ср}$  в каналовой модели короткой контрагированной дуги со сплошным ядром.

Согласно [2.3, с. 62] эффективный радиус каналовой модели дуги равен:

$$r_{эфф} = 0,7r_{\delta},$$

где  $r_{\delta}$  – радиус дуги, в пределах которого протекает весь ток.

Уравнение баланса мощности такой модели дуги, имеющей площадь излучения  $S_{изл} = 2 \cdot \pi \cdot r_{эфф} \cdot \delta = 4,396 \cdot r_{\delta} \cdot \delta$ , имеет вид:

$$i_{\delta} \cdot u_{\delta} = \sigma \cdot \beta \cdot S_{изл} \cdot T_{эфф}^4,$$

где  $\delta$  – длина канала дуги, равная раствору контактов,  $i_{\delta}$  и  $u_{\delta}$  средние значения тока и напряжения дуги за интервал времени  $\Delta t$ ,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-5} \text{ эрг} / (\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{K}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\beta = 0,5-0,7$  – степень черноты для дуг, горящих в парах металлов.

Из последнего выражения можно определить эффективную температуру-температуру, усреднённую по всему объёму канала дуги:

## 2.2. Модель дуги со сплошным ядром

---

$$T_{эф} = \left( \frac{i_{\delta} \cdot u_{\delta}}{\sigma \cdot \beta \cdot S_{изл}} \right)^{1/4}.$$

В системе СГС формула, определяющая эффективную температуру дуги, примет вид:

$$T_{эф} = 447 \left( \frac{i_{\delta} \cdot u_{\delta}}{\beta \cdot r_{\delta} \cdot \delta} \right)^{1/4},$$

где  $T_{эф}$  измеряется в  $K$ ,  $i_{\delta}$  в  $A$ ,  $u_{\delta}$  в  $B$ ,  $r_{\delta}$  и  $\delta$  в  $см$ .

Рассмотрим конкретный пример. Электрические и геометрические параметры дуги, неподвижной на размыкаемых контактах, составляют:  $i_{\delta}=24,5$   $кА$ ,  $u_{\delta}=44$   $B$ ,  $r_{\delta}=1,23$   $см$ ,  $\delta=0,67$   $см$  (рис. 2.4, кадр 24).

Если степень черноты принять равной  $\beta=0,6$ , то эффективная температура в канале дуги составит:

$$T_{эф} = 447 \left( \frac{24500 A \cdot 44 B}{0,6 \cdot 1,23 см \cdot 0,67 см} \right)^{1/4} K = 17176 K.$$

В этом случае было принято, что вся энергия, выделенная в дуге, рассеивается в окружающую среду путём излучения.

Рассмотрим вопрос о путях рассеивания выделяющейся в дуге энергии, которые определяют структуру уравнения энергетического баланса дуги.

Уравнение энергетического баланса системы «контакты-дуга» во время неподвижности короткой контрагированной дуги на размыкаемых контактах можно представить в следующем виде:

$$\Delta W_{\delta} = \Delta Q_{кон} + \Delta Q_{канал},$$

где  $\Delta W_{\delta}$  – энергия, выделяемая дугой за интервал времени  $\Delta t$ ,  $\Delta Q_{кон}$  – часть энергии дуги, поглощаемая контактами,  $\Delta Q_{канал}$  – энергия канала дуги.

Энергия, отводимая в контакты, определяется формулой:

$$\Delta Q_{кон} = \Delta Q_{кон.к} + \Delta Q_{кон.а} = \eta \cdot \Delta W_{\delta},$$

## Глава 2. Форма и структура дугового разряда

---

где  $\Delta Q_{кон.к}$  и  $\Delta Q_{кон.а}$  – доли энергии дуги, отводимые в катод и анод соответственно,  $\eta$  – коэффициент, определяющий часть энергии, поглощаемой контактами.

Согласно [2.3, с. 135] коэффициент полезного действия (к.п.д.)  $\eta$  для сварочных дуг с плавящимися электродами в первом приближении принимается как отношение

$$\eta = \frac{U_{\kappa} + U_a}{u_{\delta}},$$

где  $U_{\kappa} + U_a$  – сумма приэлектродных падений напряжения,  $u_{\delta}$  – полное напряжение на дуге.

Используя последнее выражение, определим отводимую в контакты часть энергии дуги, которая расходуется на нагрев и эрозию контактов:

$$\Delta Q_{кон} = \eta \cdot \Delta W_{\delta} = \frac{U_{\kappa} + U_a}{u_{\delta}} \cdot \Delta W_{\delta}.$$

Энергия канала равна:

$$\Delta Q_{канал} = \Delta W_{\delta} - \Delta Q_{кон} = \Delta W_{\delta} - \eta \cdot \Delta W_{\delta} = (1 - \eta) \cdot \Delta W_{\delta}.$$

В этом примере  $\eta = \frac{U_{\kappa} + U_a}{u_{\delta}} = \frac{20B}{44B} = 0,45$ , где  $U_{\kappa} + U_a$  – сумма приэлектродных падений напряжения на серебрясодержащих контактах (для  $Ag$   $U_{\kappa} = 12,5 \div 17 B$ ,  $U_a = 4 \div 6 B$ ).

Тогда будем иметь:

$$\begin{aligned} T'_{\text{эф}} &= 447 \left( \frac{(1 - \eta) \cdot i_{\delta} \cdot u_{\delta}}{\beta \cdot r_{\delta} \cdot \delta} \right)^{1/4} = \\ &= 447 \left( \frac{(1 - 0,45) \cdot 24500 A \cdot 44B}{0,6 \cdot 1,23 \text{ см} \cdot 0,67 \text{ см}} \right)^{1/4} K = 14758 K. \end{aligned}$$

Это значение температуры значительно ниже, чем её значение при рассеивании всей выделяемой энергии в дуге за счёт излучения:

## 2.2. Модель дуги со сплошным ядром

---

$$T_{эф} = 17176 K > 14758 K = T'_{эф}.$$

Энергия канала дуги расходуется на диссоциацию и ионизацию газа в канале дуги ( $\Delta Q_i$ ) и отводится в окружающую среду конвективными потоками ( $\Delta Q_{н.пл}$ ) и излучением ( $\Delta Q_{изл}$ ):

$$\Delta Q_{канал} = \Delta Q_i + \Delta Q_{н.пл} + \Delta Q_{изл}.$$

Оценим долю энергии, которая затрачивается на ионизацию идеального одноатомного газа, состоящего из паров серебра при разных значениях температуры и давлении  $P=1 \text{ атм}$ . Энергия, которую необходимо затратить на ионизацию паров серебра в канале дуги объёма  $V_\delta$ , может быть определена по формуле:

$$\Delta Q_i = q_i \cdot n_i \cdot V_\delta,$$

где  $q_i = 1,6 \cdot 10^{-12} \cdot U_i = 12,06 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$  – энергия ионизации одного атома серебра,  $U_i = 7,54 \text{ В}$  – потенциал ионизации атома серебра,  $n_i$  – концентрация ионов.

При тех же экспериментальных данных ( $i_\delta = 24,5 \text{ кА}$ ,  $u_\delta = 44 \text{ В}$ ,  $r_\delta = 1,23 \text{ см}$ ,  $\delta = 0,67 \text{ см}$ ) объём канала дуги равен:

$$\begin{aligned} V_\delta &= \pi \cdot r_{эф}^2 \cdot \delta = \pi \cdot (0,7 \cdot r_\delta)^2 \cdot \delta = \\ &= 3,14 \cdot (0,7 \cdot 1,23 \text{ см})^2 \cdot 0,67 \text{ см} = 1,56 \text{ см}^3. \end{aligned}$$

Энергия канала дуги составляет:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{канал} &= (1 - \eta) \cdot i_\delta \cdot u_\delta \cdot \Delta t = \\ &= (1 - 0,45) \cdot 24500 \text{ А} \cdot 44 \text{ В} \cdot 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 99,0 \text{ Вт} \cdot \text{с}, \end{aligned}$$

где  $\Delta t = 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  – время экспозиции одного кадра скоростной киносъёмки.

Численные значения энергии, необходимой для ионизации одноатомных паров Ag, приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Энергия, необходимая для ионизации одноатомных паров *Ag*, в канале дуги объёмом  $V_0=1,56 \text{ см}^3$  в зависимости от температуры при  $p=1 \text{ атм}$ .

$T, 10^3, K$	8	9	10	11	12
$n_i, 10^{17}, \text{ см}^{-3}$	1,393	2,163	2,700	2,891	2,856
$\Delta Q_i, 10^5, \text{ эрг}$	26,2	40,69	50,79	54,38	53,72
$\Delta Q_i, \text{ Вт} \cdot \text{ с}$	0,262	0,4069	0,5079	0,5438	0,5372
$\Delta Q_i / \Delta Q_{\text{канал}}, \%$	0,067	0,414	0,518	0,554	0,548

Из приведённых в таблице 2.4 данных видно, что в общей энергии канала дуги  $\Delta Q_{\text{канал}}$  доля энергии, затрачиваемая на ионизацию паров *Ag*, не превышает 1% и в практических инженерных расчётах ею можно пренебречь.

Доля энергии, рассеивающаяся в окружающую среду излучением, зависит от температуры канала дуги и степени черноты. Значение температуры, определённое из условия потери энергии канала дуги только путём излучения, существенно завышено.

Степень черноты, в свою очередь, может изменяться на несколько порядков в зависимости от состава плазмы дуги. Если плазма дуги состоит из чистых паров металлов, таких как *Ag*, *Fe*, *Cu* или *Ni*, то для практических инженерных расчётов степень черноты можно принимать равной  $\beta = 0,5 \div 0,7$ . Если в парах этих металлов будет примесь графита, то  $\beta = 0,5 \div 0,85$ . Степень черноты газа зависит как от температуры, так и от давления. Например, для воздуха при давлении  $P=1 \text{ атм}$  в диапазоне температур  $T = 8000 \div 12000 \text{ К}$  степень черноты изменяется в интервале  $\beta = 1,46 \cdot 10^{-3} \div 2,63 \cdot 10^{-2}$ . При давлении воздуха  $P=10 \text{ атм}$  в том же диапазоне температур  $\beta = 4 \cdot 10^{-2} \div 1,4 \cdot 10^{-1}$  [2.4, ч. II, таблица 7.11, с. 370]. Поэтому при подобных расчётах эффективной температуры в канале дуги значение степени черноты  $\beta$  следует выбирать осторожно.

Практические методы расчёта потерь энергии  $\Delta Q_{n.pl}$  в канале дуги за счёт конвективных потоков плазмы пока отсутствуют. Поэтому определить долю энергии, рассеиваемую излучением ( $\Delta Q_{\text{изл}} = \Delta Q_{\text{канал}} - \Delta Q_{n.pl}$ ), и, следовательно, эффективную температуру в канале дуги не представляется возможным. Однако



## 2.2. Модель дуги со сплошным ядром

---

эффективную температуру можно определить, если известны средняя удельная электропроводность, состав плазмы и её давление.

Так, например, при  $i_\delta = 24,5 \text{ кА}$ ,  $u_\delta = 44 \text{ В}$ ,  $r_\delta = 1,23 \text{ см}$ ,  $\delta = 0,67 \text{ см}$  среднее значение удельной электропроводности плазмы в канале дуги равно:

$$\sigma_{cp} = \frac{i_\delta \cdot \delta}{u_\delta \cdot S_{on}} = \frac{24500 \text{ А} \cdot 0,67 \text{ см}}{44 \text{ В} \cdot 4,75 \text{ см}^2} = 78,5 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1},$$

где  $S_{on} = \pi \cdot r_\delta^2 = 3,14 \cdot (1,23 \text{ см})^2 = 4,75 \text{ см}^2$  – площадь опорного пятна дуги.

Давление в канале дуги в таком случае составляет:

$$P_\delta = P_{атм} + 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot j_\delta \cdot i_\delta = 1 \text{ атм} + 9,87 \cdot 10^{-9} \times \\ \times 5,158 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2 \cdot 24500 \text{ А} = 2,25 \text{ атм},$$

где  $j_\delta = i_\delta / S_{on} = 24500 \text{ А} / 4,75 \text{ см}^2 = 5,158 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$  – плотность тока в опорном пятне дуги.

В этом эксперименте дуга горела на серебросодержащих контактах. Поэтому эффективную температуру канала короткой контрагированной дуги, находящейся на контактах в неподвижном положении, определим по кривым рисунка 2.12. При  $\sigma = 78,5 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$  и  $P_\delta = 2,25 \text{ атм}$  эффективная температура в канале дуги оказывается равной  $T_{эф} \sim 11 \cdot 10^3 \text{ К}$ . Это значение  $T_{эф}$  существенно отличается от определённого ранее:

$$T'_{эф} = 14758 \text{ К} > 11000 \text{ К} \sim T_{эф}$$

Зная теперь  $T_{эф} \simeq 11 \cdot 10^3 \text{ К}$ , определим долю энергии, которая рассеивается в окружающую среду излучением. Поверхностная плотность потока энергии излучения составляет [2.8, с. 189]:

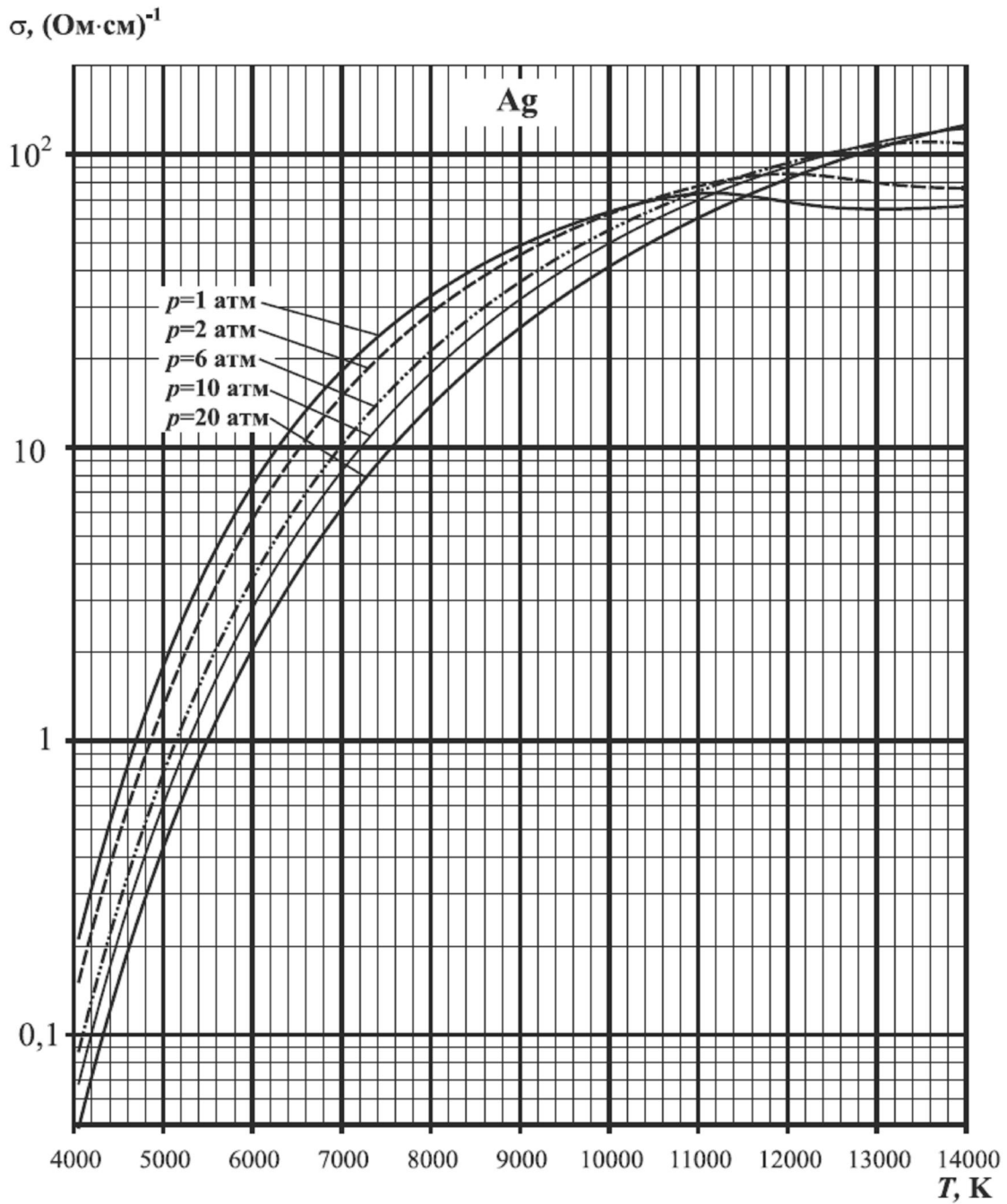


Рис. 2.12. Удельная электропроводность паров серебра в зависимости от температуры при разных давлениях.

$$q_{\text{изл}} = \sigma \cdot \beta \cdot T_{\text{эф}}^4 = \sigma' \cdot \beta \cdot \left( \frac{T_{\text{эф}}}{100} \right)^4 =$$

$$= 5,67 \cdot 10^3 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{К}^4} \cdot 0,6 \cdot \left( \frac{11000 \text{К}}{100} \right)^4 = 4,98 \cdot 10^{11} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2},$$

## 2.2. Модель дуги со сплошным ядром

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-5} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{К}^4}$  – постоянная Стефана-Больцмана,

$\sigma' = 5,67 \cdot 10^3 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{К}^4}$ ,  $\beta = 0,6$  – степень черноты, а безразмерный делитель 100 введён для упрощения вычислений.

Количество тепла  $\Delta Q_{\text{изл}}$ , излучённого с поверхности  $S_{\text{изл}}$  канала дуги в окружающую среду за время  $\Delta t = 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , будет равно:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{изл}} &= q_{\text{изл}} \cdot S_{\text{изл}} \cdot \Delta t = \\ &= 4,98 \cdot 10^{11} \text{ эрг} / (\text{с} \cdot \text{см}^2) \cdot 3,623 \text{ см}^2 \times \\ &\times 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 3,01 \cdot 10^8 \text{ эрг} = 30,1 \text{ Вт} \cdot \text{с}, \end{aligned}$$

где  $S_{\text{изл}} = 4,396 \cdot r_0 \cdot \delta = 4,296 \cdot 1,23 \text{ см} \cdot 0,67 \text{ см} = 3,623 \text{ см}^2$  – площадь излучения канала дуги.

Ранее было определено, что энергия канала дуги  $Q_{\text{канал}} = 99,0 \text{ Вт} \cdot \text{с}$ . Следовательно, при  $T_{\text{эф}} \simeq 11 \cdot 10^3 \text{ К}$  в данном случае относительная доля  $\eta_{\text{изл}}$  энергии, рассеиваемой излучением, составляет:

$$\eta_{\text{изл}} = \frac{\Delta Q_{\text{изл}}}{\Delta Q_{\text{канал}}} = \frac{30,1 \text{ Вт} \cdot \text{с}}{99,0 \text{ Вт} \cdot \text{с}} = 0,304,$$

то есть рассеивается излучением не вся энергия, а только 30,4%. Остальная часть энергии из канала дуги выносится в окружающую среду потоками плазмы. Энергия потоков плазмы составляет:

$$\Delta Q_{\text{н.пл}} = \Delta Q_{\text{канал}} - \Delta Q_{\text{изл}} = 99,0 \text{ Вт} \cdot \text{с} - 30,1 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 68,9 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Таким образом, общее уравнение энергетического баланса системы «контакты-дуга» принимает следующий вид:

$$\Delta W_{\delta} = \Delta Q_{\text{кон}} + \Delta Q_{\text{канал}} = \Delta Q_{\text{кон}} + \Delta Q_{\text{изл}} + \Delta Q_{\text{н.пл}}.$$

Подставим в это уравнение численные значения, характеризующие энергию дуги за время экспозиции кадра 24:

$$\Delta W_{\delta} = i_{\delta} \cdot u_{\delta} \cdot \Delta t = 24,5 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot 44 \text{ B} \cdot 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ c} = 180 \text{ Bm} \cdot \text{c}.$$

$$\Delta Q_{\text{кон}} = \eta \cdot W_{\delta} = 0,45 \cdot 180 \text{ Bm} \cdot \text{c} = 81 \text{ Bm} \cdot \text{c}.$$

Тогда будем иметь:

$$180 \text{ Bm} \cdot \text{c} = 81 \text{ Bm} \cdot \text{c} + 30,1 \text{ Bm} \cdot \text{c} + 68,9 \text{ Bm} \cdot \text{c}.$$

Относительные потери энергии дуги, находящейся на серебрясодержащих контактах в неподвижном положении, при  $i_{\delta, \text{max}} = 24,5 \text{ кА}$  и  $u_{\delta} = 44 \text{ В}$  (кадр 24, рис. 2.4) составляют:

$$\frac{\Delta Q_{\text{кон}}}{\Delta W_{\delta}} = \frac{81 \text{ Bm} \cdot \text{c}}{180 \text{ Bm} \cdot \text{c}} = 0,45; \quad \frac{\Delta Q_{\text{изл}}}{\Delta W_{\delta}} = \frac{30,1 \text{ Bm} \cdot \text{c}}{180 \text{ Bm} \cdot \text{c}} = 0,167;$$

$$\frac{\Delta Q_{\text{н.пл}}}{\Delta W_{\delta}} = \frac{68,9 \text{ Bm} \cdot \text{c}}{180 \text{ Bm} \cdot \text{c}} = 0,383.$$

Из рис. 2.4 видно, что раствор контактов при киносъёмке кадра 24 составлял 6,7 мм и поток плазмы простирался от межконтактного зазора на 80 мм. Однако на кадре 4 поток плазмы за пределы зоны контактов при их растворе 2,1 мм не выходит. Поэтому энергия потоков плазмы остаётся в канале. В тоже время эффективная температура канала дуги  $T_{\text{эф}}$  достигает почти  $17 \cdot 10^3 \text{ К}$  [2.4, ч. II, с. 114, таблица 4.29] и основные потери энергии канала дуги будут составлять потери энергии на излучение [2.4. ч. II, с. 118, рис. 4.62]. В таком случае уравнение энергетического баланса системы «контакты-дуга» будет иметь вид:

$$\Delta W_{\delta} = \Delta Q_{\text{кон}} + \Delta Q_{\text{изл}},$$

где  $\Delta W_{\delta} = i_{\delta} \cdot u_{\delta} \cdot \Delta t = 15 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot 34 \text{ B} \cdot 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ c} = 85,2 \text{ Bm} \cdot \text{c}$ ;

$$\Delta Q_{\text{кон}} = \eta \cdot W_{\delta} = \frac{20 \text{ B}}{34 \text{ B}} \cdot 85,2 \text{ Bm} \cdot \text{c} = 50,1 \text{ Bm} \cdot \text{c}.$$

Потери энергии каналом дуги на излучение составляют:

$$\Delta Q_{\text{изл}} = \Delta W_{\delta} - \Delta Q_{\text{кон}} = 85,2 \text{ Bm} \cdot \text{c} - 50,1 \text{ Bm} \cdot \text{c} = 35,1 \text{ Bm} \cdot \text{c}.$$

Относительные потери энергии дуги, находящейся на серебрясодержащих контактах в неподвижном положении, при  $i_{\delta} = 15,0 \text{ кА}$ ,  $u_{\delta} = 34 \text{ В}$  и растворе контактов  $\delta = 2,1 \text{ мм}$  составляют:

## 2.2. Модель дуги со сплошным ядром

---

$$\frac{\Delta Q_{\text{кон}}}{\Delta W_{\delta}} = \frac{50,1 \text{ Вт} \cdot \text{с}}{82,5 \text{ Вт} \cdot \text{с}} = 0,59; \frac{\Delta Q_{\text{изл}}}{\Delta W_{\delta}} = \frac{35,1 \text{ Вт} \cdot \text{с}}{82,5 \text{ Вт} \cdot \text{с}} = 0,41.$$

Приведённые примеры показывают, что потери энергии дуги на размыкаемых контактах зависят от их раствора.

Для оценки тепловых явлений на опорных пятнах короткой контрагированной дуги со сплошным ядром на размыкаемых серебросодержащих контактах определим поверхностный тепловой поток (плотность мощности), приходящий на них. Плотность мощности  $q_{on}$ , приходящая на опорное пятно дуги, определяется по формуле:

$$q_{on} = \frac{\eta \cdot i_{\delta} \cdot u_{\delta}}{2 \cdot S_{on}},$$

где  $\eta = 20/u_{\delta}$  – коэффициент, учитывающий долю энергии дуги поглощённую серебросодержащими контактами;  $i_{\delta}$  и  $u_{\delta}$  – средние значения тока и напряжения дуги за интервал времени  $\Delta t = 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , равный экспозиции одного кадра скоростной киносъёмки,  $S_{on}$  – площадь опорного пятна и множитель 2 означает, что плотность мощности  $q_{on}$  приходит на один контакт и является средним значением как для катода, так и для анода.

В таблице 2.5 приведены численные значения плотности мощности  $q_{on}$ , приходящей на один контакт при отключении выключателем тока в испытательном контуре 16,0 кА.

При достаточно больших токах и продолжительном времени задержки дуги на контактах происходит стекание жидкого металла с поверхности контактов. На рис. 2.4 видно стекание струи жидкого металла с подвижного контакта в течение 4,0 мс с 8 кадра по 32. После опыта на нижней части контактодержателя был обнаружен тонкий слой застывшего металла.

**Таблица 2.5. Электро- и теплофизические свойства неподвижной дуги на размыкаемых контактах выключателя при отключении тока в контуре 16,0 кА.**

$t_{\partial}, мс$	0,334	0,668	1,34	2,00	2,67	4,00	5,34	6,68
$i_{\partial}, кА$	13,0	15,0	18,2	21,5	23,2	24,5	21,9	14,6
$u_{\partial}, В$	27	34	36	44	44	44	44	48
$\eta$	0,74	0,59	0,56	0,45	0,45	0,45	0,45	0,42
$S_{on}, см^2$	0,14	0,62	1,65	2,74	3,02	3,46	3,46	2,38
$q_{on}, 10^5, Вт / см^2$	9,29	2,42	1,10	0,78	0,76	0,70	0,62	0,62
$Bi_{nl}$	47,7	12,4	5,6	4,0	3,9	3,6	3,2	3,2
$Bi_{кин}$	50,0	13,1	5,9	4,2	4,1	4,8	3,4	3,4

Согласно классической теории теплопроводности, равномерность распределения температуры между наружным и внутренними слоями тела определяется критерием Био [2.6, с. 12]:

$$Bi = \frac{q \cdot h}{\lambda \cdot T_p},$$

где  $q$  – поверхностная плотность теплового потока,  $h$  – толщина тела,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $T_p$  – температура разрушения. За толщину тела примем толщину контактной пластины, равную  $h = 2,5$  мм. Проанализируем, как критерий Био изменяется за время горения дуги на контактах, если принять за температуру разрушения в одном случае температуру плавления, а в другом – температуру кипения металла контактов.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  жидкого  $Ag$  при  $T_{nl} = 1285$  К равен  $379 \cdot 10^5$  эрг / (с · см · К) [2.4, таблица 1.23, с. 110], при  $T_{кин} = 2485$  К –  $186 \cdot 10^5$  эрг / (с · см · К) [2.4, ч. I, с. 112]. Результаты расчёта критерия Био приведены в таблице 2.5.

В течение всего времени нахождения дуги на контактах, как при достижении расплавом на опорном пятне температуры плавления, так и температуры кипения, критерий Био  $Bi \gg 1,0$ . Это означает, что тепло, подводимое дугой к контактам, прогревает только верхний их слой и не проникает внутрь тела кон-

## 2.2. Модель дуги со сплошным ядром

такта. Внутренняя часть тела контакта нагревается только за счёт джоулева тепла, выделяемого при протекании тока в теле контакта ( $i^2 \cdot r$ ).

Теперь оценим время достижения поверхностным слоем температуры плавления и кипения на опорном пятне дуги по имеющимся экспериментальным данным и сравним его с фактическим временем горения дуги. Время достижения температуры плавления  $T_{пл}$  и кипения  $T_{кип}$  поверхностью опорного пятна под воздействием поверхностного теплового потока  $q_{он}$  можно вычислить по формуле [2.6, с. 54]:

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot (T_p - T_n)^2}{4 \cdot q_{он}^2},$$

где  $q_{он}$  примем равным из таблицы 2.5 и постоянным в течение времени экспозиции одного кадра  $\Delta t = 0,167 \cdot 10^{-3} c$ ; температуру разрушения  $T_p$  примем равной  $T_{пл}$  или  $T_{кип}$ ,  $T_n$  – начальная температура контакта, за которую, при определении времени достижения температуры плавления  $\tau_{пл}$  примем  $T_n = 400 K$ , равную температуре контакта первоначально подогретого номинальным током, а при определении времени достижения температуры кипения  $\tau_{кип}$  – температуру плавления  $T_{пл}$ ,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $c$  удельная теплоёмкость и  $\rho$  – плотность материала контактов при соответствующих температурах.

Для Ag при температуре  $T_{пл} = 1285 K$ :  $\lambda = 379 \cdot 10^5 \frac{эрг}{c \cdot см \cdot K}$  [2.4, таблица 1.23, с. 110],  $c_{уд} = 0,275 \cdot 10^7 \frac{эрг}{г \cdot K}$  [2.4, таблица 1.20, с. 106] и  $\rho = 9,32 \frac{г}{см^3}$  [2.7, с. 175]. При температуре  $T_{кип} = 2485 K$  примем для Ag:  $\lambda = 186 \cdot 10^5 \frac{эрг}{c \cdot см \cdot K}$  [2.4, с. 112],  $c_{уд} = 0,29 \cdot 10^7 \frac{эрг}{г \cdot K}$  [2.7, с. 180] и  $\rho = 9,0 \frac{г}{см^3}$  [2.7, с. 175].

В начальный момент времени размыкания контактов при  $q_{он} = 9,29 \cdot 10^5 Bт / см^2$  время достижения поверхностным слоем металла на опорном пятне дуги температуры плавления  $\tau_{пл}$  или кипения  $\tau_{кип}$  составляет:

$$\tau_{нл} = \frac{\pi \cdot 379 \cdot 10^5 \text{ эрг} / (\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}) \cdot 0,275 \cdot 10^7 \text{ эрг} / (\text{с} \cdot \text{К})}{4(9,29 \cdot 10^{12} \text{ эрг} / (\text{с} \cdot \text{см}^2))^2} \times$$

$$\times 9,32 \text{ г} / \text{см}^3 \cdot (1285 \text{ К} - 400 \text{ К})^2 = 6,9 \cdot 10^{-6} \text{ с};$$

$$\tau_{кип} = \frac{\pi \cdot 186 \cdot 10^5 \text{ эрг} / (\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}) \cdot 0,29 \cdot 10^7 \text{ эрг} / (\text{с} \cdot \text{К})}{4(9,29 \cdot 10^{12} \text{ эрг} / (\text{с} \cdot \text{см}^2))^2} \times$$

$$\times 9,0 \text{ г} / \text{см}^3 \cdot (2485 \text{ К} - 1285 \text{ К})^2 = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ с};$$

$$\tau_{нл} + \tau_{кип} = (6,9 + 6,4) \cdot 10^{-6} \text{ с} = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Так как  $\tau_{нл} + \tau_{кип} = 0,0133 \cdot 10^{-3} \text{ с} \ll 0,334 \cdot 10^{-3} = t_{\delta}$ , то, очевидно, на начальном этапе размыкания контактов, пока плотность мощности, приходящая на опорное пятно превышает  $10^5 \text{ Вт} / \text{см}^2$ , на его поверхности может образоваться слой жидкого металла и его температура достичь температуры кипения. Далее, в процессе горения дуги плотность мощности  $q_{он}$  снижается и, соответственно, время прогрева металла на опорном пятне до температуры плавления  $T_{нл}$  и кипения  $T_{кип}$  увеличивается. Плотность мощности может быть недостаточной для расплавления всей поверхности опорного пятна. В таком случае на его поверхности образуются только отдельные очаги расплава.

Анализ электро- и теплофизических характеристик короткой контрагированной дуги, находящейся в неподвижном положении на размыкаемых серебро-содержащих контактах, полученных в результате исследований дуги отключения большой мощности в низковольтных выключателях [2.4] и расчётным путём с использованием теории упрощённой каналовой модели дуги со сплошным ядром, показывает, что плотность мощности  $q_{он}$ , приходящая на поверхность опорного пятна дуги, составляет  $(10^5 \div 10^4) \text{ Вт} / \text{см}^2$ . Плотность мощности, превышающая  $10^5 \text{ Вт} / \text{см}^2$ , приводит на поверхности опорного пятна к образованию расплава металла контактов, температура которого достигает температуры его кипения. Следует особо подчеркнуть, что плотности мощности, приходящая на катод и анод, имеют равные значения. В таком случае катод и анод будут подвергаться электрической эрозии в равной степени.



### 2.3. Модель короткой... дуги с дискретным ядром

Кроме того, плотность мощности равная  $10^4 \text{ Вт} / \text{см}^2$  способна расплавить только часть поверхности опорного пятна.

## 2.3. Модель короткой контрагированной дуги с дискретным ядром

### 2.3.1. Эффективные приэлектродные потенциалы и плотность мощности, приходящая на катод и анод

В канальной модели дуги со сплошным ядром при определении плотности мощности, приходящей на опорные пятна дуги, были использованы понятия приэлектродных падений напряжения. Для *Ag*  $U_k=(12,5\div 17) \text{ В}$ ,  $U_a=(4\div 6) \text{ В}$  и  $U_k+U_a=20 \text{ В}$  – среднее значение суммы приэлектродных падений напряжения.

В [2.10] был измерен эффективный потенциал  $U_{эф}$  катода для электродов из различных металлов, который определялся из выражения:

$$U_{эф} = \frac{P_{эл}}{i_d},$$

где  $P_{эл}$  – мощность, отводимая в электрод,  $i_d$  – ток дуги [2.8, с. 397]. Энергия, отводимая в катод, определялась из изменения энтальпии его металла, в процессе горения дуги. В таблице 2.6 приведены значения  $U_{эф.к}$  катода и напряжения дуги  $U_d$  при её силе тока 100 А.

**Таблица 2.6. Напряжение на дуге  $U_d$  и эффективный потенциал катода  $U_{эф.к}$  для ряда металлов при токе дуги 100 А [2.10].**

Ме- талл	<i>Cd</i>	<i>Zn</i>	<i>Sn</i>	<i>Ag</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>	
$U_d, \text{ В}$	11,0	12,0	13,5	17,5	18	20	28	26,5 (200 А)	28 (600 А)
$U_{эф.к.к}/В$	2,7	3,0	3,9	5,25	5,35	6,2	9,5	8,7	9,25
$U_{эф.к.к}/U_d$	0,25	0,25	0,29	0,30	0,30	0,31	0,34	0,33	0,33

## Глава 2. Форма и структура дугового разряда

Следует заметить, что значение  $U_{эф}$  зависит от силы тока. К сожалению, подобные данные для других значений тока в опубликованных работах отсутствуют.

Межэлектродное расстояние в [2.10] изменялось от 0,5 до 10,0 мм. То есть дуга была достаточно короткой. Поэтому напряжение на дуге можно принимать равным сумме эффективных приэлектродных потенциалов:

$$U_{\delta} = U_{эф.к} + U_{эф.а},$$

где  $U_{эф.а}$  – эффективный потенциал анода.

Отсюда, например, для электродов из *Ag* будем иметь эффективный потенциал анода:

$$U_{эф.а} = U_{\delta} - U_{эф.к} = 17,5 \text{ В} - 5,25 \text{ В} = 12,25 \text{ В}.$$

Принимая во внимание значения эффективных потенциалов для катода  $U_{эф.к}$  и анода  $U_{эф.а}$ , исходя из балансов мощностей в приэлектродных областях канала дуги, можно определить плотность мощности, приходящую на катод  $q_{он.к}$  и анод  $q_{он.а}$  в отдельности. Формулы, определяющие  $q_{он.к}$  и  $q_{он.а}$ , имеют вид:

$$q_{он.к} = \frac{\eta_k \cdot (1 - \eta_{ном}) \cdot i_{\delta} \cdot U_{эф.к}}{S_{он.к}}; \quad q_{он.а} = \frac{\eta_a \cdot (1 - \eta_{ном}) \cdot i_{\delta} \cdot U_{эф.а}}{S_{он.а}}.$$

Здесь  $\eta_k = \frac{U_{эф.к}}{u_{\delta}}$  и  $\eta_a = \frac{U_{эф.а}}{u_{\delta}}$  – коэффициенты, учитывающие доли мощности, отводимые из приэлектродных областей канала дуги, в катод и анод соответственно;  $\eta_{ном}$  – коэффициент, учитывающий все потери энергии каналом дуги, в том числе, потери энергии излучением и конвективными потоками плазмы, выносимых в окружающую среду. Значения  $\eta_{ном}$  приведены в [2.4, ч. II, таблица 4.27, с. 112].  $(1 - \eta_{ном}) \cdot i_{\delta} \cdot U_{эф}$  – доля мощности приэлектродной области канала дуги. Значения  $i_{\delta}$  и  $u_{\delta}$  приведены в таблице 2.1 и  $S_{он.к}$  и  $S_{он.а}$  – в таблице 2.3. Численные значения  $\eta_k$  и  $q_{он.к}$ ,  $\eta_a$  и  $q_{он.а}$  и  $\eta_{ном}$  приведены в таблице 2.7.

### 2.3. Модель короткой... дуги с дискретным ядром

Таблица 2.7. Электро- и теплофизические параметры приэлектродных областей дуги на размыкаемых серебросодержащих контактах выключателя при отключении тока в испытательном контуре  $I=16,0$  кА,  $U_{\phi}=420$  В и  $\cos\varphi=0,2$ .

$t_{\partial}, мс$	0,334	0,668	1,34	2,0	2,67	4,0	5,34	6,68
$i_{\partial}, кА$	13,0	15,0	18,2	21,5	23,2	24,5	21,9	14,6
$u_{\partial}, В$	27	34	36	44	44	44	44	48
$\eta_{nom}$	0,65	0,56	0,47	0,388	0,350	0,309	0,330	0,436
$\eta_{к}$	0,194	0,154	0,146	0,119	0,119	0,119	0,119	0,109
$S_{on.к}, см^2$	0,18	0,51	1,63	2,95	4,05	4,75	4,9	3,53
$q_{on.к},$ $10^4 Вм/см^2$	2,57	1,05	0,454	0,279	0,233	0,223	0,187	0,133
$\eta_a$	0,454	0,630	0,340	0,278	0,278	0,278	0,278	0,255
$S_{on.a}, см^2$	0,14	0,62	1,65	2,74	3,02	3,46	3,46	2,38
$q_{on.a},$ $10^4 Вм/см^2$	18,07	4,690	2,435	1,635	1,700	1,666	1,444	1,080

Из данных таблицы 2.7 видно, что плотности мощности, приходящие на катодные и анодные опорные пятна дуги, имеют разные значения и при токе 16 кА на катоде изменяются от  $\sim 10^4$  Вм/см<sup>2</sup> до  $\sim 10^3$  Вм/см<sup>2</sup>, а на аноде – от  $\sim 10^5$  Вм/см<sup>2</sup> до  $\sim 10^4$  Вм/см<sup>2</sup>. Плотности мощности  $q_{on.к}$  и  $q_{on.a}$  на поверхности опорных пятен вызывают тепловые явления, которые возбуждают эмиссионные процессы, обеспечивающие протекание тока в дуговом разряде.

Согласно данным [2.4, ч. I, с. 293, таблица 3.10] плотность термоэлектронного тока на катоде из Ag при температуре его кипения может составить  $1,5$  А/см<sup>2</sup>. С учётом усиления термоэлектронного тока за счёт локальной напряжённости электрического поля в катодной зоне дугового разряда низковольтной дуги плотность тока не превысит  $5,0$  А/см<sup>2</sup> [2.4, ч. I, с. 295]. По данным таблицы 2.1 средняя плотность тока на катоде серебросодержащего контакта в течение времени неподвижности дуги на контактах изменяется от  $71,9 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup> до  $4,14 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup>. Очевидно, на опорных пятнах мощной дуги отключения низкого напряжения должны протекать какие-то фундаментальные физические процессы, обеспечивающие столь высокие значения плотности тока.

## Глава 2. Форма и структура дугового разряда

Проанализируем, как критерий Био изменяется за время горения дуги на контактах, если принять за температуру разрушения в одном случае температуру плавления, а в другом – температуру кипения металла контактов. Результаты расчётов критерия Био для катода и анода приведены в таблице 2.8. Из данных таблицы 2.8 видно, что на катоде критерий Био меньше единицы. Следовательно при плотности мощности  $\sim 10^4 \text{ Вт/см}^2$  и менее и  $Bi < 1,0$  на всей площади опорного пятна на катоде не может образовываться расплав металла контактов.

**Таблица 2.8. Значение критерия Био на катоде и аноде.**

$t_d, \text{ мс}$	0,334	0,668	1,34	2,0	2,67	4,0	5,34	6,68
$q_{\text{он.к}}, 10^{11} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}$	2,57	1,05	0,454	0,279	0,233	0,223	0,187	0,133
$Bi_{\text{к.пл}}$	1,32	0,54	0,23	0,14	0,12	0,11	0,1	0,07
$Bi_{\text{к.кип}}$	1,4	0,57	0,25	0,15	0,13	0,12	0,1	0,07
$q_{\text{он.а}}, 10^{11} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}$	18,07	4,690	2,435	1,635	1,70	1,666	1,444	1,080
$Bi_{\text{а.пл}}$	9,28	2,41	1,25	0,84	0,87	0,86	0,74	0,55
$Bi_{\text{а.кип}}$	9,77	2,54	1,32	0,88	0,92	0,9	0,78	0,58

Для подтверждения этого вывода определим время разогрева  $Ag$  на опорном пятне под воздействием плотности мощности  $q_{\text{он.к}} = 2,57 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$  до температуры его плавления  $T_{\text{пл}} = 1285 \text{ К}$  :

$$\tau_{\text{пл}} = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot (T_{\text{пл}} - T_{\text{н}})^2}{4 \cdot q_{\text{он.к}}^2} =$$

$$= \frac{\pi \cdot 379 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}} \cdot 0,275 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}} \cdot 9,32 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot (1285\text{К} - 400\text{К})^2}{4 \cdot (2,57 \cdot 10^{11} \text{эрг}/(\text{с} \cdot \text{см}^2))^2} = 9,0 \cdot 10^{-3} \text{ с} .$$

Действительно, на начальном этапе размыкания контактов за время горения дуги  $t_d = 0,334 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  на площади опорного пятна  $S_{\text{он.к}} = 0,18 \text{ см}^2$  под воздействием плотности мощности  $q_{\text{он.к}} = 2,57 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$  расплав  $Ag$  образоваться не может:

### 2.3. Модель короткой... дуги с дискретным ядром

$$\tau_{пл} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ с} \gg 0,334 \cdot 10^{-3} \text{ с} = t_{\delta}.$$

На аноде опорное пятно по данным таблицы 2.7 подвергается воздействию плотности мощности  $q_{он.а} \geq (10^5 \div 10^4) \text{ Вт/см}^2$ . В таком случае критерий  $Bi \geq 1,0$  (см. таблицу 2.8). Можно допустить, что на всей поверхности опорного пятна на аноде под воздействием плотности мощности  $q_{он.а} \geq (10^5 \div 10^4) \text{ Вт/см}^2$  и при  $Bi \geq 1,0$  будет образовываться расплав  $Ag$ .

Определим время разогрева  $Ag$  на анодном опорном пятне до температуры плавления  $T_{пл}=1285 \text{ К}$ , а затем до температуры кипения  $T_{кип}=2485 \text{ К}$  на начальном этапе размыкания контактов под воздействием плотности мощности  $q_{он.а} = 1,807 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ :

$$\begin{aligned} \tau_{пл} &= \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot (T_{пл} - T_{н})^2 / (4 \cdot q_{он.а}^2) = \\ &= \frac{\pi \cdot 379 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}} \cdot 0,275 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}} \cdot 9,32 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot (1285 \text{ К} - 400 \text{ К})^2}{4 \cdot (1,807 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2})^2} = 0,183 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{кип} &= \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot (T_{кип} - T_{пл})^2 / (4 \cdot q_{он.а}^2) = \\ &= \frac{\pi \cdot 186 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}} \cdot 0,29 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}} \cdot 0,9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot (2485 \text{ К} - 1285 \text{ К})^2}{4 \cdot (1,807 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2})^2} = 0,168 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \end{aligned}$$

$$\tau_{пл} + \tau_{кип} = (0,183 + 0,168) \cdot 10^{-3} \text{ с} = 0,351 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

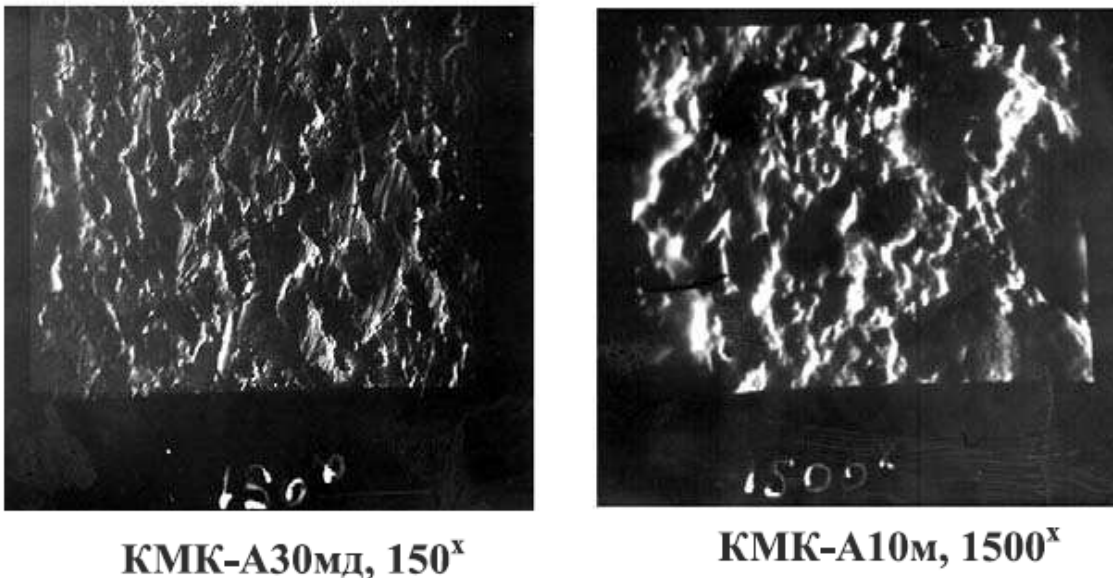
Следовательно, уже на начальном этапе размыкания серебросодержащих контактов за время горения дуги  $t_{\delta}=0,334 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  на площади опорного пятна на аноде  $S_{он.а}=0,14 \text{ см}^2$  под воздействием плотности мощности  $q_{он.а} = 1,807 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$  может образоваться расплав  $Ag$ , температура которого достигает температуры его кипения  $T_{кип}=2485 \text{ К}$ :

$$\tau_{пл} + \tau_{кип} = 0,351 \cdot 10^{-3} \text{ с} \sim 0,334 \cdot 10^{-3} \text{ с} = t_{\delta}.$$

Правильность расчётов подтверждают фотографии скоростной киносъёмки, приведённые на рис. 2.4, на которых видно стекание струи жидкого металла с подвижного контакта, являющегося анодом с 8 по 32 кадр в течение 4,0 мс.

### 2.3.2. Следы эрозии на сильноточных контактах

С целью построения модели короткой контрагированной дуги с дискретным ядром и теоретических методов расчёта её параметров обратимся к микроэлектронным фотографиям поверхности серебрясодержащих контактов после отключения токов КЗ. На рис. 2.13 приведены фотографии следов эрозии контактов КМК-А10м (состав: *Ag* – 85% и *CdO* – 15%) и КМК-А30мд (состав: *Ag* – 70% и *Ni* – 30%).



**Рис. 2.13. Вид поверхности серебрясодержащих контактов после отключения токов короткого замыкания: а –  $\times 150$ ; б –  $\times 1500$ .**

Структура поверхности контактов после отключения токов КЗ имеет хаотический вид со сложной топологией. Поверхность контактов испещрена многочисленными углублениями различного вида с поперечными размерами от 0,3 до 100 мкм. В ряде случаев поверхность контактов имеет вид «ручьев», шаг которых составляет (0,2÷0,3) мм и глубину (10÷80) мкм. Многочисленные макро- и микровыступы имеют заострённые вершины. В центральной части контактов имеется масса супермелких капелек с размерами от 0,3 до 1,0 мкм (рис. 2.14). На периферии контактов располагаются относительно крупные капли, диаметры которых достигают (0,2÷0,5) мм. Более детальный вид кратеров на поверхности контактов КМК-А10м после отключения токов КЗ показан на рис. 2.15. Диаметры кратеров на эродированной поверхности контактов КМК-А10м после отключения токов КЗ изменяются от 3,0 до 10 мкм. Внутренняя поверхность кратеров покрыта много-

### 2.3. Модель короткой... дуги с дискретным ядром

численными микроволнами. Брустверы и наплывы металла на краю кратеров отсутствуют.

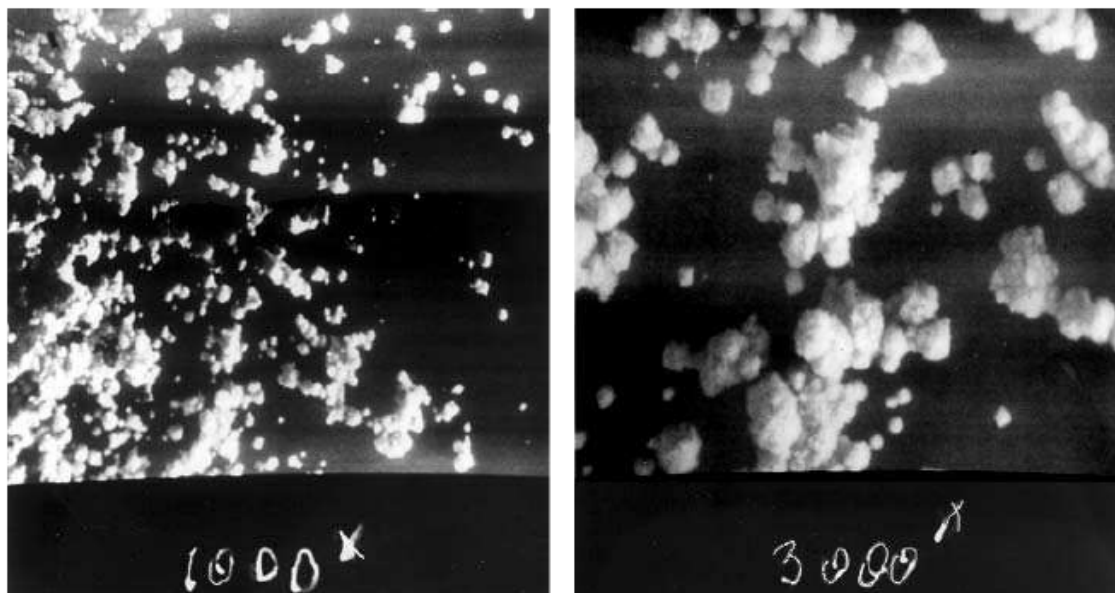


Рис. 2.14. Фрагменты поверхности контактов КМК-А30мд после отключения токов короткого замыкания, покрытых каплеобразными частицами: а –  $\times 1000$ ; б –  $\times 3000$ .

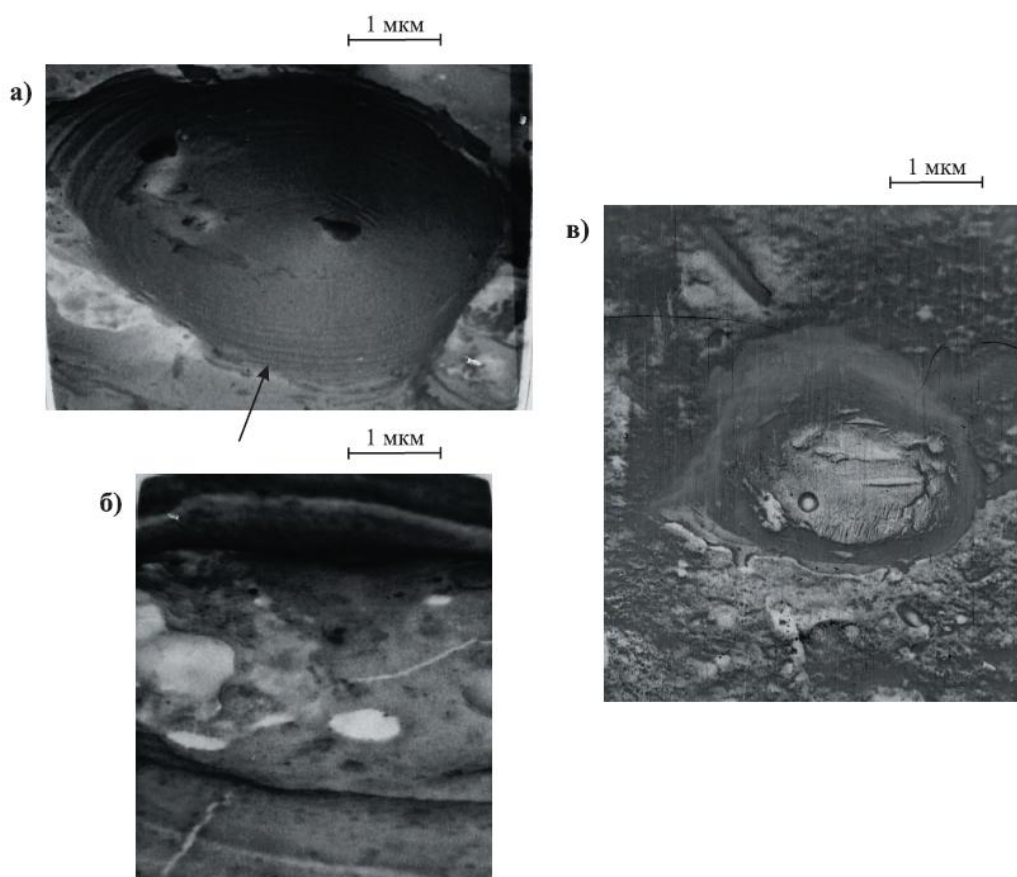


Рис. 2.15. Кратеры на поверхности контактов КМК-А10м после отключения токов КЗ.

Из анализа микроэлектронных фотографий, приведённых на рис. 2.13, 2.14 и 2.15, следует, что характерными особенностями следов эрозии на серебрясодержащих контактах после отключения токов КЗ низковольтными выключателями являются их сложный рельеф с многочисленными заострёнными микровыступами, глубокими впадинами и кратерами, внутренняя поверхность которых покрыта микроволнами, и наличие множества микрокапель.

Нам представляется, что кратеры на контактах низковольтных выключателей, при отключении токов КЗ, образуются в результате поверхностного пузырькового кипения тонкого слоя жидкого металла на опорных пятнах дуги, которое приводит к циклическому образованию многочисленных микропузырьков с последующим их взрывом. При взрыве микропузырьков происходит извержение микроструек плазмы и выброс микрокапель из металла контактов. Извержение микроструек плазмы сопровождается выделением порций электронов. Порцию электронов, выделяющуюся при взрывной их эмиссии в вакуумном дуговом разряде, академик Г.А. Месяц [2.8] назвал **эктоном** (от первых букв слов Explosive Centre – центр взрыва). Нам представляется уместным использовать понятие «эктон» в описании физических процессов в низковольтной дуге отключения большой мощности.

Каждая порция электронов и ионов проводит ток в отдельных микроструйках плазмы. Сумма токов всех одновременно функционирующих микроструек плазмы обеспечивают протекание тока дуги.

В пользу высказанного предположения могут служить материалы экспериментальных и теоретических исследований термомеханических механизмов фрагментации жидких капель при паровом взрыве [2.11, с. 491; 2.12, с. 100; 2.13, с. 913].

В указанных исследованиях нагретый до  $400\div 850^{\circ}\text{C}$  металлический стержень опускали в дистиллированную воду и наблюдали образование пузырьков пара, их взрывы и истечение струй пара, а также осциллографировали пульсации давления и звуковых колебаний при взрывном выбросе паровой струи. Исследования показали, что пульсация давления пара внутри пузырька и влияние поверхностного натяжения приводят к образованию коротких (капиллярных) волн (так называемой «ряби») на границе «жидкость-пар». Звуковой импульс, сопровождающий испускание струи пара воды, представляет собой «пакет» высокочастотных ( $\sim 3$  кГц) колебаний.

Частота волн на поверхности анодных опорных пятен дискретных струек плазмы диффузной дуги при отключении токов КЗ составляет  $\sim 10^4$  Гц [2.4, ч. I,



### 2.3. Модель короткой... дуги с дискретным ядром

---

с. 252]. Эта частота соответствует звуковому диапазону, воспринимаемому человеком.

Следовательно, наличие капиллярных микроволн на поверхности кратеров является подтверждением образования их в результате взрывного механизма разрушения микропузырьков и истечения из них струек пара.

Таким образом, при отключении токов КЗ низковольтными выключателями на их размыкаемых контактах возникает короткая контрагированная дуга с дискретным ядром, непрерывность прохождения тока в которой обеспечивают многочисленные эктоны, дискретные как в пространстве, так и во времени [2.8].

### 2.4. Протекание тока в короткой контрагированной дуге с дискретным ядром за счёт испарения металла контактов

Протекание тока в дуговом разряде большой мощности обеспечивают эмиссионные процессы разного вида. В [2.4, ч. I] показано, что в низковольтном дуговом разряде большой мощности термо- и автоэлектронные эмиссии обеспечить протекание тока не могут. В предыдущем параграфе показана возможность протекания тока в короткой контрагированной дуге с дискретным ядром большой мощности за счёт взрывной эмиссии электронов. Однако следует учитывать и тепловые процессы на опорных пятнах дуги, которые могут приводить к испарению металла контактов. В [2.9, приложение 3, с. 238] приведена скорость испарения  $Zn$ ,  $Cu$  и  $W$  в  $г/(см^2 \cdot с)$  в зависимости от плотности мощности  $q$ , приходящей на поверхность металла, в  $Вт/см^2$ .

В исследуемых выключателях, как уже указывалось, в качестве разрывных контактов применялись композиционные серебросодержащие металлокерамические материалы на основе  $Ni$  и  $W$ . В таких контактах в процессе горения дуги испарению будет подвергаться в основном  $Ag$ .

Согласно [2.5, с. 204] испарение вещества со свободной его поверхности в адиабатическом режиме определяется по формуле:

$$j_{исп} = \frac{q_{исп}}{W_{исп}},$$

## Глава 2. Форма и структура дугового разряда

где  $j_{исп}$  – плотность потока массы пара на поверхности испарения,  $г/(см^2 \cdot с)$ ;  $q_{исп}$  – плотность мощности, затрачиваемая на испарение,  $Вт/см^2$  и  $W_{исп}$  – удельная теплота испарения вещества  $Вт \cdot с/г$ .

За плотность мощности  $q_{исп}$ , затрачиваемой на испарение, примем плотность мощности, приходящая на опорное пятно катода  $q_{он.к}$  и анода –  $q_{он.а}$  (таблица 2.7). Удельная теплота испарения  $Ag$  при температуре его кипения:  $W_{исп}^{Ag} = 2,36 \cdot 10^3 Вт \cdot с/г$  (таблица 1.1).

Для примера рассчитаем плотность потока массы пара  $Ag$  и значение силы тока, протекающего в дуге за счёт испарения паров  $Ag$  с поверхности опорных пятен, на начальном этапе размыкания контактов, используя данные таблицы 2.7, соответствующие кадру 2 на рис. 2.4.

### Кадр 2.

Катод: плотность потока массы пара  $Ag$ :

$$j_{исп.к} = \frac{q_{он.к}}{W_{исп}^{Ag}} = \frac{2,57 \cdot 10^4 Вт/см^2}{2,36 \cdot 10^3 Вт \cdot с/г} = 10,89 г/(см^2 \cdot с).$$

Масса пара, испарившегося с поверхности опорного пятна на катоде площадью  $S_{он.к}$  за время киносъёмки одного кадра  $\Delta t = 0,167 \cdot 10^{-3} с$ :

$$\begin{aligned} m_{пар.к} &= j_{исп.к} \cdot S_{он.к} \cdot \Delta t = \\ &= 10,89 г/(см^2 \cdot с) \cdot 0,18 см^2 \cdot 0,167 \cdot 10^{-3} с = 0,327 \cdot 10^{-3} г. \end{aligned}$$

Количество атомов  $Ag$  в массе пара:

$$N_{0.к} = \frac{m_{пар.к}}{m_0} = \frac{0,327 \cdot 10^{-3} г}{179,1 \cdot 10^{-24} г} = 1,826 \cdot 10^{18},$$

где  $m_0 = 179,1 \cdot 10^{-24} г$  – масса атома  $Ag$ .

Анод: плотность потока массы пара  $Ag$ :

$$j_{исп.а} = \frac{q_{он.а}}{W_{исп}^{Ag}} = \frac{18,07 \cdot 10^4 Вт/см^2}{2,36 \cdot 10^3 Вт \cdot с/г} = 76,57 г/(см^2 \cdot с).$$

## 2.4. Протекание тока в ... дуге ... за счёт испарения ...

---

Масса пара, испарившегося с поверхности опорного пятна на аноде:

$$\begin{aligned} m_{\text{пар.а}} &= j_{\text{исп.а}} \cdot S_{\text{он.а}} \cdot \Delta t = \\ &= 76,57 \text{ э}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) \cdot 0,14 \text{ см}^2 \cdot 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 1,79 \cdot 10^{-3} \text{ э}. \end{aligned}$$

Количество атомов  $Ag$  в массе пара:

$$N_{0.а} = \frac{m_{\text{пар.а}}}{m_0} = \frac{1,79 \cdot 10^{-3} \text{ э}}{179,1 \cdot 10^{-24} \text{ э}} = 9,99 \cdot 10^{18}.$$

Общее количество атомов  $Ag$ , поступивших в канал дуги за счёт испарения с поверхности опорных пятен на катоде и аноде:

$$\sum N_o = N_{o.к} + N_{o.а} = (1,826 + 9,99) \cdot 10^{18} = 1,182 \cdot 10^{19}.$$

Согласно данным [2.4, таблица 4.21, с. 104] степень ионизации плазмы  $x_e$  в канале дуги, в рассматриваемом опыте, за время киносъёмки кадра 2 составляет  $\sim 1,0$ . Следовательно, количество электронов в массе испарившегося пара  $Ag$  в канале дуги равно количеству атомов, то есть:

$$\sum N_e = \sum N_o.$$

В таком случае электроны, имеющие заряд  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ , за время киносъёмки одного кадра переносят ток силой:

$$i_{\text{исп.д}} = \frac{e \cdot \sum N_e}{\Delta t} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1,182 \cdot 10^{19}}{0,167 \cdot 10^{-3} \text{ с}} = 11,32 \cdot 10^3 \text{ А}.$$

Среднее мгновенное значение тока за время киносъёмки кадра 2, согласно экспериментальным данным, составляет  $i_\delta = 13,0 \cdot 10^3 \text{ А}$ . Дефицит силы тока составляет:

$$\Delta i_\delta = i_\delta - i_{\text{исп.д}} = (13,0 - 11,32) \cdot 10^3 \text{ А} = 1680 \text{ А}.$$

В таблице 2.9 приведены результаты расчётов плотности потока массы паров и значения тока, протекающего в канале дуги за счёт испарения  $Ag$  с поверхности опорных пятен дуги при отключении тока в испытательном контуре  $16,0 \text{ кА}$  действующего значения, фазном напряжении  $420 \text{ В}$  и  $\cos \varphi = 0,2$ .

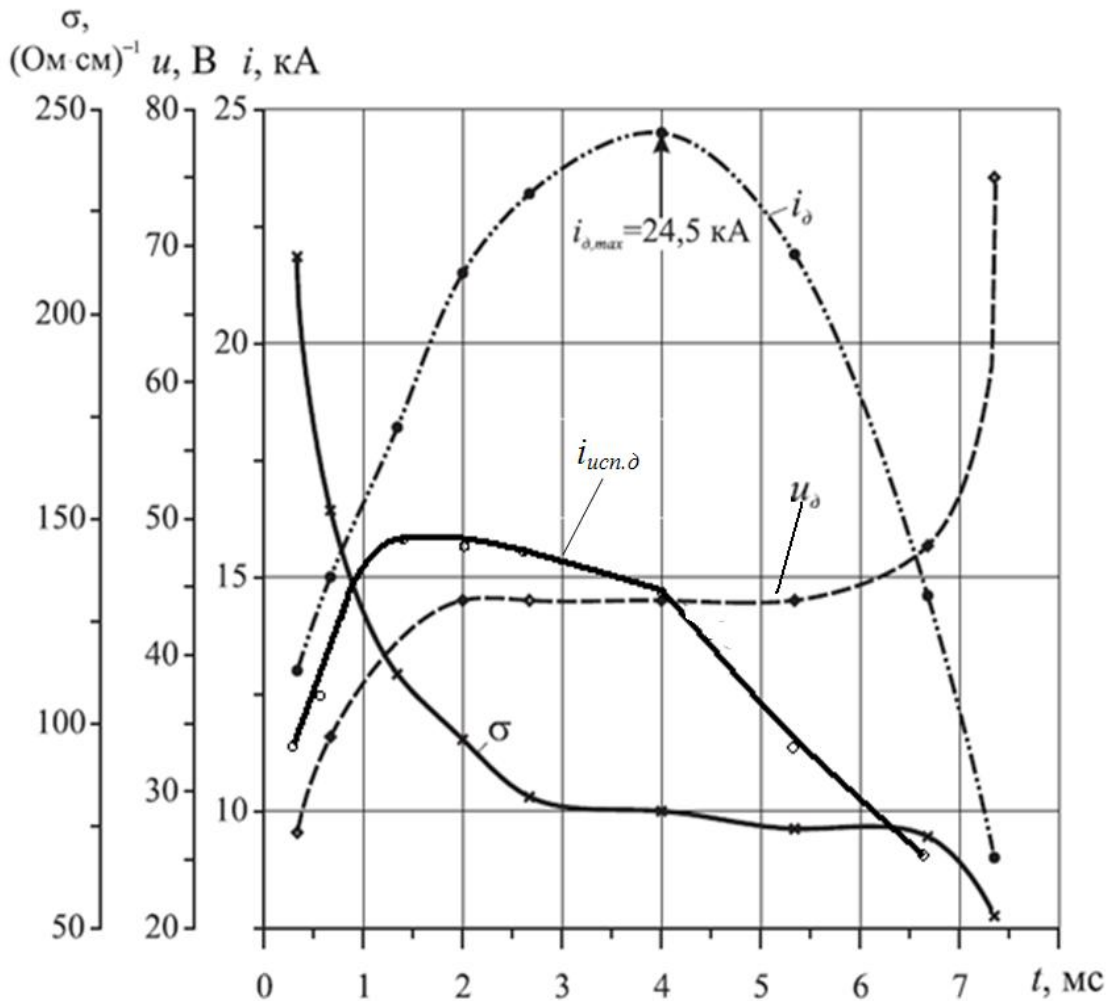
## Глава 2. Форма и структура дугового разряда

На рис. 2.16 приведены графики изменения тока  $i_{\delta}$  и тока  $i_{усл.\delta}$  в процессе горения дуги, построенные по данным таблицы 2.9.

**Таблица 2.9.** Плотность потока массы пара  $Ag$   $j_{\delta}$  и ток  $i_{\delta}$ , протекающий в канале дуги за счёт испарения, при отключении тока  $16,0$  кА,  $U_{\phi} = 420$  В и  $\cos \varphi = 0,2$ .

$t_{\delta}, мс$	0,334	0,668	1,34	2,0	2,67	4,0	5,34	6,68
$i_{\delta}, кА$	13,0	15,0	18,2	21,5	23,2	24,5	21,9	14,6
$x_e$	~1,0	~0,95	~0,88	0,78	0,67	0,57	0,54	0,55
$q_{он.к}, 10^4, Вм / см^2$	2,57	1,05	0,454	0,279	0,233	0,223	0,287	0,133
$j_{усл.к}, э / (см^2 \cdot с)$	10,89	4,45	1,924	1,182	0,997	0,945	0,792	0,564
$m_{нар.к}, 10^{-3} э$	0,327	0,379	0,542	0,582	0,668	0,75	0,648	0,332
$N_{0.к}, 10^{19}$	0,1826	0,212	0,2926	0,325	0,3727	0,4185	0,362	0,1856
$N_{е.к}, 10^{19}$	0,1826	0,2014	0,2575	0,2535	0,2497	0,239	0,195	0,102
$q_{он.а}, 10^4 Вм / см^2$	18,07	4,690	2,435	1,635	1,7	1,666	1,444	1,08
$j_{усл.а}, э / (см^2 \cdot с)$	76,57	19,87	10,32	6,93	7,203	7,060	6,12	4,58
$m_{нар.а}, 10^{-3}, э$	1,79	2,057	2,844	3,17	3,633	4,08	3,54	1,82
$N_{0.а}, 10^{19}$	0,999	1,15	1,588	1,77	2,028	2,28	2,974	1,016
$N_{е.а}, 10^{19}$	0,999	1,09	1,397	1,39	1,359	1,3	1,066	0,559
$\Sigma N_e = (N_{е.к} + N_{е.а}), 10^{19}$	1,1816	1,291	1,655	1,634	1,609	1,539	1,261	0,661
$i_{усл.\delta}, 10^3, А$	11,32	12,37	15,86	15,66	15,41	14,74	12,08	6,33
$\Delta i_{\delta} = i_{\delta} - i_{усл.\delta}, А$	1680	2630	2340	5840	7790	9760	9820	8270

## 2.5. Центры концентрации зарядов



**Рис. 2.10.** Ток дуги  $i_d$ , ток  $i_{\text{исп.}\delta}$  и удельная электропроводность плазмы на размыкаемых серебросодержащих контактах при отключении тока 16 кА.

Очевидно, дефицит тока должны восполнить эктоны, возникающие в результате взрывной эмиссии электронов.

## 2.5. Центры концентрации зарядов

Поверхность контактов в результате технологических процессов их производства приобретают неоднородный вид. Эродированная поверхность контактов, как было показано ранее, имеет весьма сложный рельеф. Более того, наличие капель на контактах усложняют её рельеф. Микронеровности на поверхности контактов можно представить в виде различных простых геометрических фигур [2.8]. В таком случае поверхность контактов можно изобразить как хаотически покрытую полусферическими кратерами, углублениями в виде конусов, микровыступами в виде полусфер, конусов с различными углами и радиусами закругления в их вершине и микрокаплями.

## Глава 2. Форма и структура дугового разряда

---

Микровыступы локально концентрируют на себя электрическое поле, в котором они находятся. Таким образом возникают центры концентрации зарядов и происходит локальное усиление средней напряжённости поля в межконтактном зазоре, которое определяется выражением:

$$E_{cp} = \frac{u_{\delta}}{\delta},$$

где  $u_{\delta}$  – напряжение дуги в  $B$  и  $\delta$  – раствор контактов в  $cm$ .

Микровыступы разной конфигурации усиливают поле в разной степени:

$$E_{\epsilon} = \beta_E \cdot E_{cp},$$

где  $E_{\epsilon}$  – локальная напряжённость поля на вершине микровыступа и  $\beta_E$  – коэффициент усиления поля.

В [2.8, с. 19] рассмотрено усиление поля на микровыступах, расположенных на поверхности электродов в условиях вакуума, имеющих вид геометрических фигур: эллипсоид, цилиндр со сферической вершиной, конус со сферической вершиной и сфера на тонком основании. На рис. 2.17 показаны графики изменения коэффициентов усиления поля  $\beta_E$  на микровыступах в зависимости от отношения их высоты  $h$  к радиусу закругления  $r_{\epsilon}$  вершины микровыступов [2.8, с. 20].

На рис. 2.18 схематически показаны конфигурации микровыступов на катоде в условиях вакуума для определения коэффициентов усиления поля  $\beta_E$  [2.8, с. 56].

На эродированной поверхности контактов низковольтных выключателей, работающих в условиях атмосферного воздуха, могут располагаться как микровыступы, показанные на рис. 2.18, так и микровыступы, схематически изображённые на рис. 2.19.

## 2.5. Центры концентрации зарядов

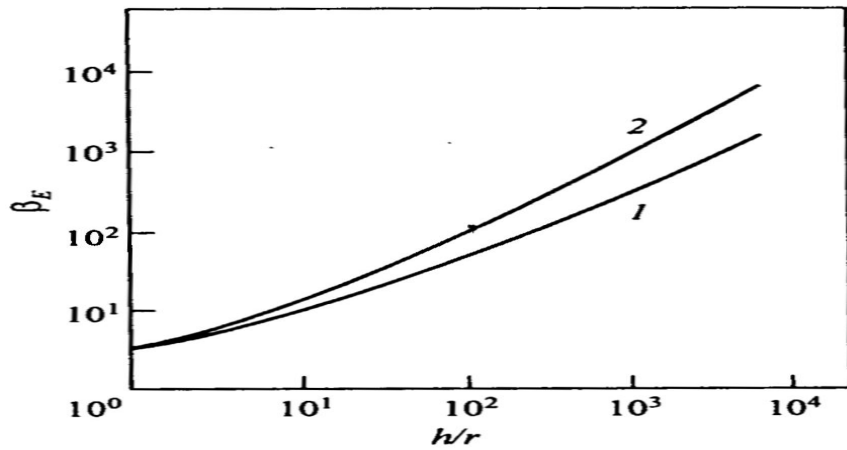


Рис. 2.17. Коэффициент усиления поля на микровыступе в зависимости от отношения высоты выступа к радиусу кончика: эллипсоидальная форма выступа (1); цилиндр со сферической вершиной, сфера на тонком основании (2).

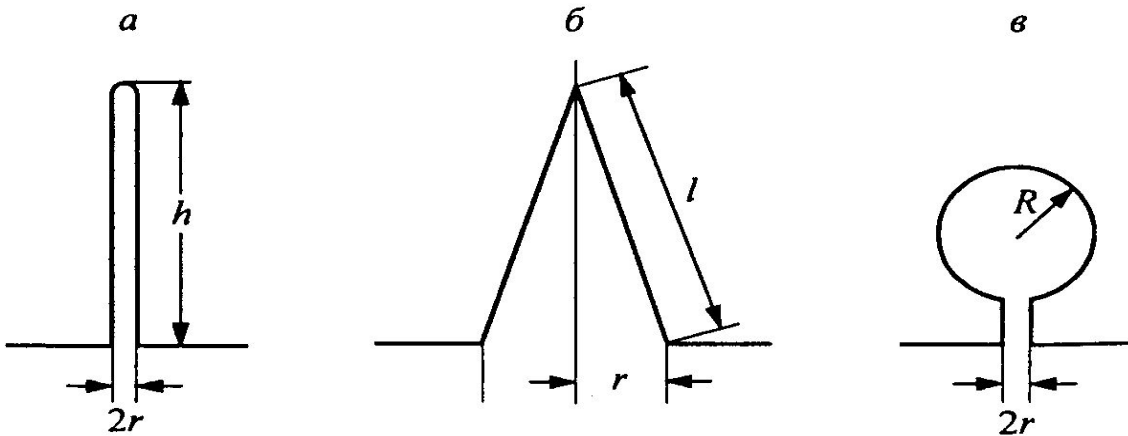


Рис. 2.18. Конфигурация неоднородностей на катоде для определения коэффициента поля  $\beta_E$  и плотности тока  $\beta_j$ : цилиндр (а); конус (б); сфера (в).

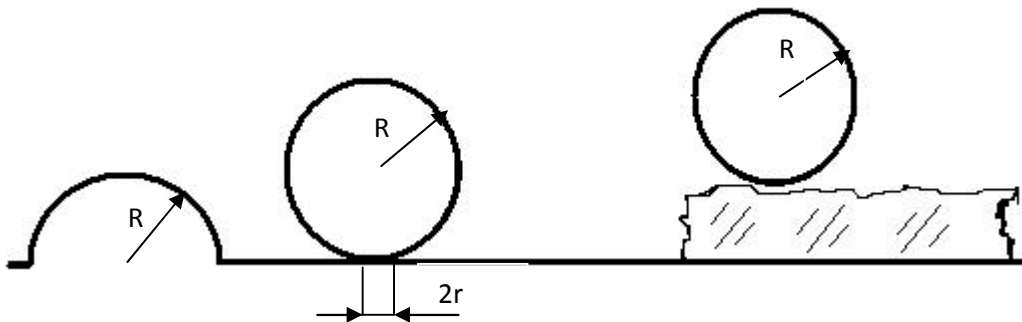
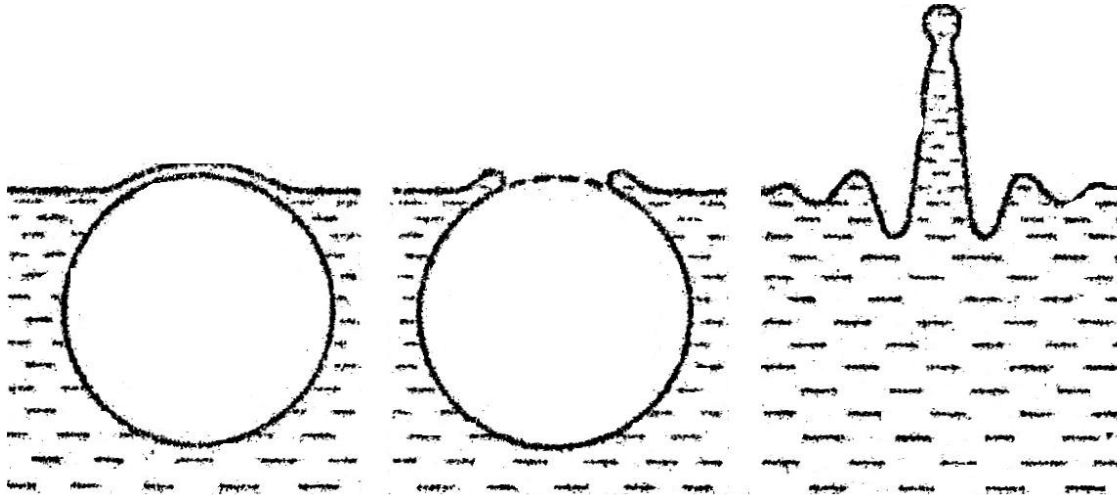


Рис. 2.19. Микровыступы в виде полусферы и капли на поверхности контактов.

В предыдущем параграфе было показано, что на опорных пятнах дуги может протекать поверхностное пузырьковое кипение расплава Ag. Образовавшиеся

в расплаве микропузырьки либо лопаются, либо взрываются. При их взрыве происходит разлёт микрокапель и возмущения в виде расходящихся волн. Затем микропузырьки схлопываются и на их месте возникают всплески жидкого металла в виде столбиков с микрокаплями на их вершинах и расходящиеся волны. Те микропузырьки, которые не взрываются, также схлопываются. Процесс схлопывания пузырька схематично показан на рис. 2.20 [2.15, с. 94].



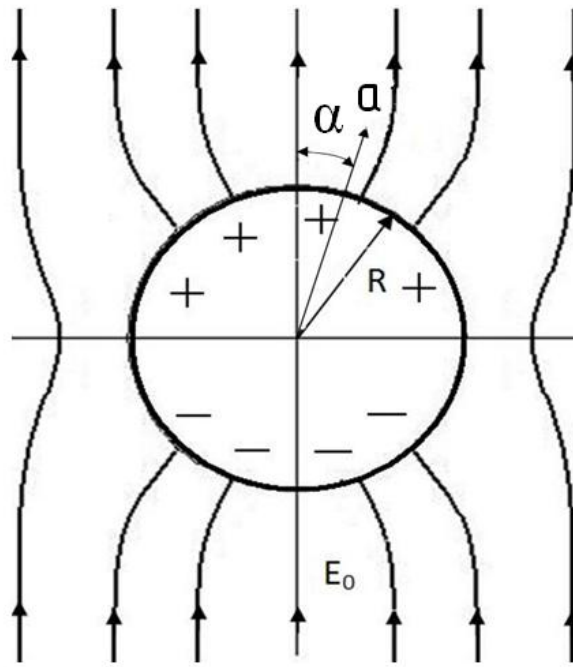
**Рис. 2.20. Лопнувший пузырёк на поверхности жидкости образует водяной столбик и круговую волну. Последовательные стадии процесса**

Подобные возмущения хорошо наблюдаются на рис. 3.31 (цветная вкладка) и рис. 3.32 на стр. 228, приведённых в [2.4, ч. I]. В точках пересечения расходящихся волн возникают всплески расплава с капельками на их вершинах. Всплески расплава в виде столбиков и конусов с малыми углами в их вершине и микрокаплями на опорных пятнах дуги становятся центрами концентрации зарядов, которые приводят к усилению поля.

Согласно классической теории электрического поля металлический шар, внесённый в однородное поле, приводит к его искажению (рис. 2.21).



## 2.5. Центры концентрации зарядов



**Рис. 2.21. Металлический шар в однородном электрическом поле.**

В сферической системе координат в точке наблюдения  $a$  напряжённость поля равна:

$$E_a = E_0 \left( \frac{2 \cdot R^3}{a^3} + 1 \right) \cos \alpha;$$

$$E_\alpha = E_0 \left( \frac{2 \cdot R^3}{a^3} + 1 \right) \sin \alpha.$$

Результирующее поле равно:

$$E = \sqrt{E_a^2 + E_\alpha^2}.$$

На поверхности шара, то есть при  $a=R$ , будем иметь:

- $E_a = 3E_0 \cos \alpha$  и  $E_\alpha = 3E_0 \sin \alpha$  ;
- при  $\alpha = 0^\circ$   $E_a = 3E_0 = E_{\max}$  и  $E_\alpha = 0$ .

Следовательно, коэффициент усиления поля в центре вершины шара составляет  $\beta_E = 3$ .

В [2.8, с. 20] приводятся формулы, определяющие значение коэффициентов

усиления поля на сферической вершине радиуса  $r_0$  :

- цилиндра –  $\beta_E = \frac{h}{r_0} + 2$ ;
- конуса –  $\beta_E = \frac{h}{2r_0} + 5$ ; при угле в вершине  $2\alpha = 5 \div 10^\circ$ .

Здесь  $h$  – высота цилиндра или конуса.

Коэффициенты усиления поля, рассчитанные по этим формулам, могут достигать значения 100 и более. Превышение значения  $\beta_E = 3$  можно объяснить тем, что напряжённость поля определяется выражением  $E_0 = -grad\varphi$ . То есть, чем больше расстояние между измеряемыми точками, тем больше и разность потенциалов. Фактически повышается численное значение напряжённости поля  $E_0$ , которое выражается через численное значение коэффициента  $\beta_E$ .

Поверхностная плотность индуцированного электрического заряда на сферической вершине микровыступа в общем виде равна:

$$\sigma = \beta_E \cdot \varepsilon_0 \cdot E_{cp} \cdot \cos \alpha,$$

где  $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  – электрическая постоянная, в системе измерения СИ ( $1 \text{ Ф/м} = 9 \cdot 10^9 \text{ СГС}$ ).

На поверхности шара поверхностная плотность заряда равна:

$$\sigma = 3 \cdot \varepsilon_0 \cdot E_0 \cdot \cos \alpha.$$

При:

$$\alpha = 0 \quad \sigma = 3\varepsilon_0 \cdot E_0;$$

$$\alpha = 90^\circ \quad \sigma = 0.$$

Количество индуцированного заряда в центре вершины на полусфере составляет:

$$q_s = 3\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot E_0 \cdot R^2.$$

## 2.5. Центры концентрации зарядов

В центре сферической вершины с радиусом  $r_6$  любого микровыступа на поверхности контактов заряд увеличивается до значения:

$$q_3 = \beta_E \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot E_{cp} \cdot r_6^2.$$

Таким образом, центр концентрации зарядов, образованного на микровыступе, приобретает заряд  $q_3$ , который превышает среднее значение заряда в межконтактном зазоре, переносимого током дуги, в  $\beta_E$  раз.

Поскольку заряд  $q$  равен произведению  $i \cdot t$ , то за одно и тоже время ток, протекающий через центр микровыступа, имеющий площадь в основании  $\pi \cdot r^2$ , увеличится в  $\beta_E$ . Следовательно, плотность мощности, приходящая на центр концентрации зарядов также увеличивается.

В [2.8, с. 56] плотность тока на микровыступе, расположенном на катоде, определяется по формуле:

$$j_u = j_{cp} \cdot \frac{S}{\pi \cdot r^2},$$

где  $S_u = 2\pi \cdot r \cdot h$  – площадь боковой поверхности цилиндра,  $S_k = \pi \cdot r \cdot l$  – площадь боковой поверхности конуса,  $S_c = 4\pi \cdot r^2$  – площадь поверхности сферы (см. рис. 2.18).

По данным таблицы 2.7 плотность мощности  $q_{on.k}$ , приходящая на опорное пятно дуги на катоде в первый момент времени размыкания контактов, равна  $2,57 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ . Ранее было показано что плотность мощности, равная  $2,57 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ , не может привести к оплавлению всей площади опорного пятна, равной  $0,18 \text{ см}^2$ .

Для примера определим усиление плотности тока на микровыступе в виде конуса с радиусом в основании, равным среднему радиусу кратера на катоде  $r_k = 10^{-4} \text{ см}$ , и углом в вершине  $2\alpha = 10^\circ$ . В таком случае плотность тока, протекающего через конус, увеличится в:

$$\beta_j = \frac{S_k}{\pi \cdot r_k^2} = \frac{\pi \cdot r_k \cdot l}{\pi \cdot r_k^2} = \frac{11,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}}{10^{-4} \text{ см}} = 11,5,$$

$$\text{где } l = \frac{r_k}{\sin \alpha} = \frac{10^{-4} \text{ см}}{\sin 5^\circ} = \frac{10^{-4} \text{ см}}{0,0872} = 11,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}.$$

Так как плотность тока, протекающего через конус увеличится в  $\beta_j = 11,5$  раз, то и плотность мощности, приходящая на конус также увеличится в  $\beta_j = 11,5$  раз по сравнению с плотностью мощности  $q_{\text{он.к}}$ , приходящей на катод. Например, на начальном этапе размыкания контактов плотность мощности на конусе будет равна:

$$q_k = \beta_j \cdot q_{\text{он.к}} = 11,5 \cdot 2,57 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2 = 2,96 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2.$$

Значение плотности мощности  $q_k = 2,96 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$  является средним значением. Максимальное значение плотности мощности может достигать при натекании на конус с радиусом закругления в вершине порядка десятков-сотен размеров атомов [2.8, с. 24]. Радиусы атомов *Ni*, *Fe*, *Cu*, *W* и *Ag* изменяются от  $1,24 \cdot 10^{-8} \text{ см}$  до  $1,44 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ . Для оценочных расчётов радиус закругления в вершине конуса примем равным  $r_g = 5 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ . В таком случае коэффициент усиления поля  $\beta_E$  составит:

$$\beta_E = \frac{h}{2r_g} + 5 = \frac{11,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ см}} + 5 = 119,$$

$$\text{где } h = \frac{r_k}{\text{tg}5^\circ} = \frac{10^{-4} \text{ см}}{0,0875} = 11,4 \cdot 10^{-4} \text{ см} \text{ – высота конуса.}$$

На эродированной поверхности контактов найдётся достаточно большое количество микровыступов в виде конусов с размерами, принятыми в примере. Плотность мощности на начальном этапе размыкания контактов на таких конусах, расположенных на катоде, достигнет значения:

$$q_{\text{ц.мах.к}} = \beta_E \cdot q_{\text{он.к}} = 119 \cdot 2,57 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2 = 3,06 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2.$$

Результат расчётов значений плотности мощности на центрах концентрации зарядов в процессе горения дуги на контактах при отключении тока КЗ, равного 16,0 кА приведены в таблице 2.10.

Очевидно, плотность мощности, равная  $3,06 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$  и менее, к взрывному разрушению микровыступов в виде конусов привести не может.

## 2.5. Центры концентрации зарядов

Для взрывного разрушения микровыступов металла контактов необходима плотность мощности не менее  $10^8 \text{ Вт} / \text{см}^2$ . Более того, плотность тока, протекающего через конус, равная

$$j_{ц} = j_{cp} \cdot \beta_j = 71,9 \cdot 10^3 \text{ А} / \text{см}^2 \cdot 11,5 = 8,27 \cdot 10^5 \text{ А} / \text{см}^2$$

также явно недостаточна для взрывного разрушения микровыступов на поверхности контактов низковольтного выключателя при отключении тока КЗ, равного  $16,0 \text{ кА}$ . Для взрывного разрушения проводника тока плотность тока должна быть не менее  $10^8 \text{ А} / \text{см}^2$ .

**Таблица 2.10. Значения  $q_{ц.маx.к}$ , набегающей на микровыступы на катоде в процессе размыкания контактов при отключении тока  $16,0 \text{ кА}$  и фазном напряжении  $420 \text{ В}$ .**

$t_{\partial}, \text{ мс}$	0,334	0,668	1,34	2,0	2,67	4,0	5,34	6,68
$i_{\partial}, \text{ кА}$	13,0	15,0	18,2	21,5	23,2	24,5	21,9	14,6
$q_{он.к}, 10^4 \text{ Вт} / \text{см}^2$	2,57	1,05	0,454	0,279	0,233	0,223	0,187	0,133
$q_{ц.маx.к}, 10^5 \text{ Вт} / \text{см}^2$	30,6	12,5	5,4	3,32	2,77	2,65	2,23	1,58

Однако капли, находящиеся на опорном пятне дуги, под воздействием плотности мощности  $q_{ц.маx.к} = 30,6 \cdot 10^5 \text{ Вт} / \text{см}^2$  и менее могут подвергаться взрывному разрушению в результате действия тепломеханических сил [2.11, 2.12 и 2.13]. При взрыве капли дробятся на мелкие части с минимальным критическим радиусом  $r_{к.кр}$ , который определяется для капель из  $\text{Ag}$  по формуле [2.4, ч. II, с. 81]:

$$r_{к.кр} \sim 122 \sqrt{\frac{1}{q_k}},$$

где  $q_k$  – плотность мощности, набегающая на каплю. Для примера определим  $r_{к.кр}$  для капель из  $\text{Ag}$  под воздействием наибольшей и наименьшей плотности мощности  $q_{ц.маx.к}$ , значения которых приведены в таблице 2.10:

$$r_{к.кр} \sim 122 \sqrt{\frac{1}{q_{ц.мах.к}}} = 122 \sqrt{\frac{1}{30,6 \cdot 10^{12} \text{ эрг}/(с \cdot см^2)}} = 0,22 \cdot 10^{-4} \text{ см};$$

$$r_{к.кр} \sim 122 \sqrt{\frac{1}{1,58 \cdot 10^{12} \text{ эрг}/(с \cdot см^2)}} = 0,97 \cdot 10^{-4} \text{ см}.$$

Полученные результаты расчётов  $r_{к.кр}$  достаточно хорошо совпадают с размерами капель, показанных на рис. 2.14, радиусы которых изменяются от  $0,15 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  до  $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ .

Приведенные значения  $r_{к.кр}$  означают, что капли *Ag* будут подвергаться разрушению только те, которые имеют радиус, не превышающий  $r_{к.кр}$  на два порядка.

У капель, радиус которых превышает верхний предел дробления, может произойти прорыв оболочки без их разрушения и истечение пара, приводящие к образованию пустотелых капель.

Каждый взрыв капли, находящейся в канале дуги, сопровождается выбросом ионизированной порции пара металла, которая содержит определённое количество электронов и ионов. Таким образом, взрывная эмиссия электронов, сопровождающая взрыв капель, повышает их концентрацию в канале дуги и, тем самым, способствует самоподдержанию её горения.

Приведенные расчёты термомеханического дробления капель при отключении токов КЗ низковольтными выключателями обосновывают закономерность наличия в дугогасительных камерах как микрокапель, так и крупных капель, в том числе и пустотелых.

## 2.6. Проведение тока эктонами в короткой контрагированной дуге с дискретным ядром

В предыдущих параграфах показаны два фундаментальных физических процесса, обеспечивающие протекание тока в короткой контрагированной дуге с дискретным ядром на размыкаемых контактах низковольтных выключателей: испарение материала контактов и взрывная эмиссия электронов на опорных пятнах дуги. В таблице 2.9 приведены значения силы тока, протекающего в дуге при отключении тока КЗ, равного 16,0 кА, за счёт испарения материала контактов  $i_{исп}$  и дефицита тока  $\Delta i_0$ , который, очевидно, должен быть восполнен за счёт взрывной эмиссии электронов.

Эктоны в низковольтной дуге отключения большой мощности могут возникать в результате взрывов микропузырьков, образующихся при поверхностном пузырьковом кипении расплава на опорном пятне.

Убедимся, что на опорном пятне как на катоде, так и на аноде при отключении тока, равного 16,0 кА, может возникать поверхностное пузырьковое кипение в тонком слое расплава.

### 2.6.1. Проведение тока эктонами на катоде

Ранее была показана невозможность образования расплава на всей площади катодного опорного пятна под воздействием плотности мощности  $q_{оп.к} = 2,57 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ . Однако из-за повышения плотности мощности  $q_{ц.мах}$  до значения набегающей на центры концентрации зарядов, которые достигают значение  $10^5 \text{ Вт/см}^2$  и более (см. таблицу 2.10), можно ожидать образование расплава металла на месте центров концентрации зарядов. Для примера определим время плавления  $\tau_{пл}$  Ag под воздействием плотности мощности  $q_{ц.мах.к} = 30,6 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2 = 30,6 \cdot 10^{12} \text{ эрг/(с} \cdot \text{см}^2)$ , а затем и время достижения расплавом температуры кипения:

$$\tau_{пл} = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot (T_{пл} - T_0)^2}{4 \cdot q_{ц.мах.к}^2} =$$

$$= \frac{\pi \cdot 379 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}} \cdot 0,275 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}} \cdot 9,32 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot (1285\text{К} - 400\text{К})^2}{4 \cdot (30,6 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2})^2} =$$

$$= 6,38 \cdot 10^{-7} \text{ с};$$

$$\tau_{\text{кип}} = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot (T_{\text{кип}} - T_{\text{пл}})^2}{4 \cdot q_{\text{ц.мах.к}}^2} =$$

$$= \frac{\pi \cdot 186 \cdot 10^5 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}} \cdot 0,29 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{г} \cdot \text{К}} \cdot 9,0 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot (2485\text{К} - 1285\text{К})^2}{4 \cdot (30,6 \cdot 10^{12} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^2})^2} =$$

$$= 5,86 \cdot 10^{-7} \text{ с};$$

$$\tau_{\text{пл}} + \tau_{\text{кип}} = (6,38 + 5,86) \cdot 10^{-7} \text{ с} = 12,24 \cdot 10^{-7} \text{ с}.$$

Действительно, под воздействием плотности мощности  $q_{\text{ц.мах.к}} = 30,6 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$  на месте микровыступа, расположенного на катодном опорном пятне, за время  $\tau_{\text{пл}} + \tau_{\text{кип}} = 12,24 \cdot 10^{-7} \text{ с}$  возникает расплав *Ag*, температура которого достигает температуры его кипения.

Время формирования кратеров, согласно [2.8, с. 354], определяется по формуле:

$$t_{\text{ц}} = \frac{r_{\text{к}}^2}{4 \cdot a},$$

где  $r_{\text{к}}$  – радиус кратера и  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Как и ранее для оценочных расчётов средний радиус кратеров на катоде примем равным  $10^{-4} \text{ см}$ . Тогда время формирования кратера на расплаве *Ag* будет равно:

$$t_{\text{ц}} = \frac{(10^{-4} \text{ см})^2}{4 \cdot 0,55 \text{ см}^2/\text{с}} = 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Время формирования кратера, которое можно принимать за время образования микропузырька, практически на три порядка меньше времени достижения расплавом температуры его кипения:



## 2.6. Проведение тока эктонами в... дуге с дискретным ядром

$$\tau_{nl} + \tau_{kup} = 1,224 \cdot 10^{-6} \text{ c} \gg 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ c}.$$

Более того, время достижения расплавом температуры кипения  $Ag$  намного меньше времени горения дуги на её начальном этапе:

$$\tau_{nl} + \tau_{kup} = 1,224 \cdot 10^{-6} \text{ c} \ll 0,334 \cdot 10^{-3} \text{ c} = t_{\phi}.$$

В процессе горения дуги на размыкаемых контактах плотность мощности  $q_{ц.мах.к}$ , приходящая на центры концентрации зарядов, снижается. Но, как показывают расчёты, время достижения расплавом  $Ag$  температуры его кипения, по-прежнему, не превышает время горения дуги. То есть, поверхностное пузырьковое кипение расплава на катодном опорном пятне дискретно и продолжается в течение всего времени нахождения дуги на контактах. В таком случае, в тонком слое кипящего расплава возникают микропузырьки, которые, взрываясь, извергают микроструйки плазмы и образуют кратеры.

На рис. 2.22 схематично показан пузырёк в тонком слое жидкого металла.

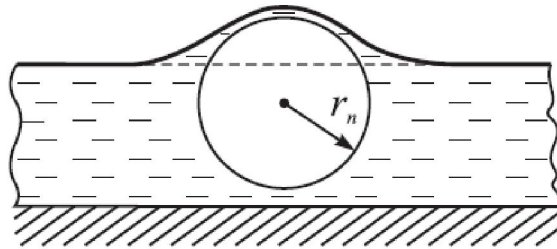


Рис. 2.22. Пузырёк в тонком слое жидкого металла.

Давление в пузырьке  $P_n$ , имеющем форму сферы, составляет давление среды  $P_{cp}$ , в которой он находится, и давление  $P_l$ , создаваемое силами поверхностного натяжения, называемое лапласовским [2.15, с. 21]:

$$P_n = P_{cp} + P_l = \frac{\mu_0 \cdot i_{\phi}^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot r_{on}^2} + \frac{4 \cdot \sigma}{r_n},$$

где  $P_{cp} = P_m$  – принимаем за электромагнитное давление на опорное пятно, возникающее в месте перехода тока из электрода в канал дуги [2.2, с. 22],  $i_{\phi}$  – ток дуги,  $r_{on}$  – радиус опорного пятна,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости и  $r_n$  – радиус пузырька.

Давление пара в микропузырьке, расположенном на катоде, в начальный момент размыкания контактов (таблица 2.1, кадр 2):

$$P_n = \frac{\mu_0 \cdot i_d^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot r_{он.к}^2} + \frac{4 \cdot \sigma}{r_n} = \frac{1,26 \cdot 10^{-6} \frac{Гн}{м} \cdot (13 \cdot 10^3 \text{ А})^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot (2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2} + \frac{4 \cdot 0,98 \frac{Н}{м}}{1 \cdot 10^{-6} \text{ м}} =$$

$$= 0,469 \cdot 10^6 \text{ Па} + 3,92 \cdot 10^6 \text{ Па} = 4,39 \cdot 10^6 \text{ Па} = 43,9 \cdot 10^6 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}.$$

Пар в микропузырьке находится в состоянии насыщения. По данным [2.7] расчётное значение температуры насыщения пара  $Ag$  при давлении  $43,9 \cdot 10^6 \text{ дин/см}^2$  составляет  $\sim 3510 \text{ К}$ . Приняв пар в микропузырьке за идеальный газ, определим в нём концентрацию атомов  $Ag$   $n_0$ , которая оказывается равной:

$$n_0 = \frac{P_n}{k \cdot T_{нас}} = \frac{43,9 \cdot 10^6 \text{ дин/см}^2}{1,38 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/К} \cdot 3510 \text{ К}} = 9,06 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3},$$

где  $k$  – постоянная Больцмана.

Степень ионизации пара  $Ag$  в микропузырьке при температуре  $T_{нас}=3510 \text{ К}$  и давлении  $P_n=4,39 \cdot 10^6 \text{ Па}$ , рассчитанная по уравнению Саха [2.4, ч. I, с. 96], составляет  $x_e=1 \cdot 10^{-7}$ . Концентрация электронов в микропузырьке, возникшем на катоде в момент времени размыкания контактов, в таком случае, составляет:

$$n_e = n_0 \cdot x_e = 9,06 \cdot 10^{19} \cdot 1 \cdot 10^{-7} = 9,06 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}.$$

Количество первичных электронов в микропузырьке, имеющем объём  $V_n$ , равно:

$$N_e = n_e \cdot V_n = 9,06 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (10^{-4})^3 \text{ см}^3 = 38,$$

где  $r_n=10^{-4} \text{ см}$  – средний радиус микропузырька на катоде.

При взрыве микропузырька под давлением  $P_n=4,39 \cdot 10^6 \text{ Па}$  ( $44,3 \text{ атм}$ ) первичные электроны в катодной зоне под воздействием катодного эффективного потенциала  $U_{эф.к}=5,25 \text{ В}$  приобретают скорость [2.4, ч. II, с. 46]:

$$v_e = 0,593 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{U_{эф.к}} = 0,593 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{5,25 \text{ В}} = 1,36 \cdot 10^8 \text{ см/с}.$$

## 2.6. Проведение тока эктонами в... дуге с дискретным ядром

Скорость электронов  $1,36 \cdot 10^8$  см/с практически равна скорости  $1,63 \cdot 10^8$  см/с, которая вызывает ионизацию атомов Ag при однократном неупругом взаимном их соударении, и приводит к лавинообразной ионизации паров Ag в микропузырьке [2.4, ч. I, с.130]. Таким образом, степень ионизации паров Ag в микропузырьке приобретает более высокое значение.

Примем в первом приближении степень ионизации паров Ag в микропузырьках на катоде, возникающих за время киносъёмки кадра 2, равной  $x_e=0,18$ . Концентрация электронов, в таком случае, составит:

$$n_e = n_0 \cdot \frac{x_e}{1 + x_e} = 9,06 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot \frac{0,18}{1 + 0,18} = 1,38 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

Оценим плотность тока, протекающего в микропузырьке, которая оказывается равной:

$$\begin{aligned} j_{\text{эк}} &= 3,34 \cdot 10^{-10} \cdot e \cdot n_e \cdot v_e = \\ &= 3,34 \cdot 10^{-10} \cdot 4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 1,38 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot 1,36 \cdot 10^8 \text{ см/с} = \\ &= 3,0 \cdot 10^8 \frac{A}{\text{см}^2}. \end{aligned}$$

Среднее значение тока эктона, протекающего в микропузырьке на катоде за время киносъёмки кадра 2, составляет:

$$i_{\text{эк}} = j_{\text{эк}} \cdot S_{\text{к.к}} = 3,0 \cdot 10^8 \frac{A}{\text{см}^2} \cdot 3,14 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 = 9,4 A,$$

где  $S_{\text{к.к}} = \pi \cdot r_{\text{к}}^2 = \pi \cdot (10^{-4} \text{ см})^2 = 3,14 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$  – среднее значение площади кратера на катоде.

Так как

$$i_{\text{эк}} = \frac{q_{\text{зар}}}{t_{\text{эк}}},$$

где  $q_{\text{зар}}$  – заряд переносимый током эктона, то отсюда можно определить время функционирования эктона:

$$t_{\text{эк}} = \frac{q_{\text{зар}}}{i_{\text{эк}}} = \frac{e \cdot N_{\text{е.эк}}}{i_{\text{эк}}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 5,8 \cdot 10^7}{9,4 \text{ А}} = 9,8 \cdot 10^{-13} \text{ с.}$$

Здесь  $N_{\text{е.эк}} = n_e \cdot V_n = 1,38 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (10^{-4} \text{ см})^3 = 5,8 \cdot 10^7$  количество электронов в эктоне.

Среднее время цикла функционирования кратера и эктона на катоде составляет:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{к}} + t_{\text{эк}} = 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ с} + 9,8 \cdot 10^{-13} \text{ с} \simeq 4,51 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Количество циклов, повторяющихся последовательно друг за другом за время киносъёмки одного кадра равного  $\Delta t = 0,167 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  будет равно:

$$n_{\text{ц}} = \frac{\Delta t}{t_{\text{ц}}} = \frac{0,167 \cdot 10^{-3} \text{ с}}{4,51 \cdot 10^{-9} \text{ с}} = 3,7 \cdot 10^4.$$

Количество кратеров, возникающих на катоде одновременно за время цикла, на начальном этапе размыкания контактов, соответствующим киносъёмке кадра 2, равно:

$$n_{\text{к}} = \frac{\Delta i_{\text{д}}}{i_{\text{эк}}} = \frac{1680 \text{ А}}{9,4 \text{ А}} \simeq 180,$$

где  $\Delta i_{\text{д}} = 1680 \text{ А}$  – дефицит тока (таблица 2.9).

Количество эктонов, обеспечивающих протекание дефицита тока  $\Delta i_{\text{д}}$  на катоде за время киносъёмки кадра 2, составляет:

$$\Delta N_{\text{эк.к}} = n_{\text{к}} \cdot n_{\text{ц}} = 180 \cdot 3,7 \cdot 10^4 = 6,66 \cdot 10^6.$$

Результаты расчётов количества эктонов на катодном опорном пятне дуги в процессе её горения на серебросодержащих контактах при отключении тока, равного  $16,0 \text{ кА}$ , при фазном напряжении  $420 \text{ В}$  и  $\cos \varphi = 0,2$  приведены в таблице 2.11. Приведённые в таблице 2.11 значения тока дуги  $i_{\text{д}}$  взяты из таблицы 2.1, дефицита тока  $\Delta i_{\text{д}}$  – из таблицы 2.9.

## 2.6. Проведение тока эктонами в... дуге с дискретным ядром

Таблица 2.11. Значения силы тока эктона  $i_{\text{ЭК}}$  и количество эктонов  $\Delta N_{\text{ЭК.К}}$  на катодном опорном пятне дуги при отключении тока КЗ, равного 16,0 кА, и фазном напряжении 420 В и  $\cos\varphi=0,2$ .

$t_{\text{д}}, \text{мс}$	0,334	0,668	1,34	2,0	2,67	4,2	5,34	6,68
$i_{\text{д}}, \text{кА}$	13,0	15,0	18,2	21,5	23,2	24,5	21,9	14,6
$P_{\text{м}}, 10^6, \text{дин/см}^2$	4,69	2,19	1,02	0,78	0,67	0,63	0,49	0,3
$P_{\text{л}}, 10^6, \text{дин/см}^2$	39,2							
$P_{\text{н}}, 10^6, \text{дин/см}^2$	43,9	41,4	40,2	40	39,9	39,8	39,7	39,5
$T_{\text{нас}}, \text{К}$	3510	3500	3495	3493	3492	3490	3490	3488
$n_0, 10^{19}, \text{см}^{-3}$	9,06	8,57	8,3	8,29	8,28	8,26	8,24	8,21
$x_e$	0,18	0,183	0,185	0,185	0,185	0,185	0,187	0,187
$n_e, 10^{19}, \text{см}^{-3}$	1,38	1,326	1,296	1,294	1,293	1,289	1,298	1,293
$j_{\text{ЭК}}, 10^8, \text{А/см}^2$	3,0	2,89	2,825	2,821	2,819	2,81	2,83	2,819
$i_{\text{ЭК}}, \text{А}$	9,4	9,07	8,87	8,86	8,85	8,82	8,89	8,85
$n_{\text{к}} = \Delta i_{\text{д}} / i_{\text{ЭК}}$	180	290	264	659	880	1106	1105	934
$\Delta N_{\text{ЭК.К}} = n_{\text{к}} \cdot n_{\text{ц}}, 10^6$	6,66	10,73	9,77	24,38	32,56	40,22	40,88	34,56
$\Sigma \Delta N_{\text{ЭК.К}}(t_{\text{д}})$	$1,117 \cdot 10^9$							

Общее количество эктонов на катоде, обеспечивающих протекание тока дуги в рассматриваемом опыте, за время нахождения её на серебрясодержащих контактах по результату численного интегрирования функции  $\Delta N_{\text{ЭК.К}}(t_{\text{д}})$  составило:

$$\Sigma \Delta N_{\text{ЭК}}(t_{\text{д}}) = 1,177 \cdot 10^9.$$

### 2.6.2. Проведение тока эктонами на аноде.

Физический механизм протекания тока дугового разряда на аноде существенно отличается от физического механизма протекания тока на катоде. Электроны, образовавшиеся на катоде в результате как испарения материала контактов, так и взрывной эмиссии устремляются к аноду. Ионы, выделившиеся на катоде, возвращаются и бомбардируют его поверхность. Ионы, таким образом, способствуют самоподдержанию эмиссионных процессов на катоде.

На аноде так же, как и на катоде, протекают процессы испарения и поверхностного пузырькового кипения материала контактов. Выделившиеся ионы на аноде частично переносятся на катод, дополнительно его подогревая, а частично выносятся конвективными потоками плазмы за пределы межконтактной зоны. Эмиттированные электроны с анода частично рекомбинируют с ионами, а частично возвращаются и бомбардируют поверхность анода. В результате более интенсивной бомбардировки электронами анода, чем ионами катода, на аноде выделяется больше тепла, чем на катоде. Поэтому на аноде тепловые процессы протекают бурно и кратеры, образующиеся в результате поверхностного пузырькового кипения, имеют большие размеры, чем на катоде.

Ранее было показано, что плотность мощности, набегаящая на анод, приводит к оплавлению всей площади опорного пятна, расплав которого может достигать температуры кипения материала контактов. В процессе бурного кипения расплава на его поверхности могут образовываться всплески жидкого металла разной высоты, на вершине которых под действием сил поверхностного натяжения будут образовываться капли. По данным, приведённым в [2.8, с. 20], коэффициент усиления поля на сфере радиусом  $R$  на тонком основании высотой  $h$  определяется по формуле:

$$\beta_E = \frac{h}{R} + 2.$$

Если для оценочных расчётов принять за радиус капли  $R$  минимальное его значение, которое имеют капли, показанные на рис. 2.13, и  $h=5 \cdot 10^{-4}$  см, то коэффициент усиления поля будет равен:

$$\beta_E = \frac{5 \cdot 10^{-4} \text{ см}}{0,15 \cdot 10^{-4} \text{ см}} + 2 = 35.$$

Заметим, что коэффициент усиления поля равным 35 может быть и при других значениях  $h$  и  $R$ . Например:  $h=7 \cdot 10^{-4}$  см и  $R=0,2 \cdot 10^{-4}$  см,  $h=10 \cdot 10^{-4}$  см и  $R=0,3 \cdot 10^{-4}$  см. То есть, вполне вероятно, что коэффициент усиления поля на аноде может иметь значение  $\beta_E=35$ .

Следовательно, на начальном этапе размыкания контактов на центрах концентрации зарядов, расположенных на аноде, плотность мощности может достигать значения:

## 2.6. Проведение тока эктонами в... дуге с дискретным ядром

$$q_{ц.мах.а} = \beta_E \cdot q_{он.а} = 35 \cdot 18,07 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2 = 6,32 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2,$$

где  $q_{он.а} = 18,07 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$  – таблица 2.7.

Значение плотности мощности  $q_{ц.мах.а}$  превосходит значение  $q_{ц.мах.к}$ :

$$q_{ц.мах.а} = 6,32 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2 > 3,06 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2 = q_{ц.мах.к},$$

где  $q_{ц.мах.к} = 3,06 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$  – таблица 2.10.

Расчётные значения плотности мощности  $q_{ц.мах.а}$ , набегающей на центры концентрации зарядов, находящиеся на аноде, в процессе горения дуги на размыкаемых контактах при отключении тока, равного 16,0 кА, и фазном напряжении 420 В приведены в таблице 2.12.

Расплав Ag на анодном опорном пятне под воздействием плотности мощности  $q_{ц.мах.а} = 3,24 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$  и более по результатам предыдущих расчётов заведомо будет достигать температуры кипения.

Под воздействием плотности мощности на аноде  $q_{ц.мах.а}$ , имеющей большее значение, чем  $q_{ц.мах.к}$  на катоде, микропузырьки и, следовательно, кратеры в слое расплава Ag на аноде будут приобретать большие размеры, чем на катоде. Ранее для оценочных расчётов за средний диаметр кратеров на аноде было принято его значение:  $d_{а.ср} = 7,0 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ .

**Таблица 2.12. Значения  $q_{ц.мах.а}$ , набегающей на микровыступы на аноде, в процессе размыкания контактов при отключении тока 16,0 кА.**

$t_D, \text{ мс}$	0,334	0,668	1,34	2,0	2,67	4,0	5,34	6,68
$i_D, \text{ кА}$	13,0	15,0	18,2	21,5	23,2	24,5	21,9	14,6
$q_{он.а}, 10^4, \text{ Вт/см}^2$	18,07	4,69	2,435	1,635	1,70	1,666	1,444	1,080
$q_{ц.мах.а}, 10^5, \text{ Вт/см}^2$	63,2	16,42	8,52	5,42	5,95	5,83	5,05	3,24

Давление в микропузырьке на аноде на начальном этапе размыкания контактов равно:

$$\begin{aligned}
 P_n &= P_m + P_l = \frac{\mu_0 \cdot i_d^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot r_{on.a}^2} + \frac{4 \cdot \sigma}{r_{n.a.sp}} = \\
 &= \frac{1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} \cdot (13 \cdot 10^3 \text{ А})^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot (2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2} + \frac{4 \cdot 0,98 \cdot \text{Н/м}}{3,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = \\
 &= 0,61 \cdot 10^6 \text{ Па} + 1,12 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1,73 \cdot 10^6 \text{ Па} = 17,3 \cdot 10^6 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}.
 \end{aligned}$$

Температура насыщения пара  $Ag$  в микропузырьке при давлении  $17,3 \cdot 10^6 \text{ дин/см}^2$  составляет  $T_{нас}=3200 \text{ К}$ .

Концентрация атомов  $Ag$   $n_0$  в микропузырьке равно:

$$n_0 = \frac{P_n}{k \cdot T_{нас}} = \frac{17,3 \cdot 10^6 \text{ дин/см}^2}{1,38 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/К} \cdot 3200 \text{ К}} = 3,92 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

В микропузырьке на аноде так же, как на катоде, находится некоторое количество свободных электронов. При взрыве микропузырька под воздействием анодного эффективного потенциала электроны приобретают скорость:

$$v_e = 0,593 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{U_{эф.а}} = 0,593 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{12,25 \text{ В}} = 2,08 \cdot 10^8 \frac{\text{см}}{\text{с}}.$$

Скорость электронов, равная  $2,08 \cdot 10^8 \text{ см/с}$ , более чем достаточна для ионизации  $Ag$  при однократном их неупругом соударении. Поэтому пары  $Ag$  в микропузырьке при его взрыве подвергаются лавинообразной ионизации.

Примем в первом приближении степень ионизации паров  $Ag$  в микропузырьке на аноде на начальном этапе размыкания контактов (кадр 2) равной  $x_e=0,138$ .

Концентрация электронов в микропузырьке составит:

$$n_e = n_0 \cdot \frac{x_e}{1 + x_e} = 3,92 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot \frac{0,138}{1 + 0,138} = 0,475 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

Плотность тока в микропузырьке, в таком случае, оказывается равной:

$$j_{эк} = 3,34 \cdot 10^{-10} \cdot e \cdot n_e \cdot v_e =$$



## 2.6. Проведение тока эктонами в... дуге с дискретным ядром

$$= 3,34 \cdot 10^{-10} \cdot 4,8 \cdot 10^{-10} \cdot 0,475 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot 2,08 \cdot 10^8 \frac{\text{см}}{\text{с}} =$$

$$= 1,584 \cdot 10^8 \text{ А/см}^2.$$

Ток эктона, протекающего в микропузырьке на аноде со средней площадью  $S_{к.а}$ , равен:

$$i_{\text{эк}} = j_{\text{эк}} \cdot S_{к.а} = 1,584 \cdot 10^8 \frac{\text{А}}{\text{см}^2} \cdot 38,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 = 61 \text{ А},$$

где  $S_{к.а} = \pi \cdot r_{к.а}^2 = \pi \cdot (3,5 \cdot 10^{-4} \text{ см})^2 = 38,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$ .

Время функционирования эктона на аноде:

$$t_{\text{эк}} = \frac{q_{\text{зар}}}{i_{\text{эк}}} = \frac{e \cdot N_{e.\text{эк}}}{i_{\text{эк}}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 8,526 \cdot 10^8}{61 \text{ А}} = 2,236 \cdot 10^{-12} \text{ с},$$

где  $N_{e.\text{эк}} = V_n \cdot n_e = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{к.а}^3 \cdot n_e = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (3,5 \cdot 10^{-4} \text{ см})^3 \cdot 0,475 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} =$

$$= 8,526 \cdot 10^8 \text{ – количество электронов эктона.}$$

Время формирования кратера:

$$t_{\text{к}} = \frac{r_{к.а}^2}{4 \cdot a} = \frac{(3,5 \cdot 10^{-4} \text{ см})^2}{4 \cdot 0,55 \text{ см}^2/\text{с}} = 5,57 \cdot 10^{-8} \text{ с}.$$

Здесь  $a=0,55 \text{ см}^2/\text{с}$  – коэффициент температуропроводности жидкого *Ag*.

Среднее время цикла функционирования кратера и эктона на аноде составляет:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{к}} + t_{\text{эк}} = 5,57 \cdot 10^{-8} \text{ с} + 2,23 \cdot 10^{-12} \text{ с} \approx 5,57 \cdot 10^{-8} \text{ с}.$$

Количество циклов, повторяющихся последовательно друг за другом за время киносъёмки одного кадра, равное  $\Delta t=0,167 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , равно:

$$n_{\text{ц}} = \frac{\Delta t}{t_{\text{ц}}} = \frac{0,167 \cdot 10^{-3} \text{ с}}{5,57 \cdot 10^{-8} \text{ с}} = 3 \cdot 10^3.$$

Количество кратеров, возникающих одновременно за время цикла, на начальной стадии размыкания контактов, соответствующей киносъёмке кадра 2, равно:

$$n_k = \frac{\Delta i_\partial}{i_{\text{ЭК}}} = \frac{1680 \text{ A}}{61 \text{ A}} = 28,$$

где  $\Delta i_\partial$  – дефицит тока (таблица 2.9).

Количество эктонов, обеспечивающих протекание дефицита тока  $\Delta i_\partial$  на аноде за время киносъёмки кадра 2, составляет:

$$\Delta N_{\text{ЭК.а}} = n_k \cdot n_\psi = 28 \cdot 3 \cdot 10^3 = 8,4 \cdot 10^4.$$

**Таблица 2.13.** Значения силы тока эктона  $i_{\text{ЭК.а}}$  и количество эктонов  $N_{\text{ЭК.а}}$  на анодном опорном пятне дуги при отключении тока КЗ равного 16,0 кА и фазном напряжении 420 В и  $\cos\varphi=0,2$ .

$t_\partial, \text{мс}$	0,334	0,668	1,34	2,0	2,67	4,2	5,34	6,68
$i_\partial, \text{кА}$	13,0	15,0	18,2	21,5	23,2	24,5	21,9	14,6
$P_m, 10^6 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$	6,1	1,8	1,0	0,8	0,9	0,9	0,7	0,5
$P_l, 10^6 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$	11,2							
$P_n, 10^6 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$	17,3	13,0	12,2	12,0	12,1	12,1	11,9	11,7
$T_{\text{нас}}, \text{К}$	3200	3120	3100	3100	3100	3100	3090	3080
$n_0, 10^{19}, \text{см}^{-3}$	3,92	3,02	2,86	2,85	2,85	2,85	2,83	2,75
$x_e$	0,138	0,155	0,16	0,158	0,155	0,155	0,153	0,155
$n_e, 10^{19}, \text{см}^{-3}$	0,475	0,405	0,394	0,389	0,382	0,382	0,375	0,369
$j_{\text{ЭК}}, 10^8, \text{А/см}^2$	1,584	1,35	1,314	1,297	1,274	1,274	1,251	1,231
$i_{\text{ЭК.а}}, \text{А}$	61	52	50,6	49,9	49	49	48,2	47,4
$n_k = \Delta i_\partial / i_{\text{ЭК.а}}$	28	51	46	117	159	199	204	174
$\Delta N_{\text{ЭК.к}} = n_k \cdot n_\psi \cdot 10^4$	8,4	15,3	13,8	35,1	47,7	59,7	61,2	52,2
$\Sigma \Delta N_{\text{ЭК.а}}(t_\partial)$	$1,378 \cdot 10^7$							

## 2.7. Микроплазмоиды на опорных пятнах дуги

---

Результаты расчётов количества эктонов на анодном опорном пятне дуги в процессе её горения на серебрясодержащих контактах при отключении тока КЗ, равного  $16,0 \text{ кА}$ , при фазном напряжении  $420 \text{ В}$  и  $\cos\varphi=0,2$  приведены в таблице 2.13. Приведённые в таблице 2.13 значения тока дуги  $i_\delta$  взяты из таблицы 2.1, дефицита тока  $\Delta i_\delta$  – из таблицы 2.9.

Общее количество эктонов, обеспечивающих протекание тока дуги на аноде за время её нахождения на серебрясодержащих контактах при отключении тока КЗ, равного  $16,0 \text{ кА}$ , фазном напряжении  $420 \text{ В}$  и  $\cos\varphi=0,2$  по результату численного интегрирования функции  $\Delta N_{\text{эк.а}}(t_\delta)$  составило:

$$\Sigma \Delta N_{\text{эк.а}}(t_\delta) = 1,378 \cdot 10^7.$$

## 2.7. Микроплазмоиды на опорных пятнах дуги

При взрыве микропузырька подразумевается, что микроструйка плазмы, извергающаяся из него, имеет некоторую протяжённость. Время существования микроструйки плазмы равно времени функционирования эктона  $t_{\text{эк}}$ . При отключении тока КЗ, равного  $16,0 \text{ кА}$ , время функционирования эктона, например, на катоде составляет  $t_{\text{эк}} = 9,8 \cdot 10^{-13} \text{ с}$ . Электроны в прикатодной зоне, имеющие скорость  $v_e = 1,36 \cdot 10^8 \text{ см/с}$ , пролетают от устья взорвавшегося микропузырька расстояние:

$$l_e = v_e \cdot t_{\text{эк}} = 1,36 \cdot 10^8 \text{ см/с} \cdot 9,8 \cdot 10^{-13} \text{ с} = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ см}.$$

Общая протяжённость микроструйки электронов составляет:

$$l_{e.к} = d_{n.к} + l_e = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см} + 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 3,33 \cdot 10^{-4} \text{ см},$$

где  $d_{n.к} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  – среднее значение диаметра микропузырька на катоде. Ионы в микропузырьке не покидают его объём и возвращаются в катод. Нейтральные пары  $\text{Ag}$  под воздействием давления в микропузырьке  $P_n$  приобретают скорость  $v_{\text{нар}} = 7,35 \cdot 10^4 \text{ см/с}$ . За время существования эктона пары  $\text{Ag}$  могут пролететь расстояние:

$$l_{\text{нар}} = v_{\text{нар}} \cdot t_{\text{эк}} = 7,35 \cdot 10^4 \text{ см/с} \cdot 9,8 \cdot 10^{-13} \text{ с} = 7,2 \cdot 10^{-8} \text{ см}.$$

То есть пары  $Ag$  за время функционирования эктона на катоде не успевают покинуть объём взрывающегося микропузырька.

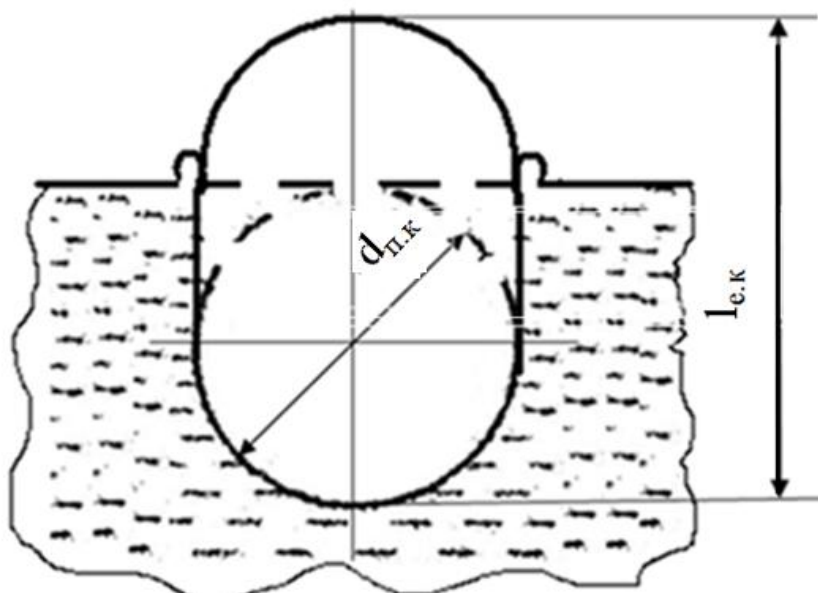
Приведённые результаты расчётов протяжённости микроструйки плазмы, извергающейся из взорвавшегося микропузырька, приводят к выводу, что она представляет собой сгусток плазмы ограниченного объёма в виде эллипсоида, который можно назвать **микроплазмоидом**. Схематическое изображение микроплазмоида в кипящем слое расплава на катоде показано на рис. 2.23.

Ионы вылетают из взорвавшегося микропузырька на аноде со скоростью [2.4, ч. II, с. 45]:

$$v_i = 0,134 \cdot 10^6 \sqrt{U_{эф.а}} = 0,134 \cdot 10^6 \sqrt{12,25 B} = 0,469 \cdot 10^6 \text{ см / с.}$$

За время функционирования эктона на аноде  $t_{э\kappa} = 2,2 \cdot 10^{-12} \text{ с}$  ионы от устья взорвавшегося микропузырька пролетят расстояние:

$$l_i = v_i \cdot t_{э\kappa} = 0,469 \cdot 10^6 \text{ см / с} \cdot 2,2 \cdot 10^{-12} \text{ с} = 1,03 \cdot 10^{-6} \text{ см.}$$



**Рис 2.23.** Схематическое изображение микроплазмоида в кипящем слое расплава  $Ag$  на катоде.

То есть ионы за время функционирования эктона на аноде практически не успевают покинуть объём микропузырька. Электроны не покидают объём микропузырька и возвращаются на анод. Следовательно, микроструйку плазмы в микропузырьке на аноде можно представить в виде микроплазмоида сферической

## 2.7. Микроплазмойды на опорных пятнах дуги

формы с размером, равным диаметру микропузырька (см. рис. 2.24):

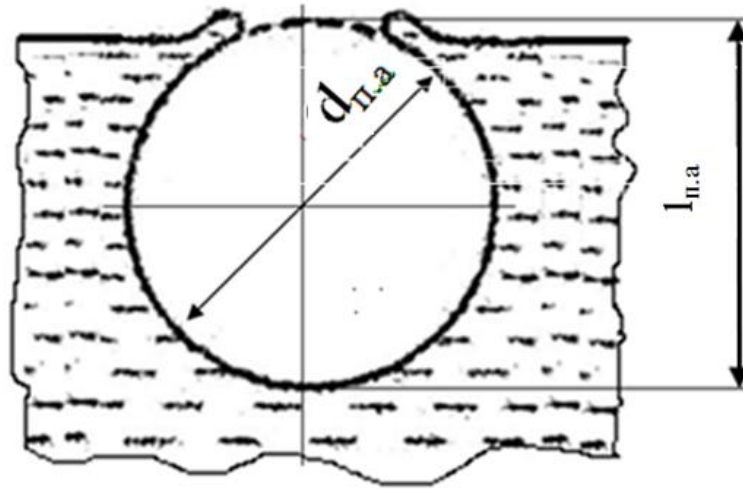


Рис.2.24. Схематическое изображение микроплазмойда в кипящем слое расплава Ag на аноде.

$$l_{п.а} = d_{п.а} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$$

Оценим теплофизические параметры микроплазмойдов. Плотность мощности, приходящая на дно кратеров на катоде и аноде, определяется по формулам:

$$q_{мп.к} = \frac{\eta_k \cdot i_{эк.к} \cdot U_{эф.к}}{S_{к.к}}; q_{мп.а} = \frac{\eta_a \cdot i_{эк.а} \cdot U_{эф.а}}{S_{к.а}}$$

Значения  $\eta_k$  и  $\eta_a$  приведены в таблице 2.7,  $i_{эк.к}$  — в таблице 2.11,  $i_{эк.а}$  — в таблице 2.13,  $U_{эф.к} = 5,25 \text{ В}$ ,  $U_{эф.а} = 12,25 \text{ В}$ ,  $S_{к.к} = 3,14 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$ ,  $S_{к.а} = 38,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$ .

Результаты расчётов  $q_{мп.к}$  и  $q_{мп.а}$  приведены в таблице 2.14.

**Таблица 2.14.** Значения  $q_{мн.к}$  и  $q_{мн.а}$  в процессе горения дуги на размыкаемых серебросодержащих контактах при отключении тока КЗ, равного 16,0 кА, при фазном напряжении 420 В и  $\cos \varphi = 0,2$ .

$t_{\delta}, мс$	0,334	0,668	1,34	2,0	2,67	4,0	5,34	6,68
$i_{\delta}, кА$	13,0	15,0	18,2	21,5	23,2	24,5	21,9	14,6
$q_{мн.к}, 10^8, \frac{Вт}{см^2}$	3,02	2,33	2,16	1,76	1,76	1,75	1,77	1,61
$q_{мн.а}, 10^8, \frac{Вт}{см^2}$	8,81	5,96	5,47	4,41	4,33	4,35	4,26	3,85

Электромагнитное давление, сжимающее микроплазмойды на катоде и аноде в результате протекания токов эктонов, можно определить по формулам:

$$P_{мн.к} = 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot i_{эк.к} \cdot j_{эк.к}, атм;$$

$$P_{мн.а} = 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot i_{эк.а} \cdot j_{эк.а}, атм.$$

Здесь  $i_{эк.к}$  в А и  $j_{эк.к}$  в А/см<sup>2</sup> приведены в таблице 2.11 и  $i_{эк.а}$  в А и  $j_{эк.а}$  в А/см<sup>2</sup> приведены в таблице 2.13. Результаты расчётов  $P_{мн.к}$  и  $P_{мн.а}$  приведены в таблице 2.15.

На рис. 2.25 схематически изображён кратер, подобный показанным на микроэлектронных фотографиях, приведённых на рис. 2.15. Энергия микроплазмойда, находящегося в таком кратере, будет рассеиваться через внутреннюю его поверхность, образующуюся жидким металлом, и открытую, соприкасающуюся с плазмой канала дуги. Очевидно, количество рассеиваемой энергии через внутреннюю и открытую поверхности кратера будет пропорционально их площадям. Следовательно, коэффициент потерь энергии микроплазмойдом можно выразить через геометрический коэффициент, определяющий отношение площади, через которую рассеивается энергия, к полной площади кратера. Например, геометрический коэффициент потерь энергии, определяющий долю энергии микроплазмойда, поглощаемую расплавом через внутреннюю поверхность кратера, равен:

$$\eta_2 = \frac{S_{\kappa} / 2 + S_{\psi.б}}{S_{\kappa} / 2 + S_{\psi.б} + S_{\psi}} = \frac{4\pi \cdot r^2 / 2 + 2\pi \cdot r \cdot r}{4\pi \cdot r^2 / 2 + 2\pi \cdot r \cdot r + \pi \cdot r^2} = \frac{4}{5} = 0,8,$$

## 2.7. Микроплазмоиды на опорных пятнах дуги

где  $S_{\kappa} / 2$  – площадь нижней полусферы кратера,  $S_{\kappa, \delta}$  – боковая площадь цилиндра, образующая верхнюю часть кратера и  $S_{\kappa}$  – площадь открытой поверхности кратера (цилиндра).

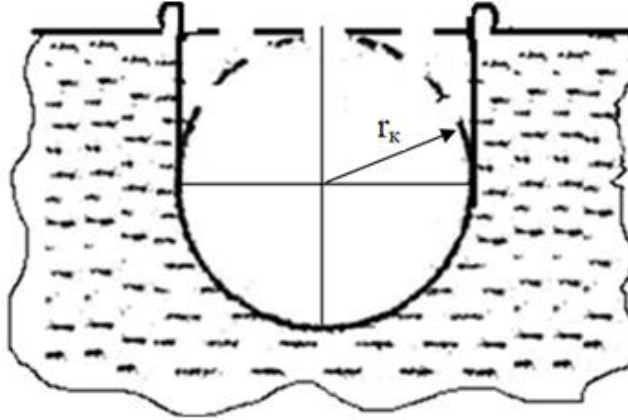


Рис. 2.25. Схематическое изображение кратера.

То есть 80% энергии микроплазмоида будет поглощаться расплавом через внутреннюю поверхность кратера. В таком случае, мощность микроплазмоида, которая будет рассеиваться в объём канала дуги, будет определяться формулой:

$$\Delta P_{\text{м.п}} = (1 - \eta_{\text{г}}) \cdot i_{\text{эк}} \cdot U_{\text{эф}}.$$

Если эффективная температура плазмы микроплазмоида окажется достаточно высокой, то его мощность будет рассеиваться в канал дуги в основном путём излучения. Исходя из такого представления, определим эффективную температуру плазмы микроплазмоида по формуле [2.4, ч. I, с.277]:

$$T_{\text{эф}} = 447 \left( \frac{(1 - \eta_{\text{г}}) \cdot i_{\text{эк}} \cdot U_{\text{эф}}}{\beta \cdot r_{\kappa} \cdot l_{\text{мп}}} \right)^{1/4}.$$

На начальном этапе размыкания контактов (кадр 2), например, эффективная температура плазмы микроплазмоида на катоде составит:

$$T_{эф} = 447 \left( \frac{(1-\eta_c) \cdot i_{эк.к} \cdot U_{эф.к}}{\beta \cdot r_{к.к} \cdot l_{е.к}} \right)^{1/4} =$$

$$= 447 \left( \frac{(1-0,8) \cdot 9,4 \text{ А} \cdot 5,25 \text{ В}}{0,6 \cdot 10^{-4} \text{ см} \cdot 3,33 \cdot 10^{-4} \text{ см}} \right)^{1/4} = 66450 \text{ К}.$$

Действительно, эффективная температура плазмы микроплазмоида оказывается очень высокой, что позволяет принимать рассеивание его энергии в объём канала дуги только излучением.

Степень ионизации  $x_e$  плазмы микроплазмоида на катоде при давлении  $P_{мт.к}$ , создаваемого током эктона, и эффективной температуре определим с помощью уравнения Саха:

$$\lg \frac{P_{мт.к} x_e^2}{1-x_e^2} = \lg \frac{g_e g_u}{g_a} + 2,5 \cdot \lg T_{эф} - \frac{5040 \cdot U_u}{T_{эф}} - 6,5.$$

Численное значение отношения квантовых статистических весов электрона, иона и атома для паров  $Ag$  равен:

$$\frac{g_e \cdot g_u}{g_a} = a^2 = 1.$$

Потенциал ионизации  $Ag$   $U_i = 7,54 \text{ В}$  [2.4, ч. I, с. 327]. Подставим численные значения  $P_{мт.к}$  и  $T_{эф}$  в уравнение Саха, соответствующие их значения для катода при киносъёмке кадра 2:

$$\lg \frac{27,58 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot x_e^2}{1-x_e^2} = 2,5 \lg 66450 \text{ К} - \frac{5040 \cdot 7,54 \text{ В}}{66450 \text{ К}} - 6,5.$$

После численного решения последнего выражения получим степень ионизации плазмы микроплазмоида на катоде равным  $x_e = 0,183$ . Сравнивая полученное значение  $x_e$  со значением, принятым в первом приближении и приведённым в таблице 2.11, видим, что они достаточно хорошо совпадают для практических инженерных расчётов:

$$x_e = 0,18 \simeq 0,183 = x_e.$$



## 2.7. Микроплазмоиды на опорных пятнах дуги

Отсюда можно сделать заключение, что концентрация электронов  $n_e$  в микроплазмоиде, плотность тока  $j_{эк}$  и ток эктона  $i_{эк}$ , приведённые в таблице 2.11, рассчитаны достаточно точно для инженерной практики.

В таблице 2.15 приведены результаты расчётов давления, создаваемого токами эктонов, температуры и степени ионизации плазмы в микроплазмоидах на катоде и аноде при отключении тока КЗ, равного 16,0 кА.

**Таблица 2.15. Значения  $P_{мп.к}$ ,  $P_{мп.а}$ ,  $T_{эф.мп.к}$ ,  $T_{эф.мп.а}$  и степени ионизации плазмы микроплазмоидов при отключении тока КЗ равного 16,0 кА при фазном напряжении 420 В и  $\cos \varphi = 0,2$ .**

$t_{\partial}, мс$	0,334	0,668	1,34	2,0	2,67	4,0	5,34	6,68
$i_{\partial}, кА$	13,0	15,0	18,2	21,5	23,2	24,5	21,9	14,6
$P_{мп.к}, 10^5, Па$	27,58	26,21	25,06	25,0	25,86	24,79	25,15	24,95
$T_{эф.мп.к}, К$	66450	66030	65660	65650	65200	65570	65700	65630
$x_{e.мп.к}$	0,183	0,185	0,188	0,188	0,187	0,189	0,189	0,188
$P_{мп.а}, 10^5, Па$	96,6	70,2	66,47	64,72	62,43	62,43	60,3	58,35
$T_{эф.мп.а}, К$	79860	76730	76210	75950	75600	75600	75290	74980
$x_{e.мп.а}$	0,139	0,152	0,157	0,155	0,156	0,156	0,158	0,159

Обратим внимание на то, что по данным таблиц 2.11, 2.13 и 2.15 параметры микроплазмоидов  $j_{эк}$ ,  $i_{эк}$ ,  $P_{мп}$ ,  $T_{эф.мп}$  на катоде и аноде значительно отличаются друг от друга. Вместе с тем в процессе горения дуги на контактах, как на катоде, так и на аноде, изменяются незначительно и практически не зависят от изменения тока дуги  $i_{\partial}$ .

Однако количество микроплазмоидов, образующихся в процессе горения дуги на контактах, существенно зависит от изменения тока дуги. Количество микроплазмоидов, образующихся на катоде, превосходит их количество на аноде на два порядка:

$$\sum \Delta N_{эк.к}(t_{\partial}) = 1,177 \cdot 10^9 \gg 1,38 \cdot 10^7 = \sum \Delta N_{эк.а}(t_{\partial}).$$

Учитывая геометрическую конфигурацию микроплазмоидов, можно при-

нять их за точечные источники, излучающие энергию в объём канала дуги.

Энергия электрической сети поступает в дуговой разряд через центры концентрации зарядов, расположенных на его опорных пятнах. Под воздействием усиленной плотности мощности, приходящей на центры концентрации зарядов, на их месте возникают микропузырьки, многократно перемежающиеся по опорным пятнам. При взрыве микропузырьков образуются микроплазмиды, излучающие частично свою энергию в объём канала дугового разряда. Энергия дугового разряда частично рассеивается в окружающую среду и частично приходит на опорные пятна. Под воздействием плотности мощности, приходящей на опорные пятна, с их поверхности происходит испарение металла контактов. Испарившиеся пары металла контактов поступают в объём канала дугового разряда, в котором они подвергаются термической ионизации. Вместе с тем пары металла приводят к некоторому охлаждению плазмы в объёме канала дугового разряда. Ионизированные пары металла обеспечивают протекание части тока дугового разряда. Протекание остальной части тока обеспечивают эктоны в микроплазмоидах, возникающие при взрыве микропузырьков.

В результате протекания электро- и теплофизических процессов на размыкаемых контактах при отключении токов КЗ низковольтными выключателями происходит их эрозия. Количество эродированной массы контактов составляет масса пара, испарившегося металла контактов с поверхности опорных пятен и масса пара и капелек металла контактов, образующихся при взрыве микропузырьков.

### Выводы к главе 2

2.1. Форма и структура дугового разряда непосредственно связана с формой и структурой его следов на опорных пятнах.

2.2. Рассмотрены две модели низковольтной дуги отключения большой мощности:

- упрощённая каналовая модель короткой контрагированной дуги со сплошным ядром;
- модель короткой контрагированной дуги большой мощности с дискретным ядром.

2.3. Качественные и количественные оценки обеих моделей существенно отличаются друг от друга. Основные положения, принятые при теоретическом рассмотрении моделей, являются:

2.3.1. для упрощённой каналовой модели дуги со сплошным ядром:

- приэлектродные падения напряжения  $U_k$  и  $U_a$ ;
- средние значения плотности мощности, приходящей на всю площадь опорного пятна, равны для катода и анода.

2.3.2. Для дуги с дискретным ядром:

- приэлектродные эффективные потенциалы  $U_{эф.к}$  и  $U_{эф.а}$ ;
- дискретные плотности мощности на центрах концентрации зарядов, находящихся на опорных пятнах, как на катоде, так и аноде имеют свои значения.

2.4. Форму и структуру дугового разряда, состав его плазмы и подвижность определяет его геометрическая характеристика:

$$S_{бок} / (S_{он.к} + S_{он.а}) = l_d / r_{он} \leq 1,0.$$

2.5. Следы дуги большой мощности на опорных пятнах имеют хаотический вид со сложным рельефом. Микровыступы можно представлять в виде простых геометрических фигур: столбиков, конусов и капель сферической формы.

2.6. Столбики, конусы и сферы искажают электрическое поле и тем самым на их вершинах образуются центры концентрации зарядов.

2.7. В результате усиления плотности мощности на месте центров концентрации зарядов образуется слой кипящего расплава металла и микропузырьки. При взрыве микропузырьков возникают микроплазмойды, в которых протекают токи эктонов.

2.8. Микропузырьки, образовавшиеся в тонком слое расплава, после завершения функционирования микроплазмойдов схлопываются. На их месте возникают всплески жидкого металла в виде столбиков с микрокаплями на их вершинах и расходящиеся волны возмущения. Столбики с микрокаплями на их вершинах становятся новыми центрами концентрации зарядов, и цикл функционирования микроплазмойдов возобновляется.

2.9. Параметры микроплазматических разрядов  $j_{эк}$ ,  $i_{эк}$ ,  $q_{мп}$ ,  $P_{мп}$  и  $T_{эф}$  на катоде и аноде значительно отличаются друг от друга. Количества микроплазматических разрядов на катоде и аноде отличаются друг от друга на два порядка и значительно зависят от значения силы тока дуги. Параметры микроплазматических разрядов в процессе горения дуги изменяются незначительно и практически не зависят от изменения тока дуги.

2.10. Энергия электрической сети поступает в дуговой разряд через центры концентрации зарядов, на месте которых образуются микроплазматические разряды, многократно перемежающиеся по всей площади опорных пятен. Энергия микроплазматических разрядов, большая часть которой поглощается расплавом, частично излучается в объём канала дугового разряда. Энергия дугового разряда частично рассеивается в окружающую среду, а частично поглощается расплавом на опорном пятне. С поверхности опорного пятна под воздействием плотности мощности  $q_{оп}$  происходит испарение металла контактов. Испарившиеся пары металла, попадая в канал дугового разряда, подвергаются термической ионизации.

2.11. Проведение тока в короткой контрагированной дуге с дискретным ядром обеспечивают два фундаментальных физических процесса, протекающих на опорных пятнах:

- испарение металла контактов с их поверхности;
- взрывная эмиссия электронов.

2.12. Энергия дуги, возникающая на размыкаемых контактах и находящаяся на них в неподвижном положении, рассеивается:

- излучением от 16 до 40%;
- конвективными потоками плазмы до 40%;
- поглощается телом контактов от 40 до 60%.

### Список литературы к главе 2

2.1 *Брон, О. Б.* Электрическая дуга в аппаратах управления / О. Б. Брон. – М.; Л.: ГЭИ, 1954.

2.2 *Брон, О. Б.* Потоки плазмы в электрической дуге включающих аппаратов / О. Б. Брон, Л. К. Сушков. – Л.: Энергия, 1975.

2.3 *Лесков, Г. И.* Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970.

2.4 *Мещеряков, В. П.* Электрическая дуга большой мощности в выключателях / В. П. Мещеряков. – Ульяновск; часть I, 2006; часть II, 2008.

2.5 Теплотехнический справочник. Т. 2. – М.: Энергия, 1976.

2.6 *Полежаев, Ю. В.* Тепловая защита / Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич. – М.: Энергия, 1976.

2.7 *Герасимов, Я. И.* Химическая термодинамика в цветной металлургии. Справочное руководство в 8 т. Т.2. Термодинамика меди, свинца, олова, серебра и их важнейших соединений / Я. И. Герасимов, А. Н. Крестовников, А. С. Шахов. – М.: Металлургиздат, 1961.

2.8 *Месяц, Г. А.* Электроны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга / Г. А. Месяц. – М.: Наука, 2000.

2.9 *Буткевич, Г. В.* Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов / Г. В. Буткевич, Г. С. Белкин, Н. А. Ведешенков, М. А. Жаворонков. – М.: Энергия, 1978.

2.10 *Daalder, J. E.* Energy dissipation in the cathode of a vacuum arc / J. E. Daalder. – J. Phys. D: Appl. Phys. – Vol. 10. 1977.

2.11 Термодинамический механизм тонкой фрагментации жидких капель при паровом взрыве / *Ю. А. Зейгарник, Ю. П. Ивочкин, Е. З. Король* // Теплофизика высоких температур. 2004. – Том 42. – №3. – С. 491-492.

2.12 Поведение паровой плёнки на сильно перегретой поверхности, погружённой в недогретую воду / *В. С. Григорьев, В. Г. Жилин, Ю. А. Зейгарник, Ю. П. Ивочкин, В. В. Глазков, О. А. Синкевич* // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Том 43. – № 1. – С. 100-114.

2.13 Об одном возможном механизме инициирования (триггеринга) парового взрыва / *В. В. Глазков, В. С. Григорьев, В. Г. Жилин, Ю. А. Зейгарник, Ю. П. Ивочкин, К. Г. Кубриков, Н. В. Медвецкая, А. А. Оксман, О. А. Синкевич* // Теплофизика высоких температур. – 2006. – Том 44. – № 6. – С. 913-917.

2.14 Электроэрозионная обработка металлов / М. К. Мицкевич, А. И. Бушик, И. А. Бакуто, В. А. Шилов, И. Г. Девойно. – Минск: Наука и техника, 1988.

2.15 *Гегузин, Я. Е.* Пузыри / Я. Е. Гегузин. – М.: Наука, 1985.

2.16 *Базаров, Ю. Б.* Разработка методики визуализации течения около всплывающего в воде воздушного пузыря / *Ю. Б. Базаров, А. С. Долотов, В. Ю. Игнатьев, Е. Е. Мешков, А. Сладков* // РФЯЦ-ВНИИЭФ, Лицей №15, СарФТИ.

## Глава 3

### Взрывная эрозия сильноточных контактов и электродов

Исследованию эрозионного поражения контактов и электродов в различных условиях эксперимента посвящено огромное количество работ. Работ по исследованию эрозии сильноточных контактов и электродов проведено ограниченное количество [3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 и др.].

Обзор теоретических и экспериментальных работ по эрозии контактов и построению методик её количественного учёта показывает, что поведение электрической дуги на размыкаемых контактах, а, следовательно, и их эрозионное поражение, весьма разнообразно, зависит от многих факторов и в каждом случае имеет свои особенности. Все исследования можно разделить по способу возбуждения дуги, величине тока, величине напряжения, длительности протекания тока, виду дугогасящей среды, материалу контактов, конструкциям экспериментальных устройств, скорости движения контактов и зазора между ними.

Анализ опубликованных материалов по электроэрозионным процессам в различных условиях приводит к следующим выводам.

1. Недопустимо переносить результаты экспериментальных и теоретических исследований эрозии фиксированных электродов при пробоях импульсными разрядами с ограниченным временем действия в условиях размыкаемых контактов выключателей при отключении токов КЗ.

2. Результаты исследований эрозии контактов, размыкающихся в вакууме, могут распространяться на эрозию контактов в атмосферном воздухе на начальном этапе их размыкания:

- при образовании жидкого мостика и его разрушении;

### 3.1. Мостиковая эрозия контактов

- в переходный период от мостика к дуговому разряду и в течение неподвижности дуги при условии  $\delta_k < r_{on}$  ( $\delta_k$  – раствор контактов,  $r_{on}$  – радиус опорного пятна дуги). То есть когда площадь боковой поверхности межконтактного промежутка  $S_{бок}$  меньше суммы площадей опорных пятен  $\Sigma S_{on}$  ( $S_{бок} < \Sigma S_{on}$ ). При этих условиях газ внешней среды не может проникнуть в объём дуги.

3. Наиболее интенсивная эрозия контактов, как в воздухе, так и в вакууме, происходит при образовании макрованны и интенсивном выбросе расплавленного металла за пределы контактов.

4. При токах в несколько килоампер происходит износ обоих контактов в результате испарения и выброса металла в парообразной фазе в виде потока плазмы и плавления и разбрызгивания в жидкой фазе под действием различных сил (термодинамических, электродинамических и электромагнитных (давление)).

5. Коэффициент выброса расплава на фиксированных электродах в зависимости от силы тока, в диапазоне от 13 до 26 кА и его длительности 10 мс, составлял:

- на медных –  $0,3 \div 0,38$ ;
- на *AgW* –  $0,21 \div 0,41$ .

Данные по разделению выброшенного металла по фазам на размыкаемых контактах в атмосфере воздуха при отключении тока КЗ не приводятся.

6. Ранние методики расчёта эрозии основывались на составлении баланса энергии с учётом значимости тех или иных явлений, выделении главных членов баланса и применении различных приближений. Этот подход близок к инженерному и был приемлем при неопределённости большей части параметров дугового разряда.

7. Принималось, что контакты получают энергию дуги пропорционально отношению суммы приэлектродных падений напряжений к полному напряжению дуги.

8. Другая группа методик расчёта эрозии, как при импульсных разрядах, так и при отключении тока, основывается на решении уравнения сохранения энергии с учётом фазовых превращений и уноса материала.

В настоящей работе будут рассмотрены конкретные примеры по количественной оценке эрозии серебросодержащих контактов при отключении низко-

вольтными выключателями тока КЗ и будут учитываться мостиковая эрозия, унос массы пара металла контактов с поверхности опорных пятен дуги испарением, выброс массы пара металла при взрыве микропузырьков в кипящем слое расплава на опорных пятнах и разбрызгивание металла контактов при взрыве конусов эрозии.

Для принятия эффективных мер по снижению электрической эрозии контактов и электродов отключающих аппаратов, являющихся основным средством повышения ресурса выключателей и их эксплуатационного срока службы, необходимо детально изучить физические механизмы эрозии.

### 3.1. Мостиковая эрозия контактов

Размыкание контактов выключателей при отключении любых значений силы тока в электрических цепях, содержащих индуктивность, сопровождается образованием жидкометаллического мостика из расплава в пятне контактирования, в области которого происходит сужение тока. Механизм формирования мостика и его разрушения при разных значениях силы тока различен.

Механизм разрушения мостика при отключении токов короткого замыкания имеет свои особенности [3.1, 3.6, ч. I, с. 196, ч. II, с. 14]. Время существования мостика при отключении токов КЗ сереброрсодержащими контактами, по экспериментальным данным, составляет до 0,5 мс. Скорость размыкания контактов автоматических выключателей, как правило, не превышает 2,0 м/с. При такой скорости размыкания контактов за время, равное 0,5 мс, зазор между ними составит ~1,0 мм. В этих условиях мостик в зависимости от значения силы тока либо спокойно испарится, либо подвергнется разрушению электрическим (тепловым) взрывом.

При каких условиях происходит спокойное разрушение мостика и при каких взрывное, подробно рассмотрено в первой главе. Напомним, что взрывное разрушение мостика происходит при [3.7]:

- вводе в его массу энергии, превышающей энергию сублимации материала контактов в несколько раз;
- плотности мощности, приходящей на его поверхность, не менее  $10^8 \text{ Вт/см}^2$ ;



### 3.1. Мостиковая эрозия контактов

---

- плотности тока  $\sim(10^8 \div 10^9) \text{ A/cm}^2$ ;
- скорости нарастания тока  $>10^8 \text{ A/cm}^2$ ;
- при давлении в его канале  $\sim(10^8 \div 10^9) \text{ Па}$ .

Из приведённых критических параметров, при которых мостик разрушается взрывообразно, следует, что взрыв мостика может произойти при значительных токах КЗ. Например, как показано в главе 1, мостик из жидкого  $\text{Ag}$  взорвался при мгновенном значении тока КЗ, равном  $52,0 \text{ кА}$ .

Во второй главе приводится геометрическая характеристика короткой контрагированной дуги на размыкаемых контактах  $S_{\text{бок}} / (S_{\text{он.к}} + S_{\text{он.а}}) = l_{\delta} / r_{\text{он}}$ , которая оказалась достаточно плодотворной. Она хорошо согласуется с электрофизическими характеристиками дуги и обосновывает её форму, структуру, состав плазмы и подвижность. В данном случае, применительно к жидкометаллическому мостику уместно ввести отношение  $\Delta Q_{\text{он.м}} / \Sigma S_{\text{он.м}}$ . Здесь  $\Delta Q_{\text{он.м}}$  – количество тепла, поглощаемое контактами, и  $\Sigma S_{\text{он.м}} = S_{\text{он.к}} + S_{\text{он.а}}$  – сумма площадей оснований мостика на катоде и аноде.

Для оценки доли энергии, выделяемой в мостике  $\Delta W_{\text{м}}$  в результате протекания по нему тока, поглощаемой контактами  $\Delta Q_{\text{он.м}}$ , воспользуемся геометрическим коэффициентом распределения энергии дуги [3.6, ч. II, с. 325]:

$$\eta_{\epsilon} = 1 - \frac{\delta}{r_{\text{он}} + \delta},$$

где  $r_{\text{он}}$  – радиус опорного пятна,  $\delta$  – раствор контактов и отношение  $\frac{\delta}{r_{\text{он}} + \delta}$  – определяет долю энергии дуги  $\Delta W$ , выделяемую в её канале  $\Delta Q_{\text{кан}}$ . Применительно к мостику  $r_{\text{он}} = r_{\text{он.м}}$  и  $\delta$  его длина.

Рассмотрим конкретные примеры. По данным [3.6, ч. II, с. 27, таблица 4.2] при размыкании контактов мгновенное значение силы тока составило  $7,5 \text{ кА}$ ,  $\delta_{\text{м}} = 0,16 \text{ см}$  и среднее значение радиуса оснований мостика:

$$r_{\text{он.м}} = \frac{d_{\text{ок.к}} + d_{\text{он.а}}}{4} = \frac{0,35 \text{ см} + 0,28 \text{ см}}{4} = 0,158 \text{ см}.$$

В этом случае коэффициент  $\eta_{\epsilon}$  равен:

$$\eta_z = 1 - \frac{\delta}{r_{on} + \delta} = 1 - \frac{0,16 \text{ см}}{0,158 \text{ см} + 0,16 \text{ см}} = 1 - 0,503 = 0,497.$$

Энергия, выделенная в мостике, определена в первой главе и составляет  $\Delta W_m = 60 \text{ Вт} \cdot \text{с}$ . Сумма площадей оснований мостика по данным [3.6, ч. II, с. 27, таблица 4.2] равна:

$$\Sigma S_{on.m} = S_{on.k} + S_{on.a} = 0,096 \text{ см}^2 + 0,062 \text{ см}^2 = 0,158 \text{ см}^2.$$

Отношение  $\Delta Q_{on.m} / \Sigma S_{on.m}$  равно:

$$\frac{\Delta Q_{on.m}}{\Sigma S_{on.m}} = \frac{\eta_z \cdot \Delta W_m}{\Sigma S_{on.m}} = \frac{0,497 \cdot 60 \text{ Вт} \cdot \text{с}}{0,158 \text{ см}^2} = 188,7 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}.$$

Далее определим отношение энергии канала мостика к площади его боковой поверхности:

$$\frac{\Delta Q_{кан}}{S_{бок.m}} = \frac{(1 - \eta_z) \cdot \Delta W_m}{2 \cdot \pi \cdot r_{on.m} \cdot \delta_m} = \frac{(1 - 0,497) \cdot 60 \text{ Вт} \cdot \text{с}}{2 \cdot \pi \cdot 0,158 \text{ см} \cdot 0,16 \text{ см}} = 190,1 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}.$$

Оказывается отношения  $\Delta Q_{on.m} / \Sigma S_{on.m}$  и  $\Delta Q_{кан} / S_{бок.m}$  практически равны друг другу:

$$\frac{\Delta Q_{on.m}}{\Sigma S_{on.m}} = 188,7 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} \simeq 190,1 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} = \frac{\Delta Q_{кан}}{S_{бок.m}}.$$

Заметим, что при мгновенном значении тока, равном  $7,5 \text{ кА}$ , мостик разрушился спокойно испарением (см. главу 1).

Теперь определим эти отношения в случае размыкания контактов при мгновенном значении силы тока, равном  $13,0 \text{ кА}$  [3.6, ч. II, с. 26, таблица 4.1]:

$$1. r_{on.m} = \frac{d_{on.k} + d_{on.a}}{4} = \frac{0,48 \text{ см} + 0,42 \text{ см}}{4} = 0,225 \text{ см};$$

$$2. \eta_z = 1 - \frac{\delta_m}{r_{on} + \delta_m} = 1 - \frac{0,08 \text{ см}}{0,225 \text{ см} + 0,08 \text{ см}} = 1 - 0,262 = 0,738;$$

$$3. \Sigma S_{on.m} = S_{on.k} + S_{on.a} = 0,18 \text{ см}^2 + 0,14 \text{ см}^2 = 0,32 \text{ см}^2;$$

### 3.1. Мостиковая эрозия контактов

---

$$4. S_{бок.м} = 2 \cdot \pi \cdot r_{оп.м} \cdot \delta_м = 2 \cdot \pi \cdot 0,225 \text{ см} \cdot 0,08 \text{ см} = 0,113 \text{ см}^2;$$

$$5. \Delta Q_{оп.м} = \eta_2 \cdot \Delta W_м = 0,738 \cdot 117 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 86,3 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$6. \Delta Q_{кан} = (1 - \eta_2) \cdot \Delta W_м = (1 - 0,738) \cdot 117 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 30,7 \text{ Вт} \cdot \text{с};$$

$$7. \frac{\Delta Q_{оп.м}}{\Sigma S_{оп.м}} = \frac{86,3 \text{ Вт} \cdot \text{с}}{0,32 \text{ см}^2} = 269,7 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2};$$

$$8. \frac{\Delta Q_{кан}}{S_{бок.м}} = \frac{30,7 \text{ Вт} \cdot \text{с}}{0,113 \text{ см}^2} = 271,7 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2};$$

$$9. \frac{\Delta Q_{оп.м}}{\Sigma S_{оп.м}} = 269,7 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} \simeq 271,7 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} = \frac{\Delta Q_{кан}}{S_{бок.м}}.$$

Напомним, что при мгновенном значении силы тока равном, 13,0 кА, мостик также разрушился спокойно испарением (см. главу 1).

При мгновенном значении силы тока, равном 52,0 кА, мостик при размыкании серебросодержащих контактов разрушился в результате электрического взрыва. Какие значения имеют отношения  $\Delta Q_{оп.м}/\Sigma S_{оп.м}$  и  $\Delta Q_{кан}/S_{бок.м}$  в случае взрыва мостика? Необходимые исходные данные для рассматриваемого примера приведены в главе 1.

$$1. r_{оп.м} = \frac{d_м}{2} = \frac{0,25 \text{ см}}{2} = 0,125 \text{ см}.$$

$$2. \delta_м = 0,05 \text{ см}.$$

$$3. \eta_2 = 1 - \frac{\delta_м}{r_{оп.м} + \delta_м} = 1 - \frac{0,05 \text{ см}}{0,125 \text{ см} + 0,05 \text{ см}} = 1 - 0,286 = 0,714.$$

$$4. \Sigma S_{оп.м} = 2 \cdot S_{оп.м} = 2 \cdot \pi \cdot r_{оп.м}^2 = 2 \cdot \pi \cdot (0,125 \text{ см})^2 = 0,0981 \text{ см}^2.$$

$$5. S_{бок.м} = 2 \cdot \pi \cdot r_{оп.м} \cdot \delta_м = 2 \cdot \pi \cdot 0,125 \text{ см} \cdot 0,05 \text{ см} = 0,0392 \text{ см}^2.$$

$$6. \Delta Q_{оп.м} = \eta_2 \cdot \Delta W_м = 0,714 \cdot 429 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 306,3 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

$$7. \Delta Q_{кан} = (1 - \eta_2) \cdot \Delta W_м = (1 - 0,714) \cdot 429 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 122,7 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

$$8. \frac{\Delta Q_{оп.м}}{\Sigma S_{оп.м}} = \frac{306,3 \text{ Вт} \cdot \text{с}}{0,0981 \text{ см}^2} = 3122,3 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}.$$

$$9. \frac{\Delta Q_{кан}}{S_{бок.м}} = \frac{122,7 \text{ Вт} \cdot \text{с}}{0,0392 \text{ см}^2} = 3130,1 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}.$$

$$10. \frac{\Delta Q_{оп.м}}{\Sigma S_{оп.м}} = 3122,3 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} \simeq 3130,1 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} = \frac{\Delta Q_{кан}}{S_{бок.м}}.$$

Таким образом, в результате приведённых расчётов выявлен интересный феномен, который заключается в равенстве поверхностных плотностей энергии, рассеиваемой через поверхность оснований и боковую поверхность жидкометаллического мостика при его разрушении как спокойным испарением, так и взрывом. Можно утверждать, что при поверхностной плотности энергии  $\Delta Q/S < 300 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{см}^2$  жидкий металл мостика из *Ag* термодинамически устойчив и разрушается спокойным испарением, а при  $\Delta Q/S \geq 3000 \text{ Вт} \cdot \text{с}/\text{см}^2$  – мостик термодинамически неустойчив и подвергается взрывному разрушению.

Численные значения мостиковой эрозии серебрясодержащих контактов при различных мгновенных значениях силы токов, при которых размыкались контакты, по данным расчётов, приведённых в первой главе, указаны в таблице 3.1.

**Таблица 3.1. Мостиковая эрозия серебрясодержащих контактов при разных значениях тока.**

$i_{\partial}, \text{ кА}$	7,5	13,0	52,0
$M_{м}, \text{ с}$	0,117	0,14	0,0228

### 3.2 Эрозия контактов испарением их металла

В параграфе 2.4 рассмотрено протекание тока в дуге на размыкаемых контактах за счёт испарения их металла с поверхности опорных пятен. В таблице 2.9 приведены значения массы паров  $Ag$ , испарившейся с поверхности опорных пятен на катоде и аноде за время скоростной киносъёмки отдельных кадров, при отключении тока в испытательном контуре равном  $16 \text{ кА}$ ,  $U_{\phi} = 420 \text{ В}$  и  $\cos \varphi = 0,2$ . По данным таблицы 2.9 на рис 3.1 построены графики изменения массы паров  $Ag$ , испарившейся с катода  $m_{нар.к}$  и анода  $m_{нар.а}$  в зависимости от времени горения дуги. В результате численного интегрирования функций  $m_{нар.к}(t_{\delta})$  и  $m_{нар.а}(t_{\delta})$  в таблице 3.2 приведены значения массы паров  $Ag$ , испарившейся с поверхности опорных пятен на катоде  $\sum m_{нар.к}(t_{\delta})$  и на аноде  $\sum m_{нар.а}(t_{\delta})$  за время горения дуги на размыкаемых контактах.

**Таблица 3.2. Эрозия контактов за счёт испарения  $Ag$  с поверхности опорных пятен на катоде и аноде при отключении тока  $16 \text{ кА}$ ,  $U_{\phi} = 420 \text{ В}$  и  $\cos \varphi = 0,2$ .**

$t_{\delta}, \text{ мс}$	0,334	0,668	1,34	2,0	2,67	4,0	5,34	6,68
$i_{\delta}, \text{ кА}$	13,0	15,0	18,2	21,5	23,2	24,5	21,9	14,6
$u_{\delta}, \text{ кА}$	27,0	34,0	36,0	44,0	44,0	44,0	44,0	48,0
$m_{нар.к}, 10^{-3}, \text{ г}$	0,327	0,379	0,524	0,582	0,668	0,750	0,648	0,332
$\sum m_{нар.к}, \text{ г}$	$21,0 \cdot 10^{-3}$							
$m_{нар.а}, 10^{-3}, \text{ г}$	1,790	2,057	2,844	3,170	3,633	4,080	3,540	1,820
$\sum m_{нар.а}, \text{ г}$	$115,0 \cdot 10^{-3}$							
$M_{нар} = \sum m_{нар.к} + \sum m_{нар.а}, \text{ г}$	$136,0 \cdot 10^{-3}$							

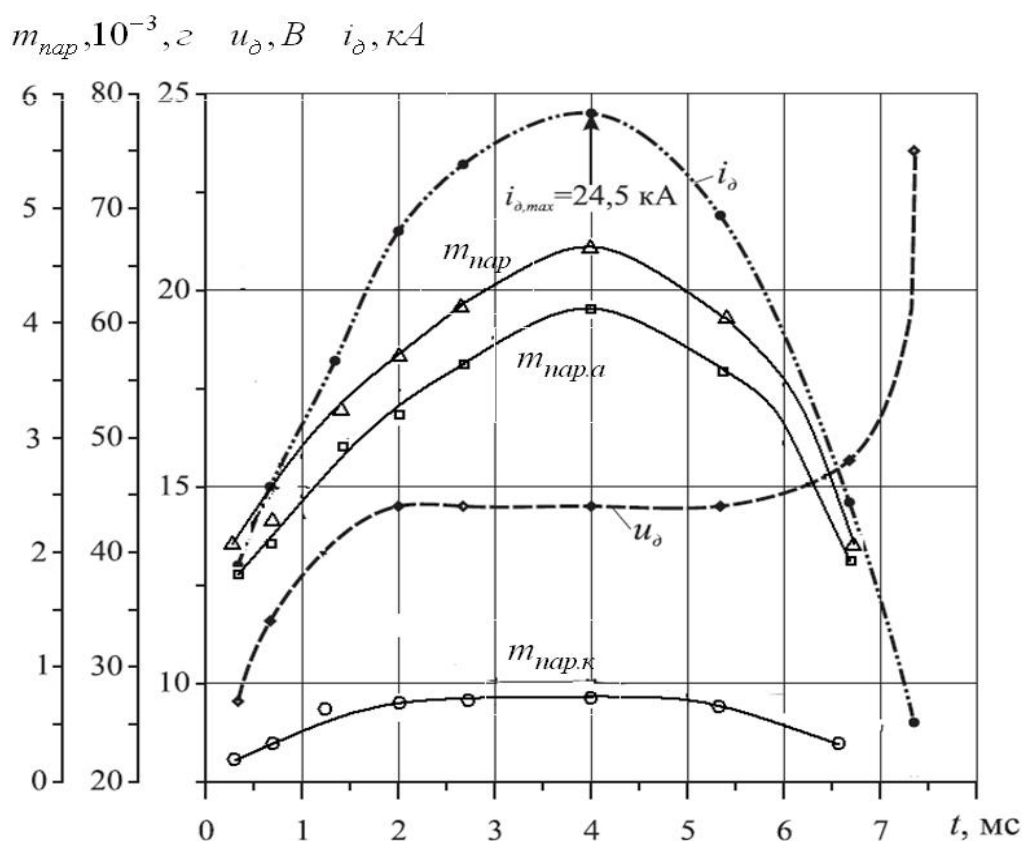


Рис. 3.1. Эрозия контактов испарением их металла при отключении тока в контуре, равного 16 кА,  $U_{\phi} = 420 \text{ В}$  и  $\cos \varphi = 0,2$ .

Общая масса паров  $Ag$ , испарившаяся с контактов при отключении тока 16 кА при  $U_{\phi} = 420 \text{ В}$  и  $\cos \varphi = 0,2$ , составляет:

$$M_{\text{пар}} = \sum m_{\text{пар},k} + \sum m_{\text{пар},a} = (21,0 + 115,0) \cdot 10^{-3} \text{ г} = 136,0 \cdot 10^{-3} \text{ г}.$$

### 3.3. Эрозия катода при отключении тока КЗ

В предыдущих разделах показано, что эрозию размыкаемых контактов составляют мостиковая эрозия и масса паров металла контактов, испарившаяся с поверхности опорных пятен дуги.

В параграфе 2.5 показано образование столбиков из жидкого металла в виде конусов с каплями на их вершинах после схлопывания микропузырьков. Плотность мощности, приходящая на конус с радиусом в основании, равным  $r_k = 10^{-4} \text{ см}$ , и углом в вершине  $2\alpha = 10^\circ$ , на начальном этапе размыкания контактов  $q_{ц.мах.к} = 3,06 \cdot 10^6 \text{ Вт} / \text{см}^2$  к взрывному разрушению их привести не может. То есть конус на катоде должен подвергаться испарению. Средняя масса  $m_{кон.к}$  жидкого  $Ag$  при температуре, близкой к температуре его кипения, в конусе на катоде составляет:

$$m_{кон.к} = \rho_{кип}^{Ag} \cdot V_{кон.к} = 9,0 \text{ г} / \text{см}^3 \cdot 11,9 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 = 1,07 \cdot 10^{-10} \text{ г},$$

где  $\rho_{кип}^{Ag} = 9,0 \text{ г} / \text{см}^3$  (таблица 1.1);

$$V_{кон.к} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r_k^2 \cdot h = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot (10^{-4} \text{ см})^2 \cdot 11,4 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 11,9 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \text{ – средний объём}$$

$$\text{конуса на катоде; } h = \frac{r_k}{\text{tg}\alpha} = \frac{10^{-4} \text{ см}}{\text{tg}5^\circ} = \frac{10^{-4} \text{ см}}{0,08749} = 11,4 \cdot 10^{-4} \text{ см} \text{ – высота конуса.}$$

Плотность потока массы паров  $Ag$  при испарении металла конуса при натекании на него плотности мощности, равной  $q_{ц.мах.к} = 3,06 \cdot 10^6 \text{ Вт} / \text{см}^2$ , на начальном этапе размыкания контактов составляет:

$$j_{исп} = \frac{q_{ц.мах.к}}{W_{исп}^{Ag}} = \frac{3,06 \cdot 10^6 \text{ Вт} / \text{см}^2}{2,36 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{г}} = 1,3 \cdot 10^3 \text{ г} / (\text{см}^2 \cdot \text{с}),$$

где  $W_{исп}^{Ag} = 2,36 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{г}$  – таблица 1.1.

Жидкометаллический конус на катоде в таком случае может испариться за время:

$$t_{кон.к} = \frac{m_{кон.к}}{j_{исп} \cdot S_{кон.к}} = \frac{1,07 \cdot 10^{-10} \text{ г}}{1,3 \cdot 10^3 \text{ г} / (\text{см}^2 \cdot \text{с}) \cdot 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2} = 2,28 \cdot 10^{-11} \text{ с},$$

где  $S_{\text{кон.к}} = \pi \cdot r_{\text{к}} \cdot l_{\text{кон.к}} = \pi \cdot 10^{-4} \text{ см} \cdot 11,5 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 36,1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$  – площадь поверхности конуса;

$$l_{\text{кон.к}} = \frac{r_{\text{к}}}{\sin 5^\circ} = \frac{10^{-4} \text{ см}}{0,08716} = 11,5 \cdot 10^{-4} \text{ см} \text{ – длина образующей конуса.}$$

Время испарения конуса на катоде оказывается на два порядка меньше времени формирования кратера, но более продолжительное времени функционирования эктона:

$$t_{\text{к}} = 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ с} > t_{\text{кон.к}} = 2,28 \cdot 10^{-11} > 9,8 \cdot 10^{-13} \text{ с} = t_{\text{эк}}.$$

Поэтому время цикла функционирования конуса, кратера и эктона практически равно времени формирования кратера:

$$t_{\text{ц}} = 4,52 \cdot 10^{-9} \text{ с} \simeq 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ с} = t_{\text{к}}.$$

Согласно данным таблицы 2.11 общее количество конусов, которое прием равным общему количеству эктонов  $\sum \Delta N_{\text{эк}}(t_{\text{д}})$  на катоде, равно  $1,177 \cdot 10^9$ . Следовательно, потеря массы катодом за счёт испарения конусов составляет:

$$\sum m_{\text{кон.к}} = m_{\text{кон.к}} \cdot \sum \Delta N_{\text{эк}}(t_{\text{д}}) = 1,07 \cdot 10^{-10} \text{ г} \cdot 1,177 \cdot 10^9 = 0,126 \text{ г}.$$

При взрыве микропузырька в слое расплава на катоде выделяется порция паров  $Ag$ , которая также составляет долю паровой фракции эрозии катода.

Средний объём микропузырька на катоде равен:

$$V_n = \frac{4}{3} \pi \cdot r_{\text{к}}^3 = \frac{4}{3} \pi \cdot (10^{-4})^3 = 4,19 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3.$$

Количество атомов  $Ag$  в микропузырьке на начальном этапе размыкания контактов составляет:

$$N_0 = n_0 \cdot V_n = 8,92 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot 4,19 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 = 3,47 \cdot 10^8,$$

где  $n_0 = 8,92 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  – концентрация атомов в микропузырьке (таблица 2.11). Масса пара  $Ag$  в микропузырьке имеет значение:



### 3.3. Эрозия катода при отключении тока КЗ

$$m_{нар.н} = m_0^{Ag} \cdot N_0 = 179,1 \cdot 10^{-24} \cdot 3,74 \cdot 10^8 = 6,7 \cdot 10^{-14} \text{ г},$$

где  $m_0^{Ag} = 179,1 \cdot 10^{-24} \text{ г}$  – масса атома  $Ag$  (таблица 1.1).

Общее количество массы пара  $Ag$ , потерянного катодом в результате взрыва микропузырьков за время горения дуги на контактах, составляет:

$$\sum m_{нар.н} = m_{нар.н} \cdot \sum \Delta N_{экт}(t_{\delta}) = 6,7 \cdot 10^{-14} \text{ г} \cdot 1,177 \cdot 10^9 = 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ г}.$$

Таким образом, общая масса паровой фракции эрозии катода при отключении тока в контуре 16 кА при  $U_{\phi} = 420 \text{ В}$  и  $\cos \varphi = 0,2$  серебросодержащими контактами равна:

$$\begin{aligned} M_{нар.к} &= \sum m_{нар.к} + \sum m_{кон.к} + \sum m_{нар.н} = \\ &= 21 \cdot 10^{-3} \text{ г} + 126 \cdot 10^{-3} \text{ г} + 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ г} = 147,1 \cdot 10^{-3} \text{ г}. \end{aligned}$$

Жидкокапельную фракцию эрозии катода составляют масса капель, оторвавшихся от вершин жидкометаллических столбиков в виде конусов и образовавшихся в результате дробления внешней оболочки микропузырьков при их взрыве.

На рис. 2.14 приведены микроэлектронные фотографии супермелких капель с размерами от 0,3 до 1,0 мкм на поверхности серебросодержащих контактов после отключения токов КЗ. Поскольку капли при нахождении в канале дуги подвергаются частичному испарению, то для расчёта жидкокапельной эрозии контактов за средний диаметр капель примем их наибольшее значение 1,0 мкм. Объём капли равен:

$$V_{к} = \frac{4}{3} \pi \cdot r_{к}^3 = \frac{4}{3} \pi \cdot (0,5 \cdot 10^{-4} \text{ см})^3 = 0,52 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3.$$

Масса такой капли из  $Ag$  при температуре, близкой к его температуре кипения, составляет:

$$m_{кап} = \rho_{кип}^{Ag} \cdot V_{к} = 9,0 \text{ г/см}^3 \cdot 0,52 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 = 4,68 \cdot 10^{-12} \text{ г}.$$

Число капель, оторвавшихся от жидкометаллических столбиков в виде конусов равно числу эктонов на катоде, которые функционировали в процессе горения дуги на контактах. В таком случае общая масса капель будет равна:

$$\Sigma m_{\text{кап.кон}} = m_{\text{кап}} \cdot \Sigma \Delta N_{\text{эк}}(t_{\partial}) = 4,68 \cdot 10^{-12} \text{ г} \cdot 1,177 \cdot 10^9 = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ г}.$$

В качестве второй составляющей жидкокапельной эрозии катода выступают капли, которые образуются в результате взрыва микропузырька в кипящем слое расплава.

Взрыв микропузырька в расплаве на опорном пятне мощной дуги отключения состоит из двух фаз. В первой фазе взрыв микропузырька, расположенного у поверхности расплава, происходит в результате воздействия давления  $P_n$ , основной составляющей которого является лапласовское давление. Давление в микропузырьке  $P_n$  действует на всех направлениях и стремится его расширить. Однако близкое расположение микропузырька к поверхности расплава приводит к взрыву его внешней оболочки и дроблению её на микрокапли.

В рассматриваемом примере давление в микропузырьке на катоде согласно данным таблицы 2.11 за время горения дуги на контактах составляет:

$$P_n = (43,9 \div 39,5) \cdot 10^6 \text{ дин} / \text{см}^2 \quad (P_n = 39,2 \cdot 10^6 \text{ дин} / \text{см}^2).$$

Такое высокое значение давления вполне может привести к взрыву микропузырька.

Из рис. 2.15 и рисунков, приведённых в [3.6, ч. II, рис. 3.36, с. 234 и рис. 3.46, с. 242], видна форма кратеров на катоде при отключении токов КЗ. Схематически кратер можно представить так, как показано на рис. 3.2. В таком случае эрозию катода при взрыве микропузырька составит объём расплава, находящегося над его поверхностью. Объём эродированного расплава  $V_{\text{эр}}$  равен:

$$\begin{aligned} V_{\text{эр}} &= V_{\text{ц}} - \frac{1}{2} V_n = \pi \cdot r_{\text{к}}^2 \cdot r_{\text{к}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{\text{к}}^3 = \\ &= \pi (10^{-4} \text{ см})^3 - \frac{2}{3} \pi (10^{-4} \text{ см})^3 = 1,05 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3, \end{aligned}$$

где  $V_{\text{ц}}$  и  $V_n$  – объёмы цилиндра и микропузырька соответственно.

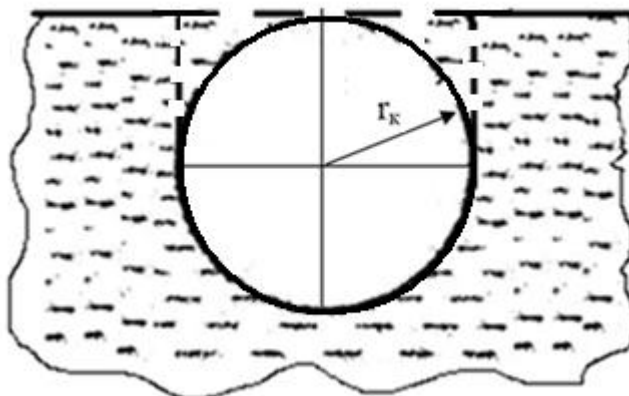
Масса эродированного единичного объёма расплава при температуре, близкой к температуре кипения  $Ag$ , равна:

$$m_{\text{кан.н}} = \rho_{\text{кин}}^{Ag} \cdot V_{\text{эр}} = 9,0 \text{ г} / \text{см}^3 \cdot 1,05 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 = 9,45 \cdot 10^{-12} \text{ г}.$$

Общая масса жидкокапельной эрозии катода при взрыве микропузырьков за время горения дуги на контактах составляет:

### 3.3. Эрозия катода при отключении тока КЗ

$$\sum m_{кан.н} = m_{кан.н} \cdot \sum \Delta N_{эк}(t_{\partial}) = 9,45 \cdot 10^{-12} \text{ з} \cdot 1,177 \cdot 10^9 = 11,1 \cdot 10^{-3} \text{ з}.$$



**Рис. 3.2.** Схематическое изображение кратера на катоде.

В результате взрыва микропузырька в его объеме образуется микроплазмод, в котором протекает ток эктона  $i_{эк}$ . Согласно данным таблицы 2.11 ток эктона на катоде изменяется в процессе горения дуги на контактах от 9,4 до 8,85 А. В результате протекания тока эктона в микроплазмоеде возникает электромагнитное давление  $P_{мк.к}$ , которое его контрагирует.

После первой фазы взрыва микропузырька под воздействием лапласовского давления наступает вторая фаза его взрыва под воздействием электромагнитного давления.

Согласно данным таблицы 2.15 давление в микроплазмоидах на катоде за время горения дуги на размыкаемых контактах изменяется в интервале  $(27,58 \div 24,95) \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Это давление вызывает реактивную силу  $F_{мк.к}$ , действующую на дно кратера, площадь которого  $S_{кк} = 3,14 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$ .

Реактивная сила  $F_k$ , действующая на дно кратера на катоде, на начальном этапе размыкания контактов равна:

$$F_{мк.к} = P_{мк.к} \cdot S_{кк} = 27,58 \cdot 10^6 \text{ дин} / \text{см}^2 \cdot 3,14 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 = 0,87 \text{ дин} = 0,88 \cdot 10^{-3} \text{ з}.$$

По внешнему виду кратеров, показанных, например, на микроэлектронных фотографиях (рис. 2.15) видно, что кратеры не подвергаются взрывному разрушению. Поэтому можно сделать вывод о недостаточности реактивной силы  $F_k$ , равной менее одного миллиграмма для разрушения кратера, диаметр которого составляет два микрона.

Весьма показательно может служить кинетическая энергия потока массы

микрочастиц, извергающихся из кратера во второй фазе его взрыва. В процессе функционирования микроплазмоедов ионы поглощаются катодом, а электроны извергаются за пределы кратера. Единичный электрон на катоде приобретает кинетическую энергию, равную:

$$w_e^k = \frac{m_e \cdot v_e^2}{2} = \frac{9,11 \cdot 10^{-28} \text{ г} \cdot (1,36 \cdot 10^8 \text{ см/с})^2}{2} = 8,42 \cdot 10^{-12} \text{ эрг},$$

где  $9,11 \cdot 10^{-28} \text{ г}$  – масса электрона и  $1,36 \cdot 10^8 \text{ см/с}$  – направленная скорость электронов на катоде (см. 2.6.1).

Общее количество электронов  $N_e$  в микроплазмоеде на катоде равно  $5,8 \cdot 10^7$  (см. 2.6.1). Следовательно, кинетическая энергия потока массы электронов в микроплазмоеде на катоде составляет:

$$\begin{aligned} W_{\text{э.к.е}}^k &= w_e^k \cdot N_e = 8,42 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} \cdot 5,8 \cdot 10^7 = \\ &= 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ эрг} = 4,8 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Вероятно, поток электронов, истекающий из раскрытого кратера и обладающий кинетической энергией равной порядка  $10^{-11} \text{ Дж}$ , не может привести во второй фазе взрыва микропузырька к разрушению кратера на катоде.

Общая масса жидкокапельной фракции эрозии катода при отключении серебрясодержащими контактами тока в контуре  $16 \text{ кА}$  при  $U_\phi = 420 \text{ В}$  и  $\cos \varphi = 0,2$  равна:

$$\begin{aligned} M_{\text{ж.к.к}} &= \sum m_{\text{кап.кон}} + \sum m_{\text{кап.п}} = \\ &= 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ г} + 11,1 \cdot 10^{-3} \text{ г} = 16,6 \cdot 10^{-3} \text{ г}. \end{aligned}$$

Таким образом, в приведённом примере расчёта эрозии катода общая её масса составляет:

$$M_{\text{эр.к}} = M_{\text{пар.к}} + M_{\text{ж.к.к}} = 147,1 \cdot 10^{-3} \text{ г} + 16,6 \cdot 10^{-3} \text{ г} = 163,7 \cdot 10^{-3} \text{ г}$$

Доля жидкокапельной фракции эрозии катода при отключении серебрясодержащими контактами тока в контуре  $16 \text{ кА}$  при  $U_\phi = 420 \text{ В}$  и  $\cos \varphi = 0,2$  составляет:

### 3.4. Взрывная эрозия анода при отключении тока КЗ

$$\frac{M_{ж.к}}{M_{эр.к}} \cdot 100\% = \frac{16,6 \cdot 10^{-3} \text{ г}}{163,7 \cdot 10^{-3} \text{ г}} \cdot 100\% = 10,14\%.$$

Следовательно, основную массу эрозии серебрясодержащего катода в низковольтной дуге при отключении тока 16 кА составляет паровая фракция.

### **3.4. Взрывная эрозия анода при отключении тока КЗ**

Электрическая эрозия анода на размыкаемых контактах при отключении тока КЗ состоит также, как и катода, из паровой и жидкометаллической фракций. Оценка мостиковой эрозии контактов и эрозии их за счёт испарения металла с поверхности опорных пятен дугового разряда приведена в предыдущих параграфах.

Среднее значение плотности мощности, приходящей на анод при отключении серебрясодержащими контактами тока, равного 16,0 кА, согласно данным таблицы 2.7 составляет  $q_{он.а} \geq (10^5 \div 10^4) \text{ Вт/см}^2$ . При этом значении плотности мощности и критерии  $Bi \geq 1,0$  вся площадь анодного опорного пятна подвергается оплавлению и тонкий слой расплава Ag достигает температуры его кипения. В тонком слое расплава Ag возникает поверхностное пузырьковое кипение. При увеличении объёма микропузырька и достижения им поверхности расплава происходит прорыв его внешней оболочки под воздействием давления  $P_n$  (таблица 2.13). Пары Ag в микропузырьке лавинообразно ионизируются и образуется микроплазмод, в котором протекает ток эктона. В результате протекания тока эктона в микроплазмоде возникает электромагнитное давление  $P_{м.а}$  (таблица 2.15), которое изменяется за время горения дуги на контактах от 96,6 до 58,35 атм. Это давление вызывает реактивную силу  $F_{к.а}$ , воздействующую на дно кратера, находящегося на аноде:

$$F_{к.а} = P_{м.а} \cdot S_{к.а} = 96,6 \text{ кгс/см}^2 \cdot 38,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 = 37,2 \cdot 10^{-3} \text{ г},$$

где  $S_{к.а} = 38,5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$  – среднее значение площади кратера на аноде. Реактивная сила на аноде  $F_{м.а}$  на два порядка больше, чем на катоде:

$$F_{м.а} = 37,2 \cdot 10^{-3} \text{ г} \gg 0,88 \cdot 10^{-3} \text{ г} = F_{м.к}.$$

Более того, ионы в микроплазмоде на аноде, в отличие от катодных, устремлены во внешнюю среду. Поскольку давление в микропузырьке  $P_n$  на аноде относительно невелико (таблица 2.13), то внешняя его оболочка не полностью подвергается разрушению. В ней происходит только прорыв (см. рис. 2.24). По-

этому ионы и нейтральные атомы при своём движении могут механически воздействовать на стенки полужакрытого микропузырька. Оценим это воздействие.

Кинетическая энергия единичного иона  $Ag$  равна:

$$\omega_u^a = \frac{m_u^{Ag} \cdot v_u^2}{2} = \frac{179,1 \cdot 10^{-24} \text{ г} \cdot \left(0,469 \cdot 10^6 \frac{\text{см}}{\text{с}}\right)^2}{2} = 1,97 \cdot 10^{11} \text{ эрг},$$

где  $m_i^{Ag} = 179,1 \cdot 10^{-24} \text{ г}$  – масса атома (иона)  $Ag$ , и средняя скорость ионов в прианодной зоне электрода из  $Ag$  [3.6, ч. II, с. 45]:

$$v_i = 0,134 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{U_{\text{эф.а}}} = 0,134 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{12,25 \text{ В}} = 0,469 \cdot 10^6 \text{ см/с}.$$

Общее число ионов  $N_i$  в микроплазмоиде на аноде равно  $N_i = N_{e.эк} = 8,526 \cdot 10^8$  (см. п. 2.6.2).

Кинетическая энергия потока массы ионов в микроплазмоиде на аноде составляет:

$$W_{\text{эк.и}}^a = \omega_i^a \cdot N_i = 1,97 \cdot 10^{11} \text{ эрг} \cdot 8,526 \cdot 10^8 = 1,68 \cdot 10^{-2} \text{ эрг} = 1,68 \cdot 10^{-9} \text{ Дж}.$$

Кинетическая энергия потока ионов в микроплазмоиде на аноде превосходит кинетическую энергию потока электронов на катоде на два порядка:

$$W_{\text{эк.и}}^a = 1,68 \cdot 10^{-9} \text{ Дж} \gg 4,8 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = W_{\text{эк.е}}^k.$$

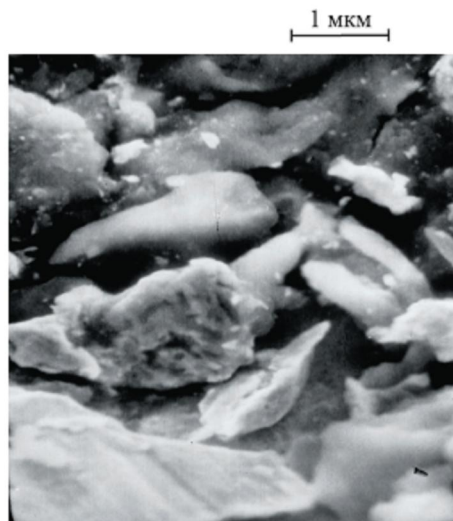
Численные расчёты значений электромагнитного давления в микроплазмоиде на аноде, создаваемом током эктона, реактивной силы, действующей на дно кратера, и кинетической энергии потока ионов в микроплазмоиде обосновывают наличие на эродированной поверхности серебросодержащих контактов углублений с диаметром до  $100 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  (см. рис. 2.13) и многочисленных супермелких капель с диаметром  $(0,3 \div 1,0) \cdot 10^{-4} \text{ см}$  в центральной части контактов (см. рис. 2.14) и на их периферии относительно крупных капель, диаметры которых достигают  $(0,2 \div 0,5) \text{ мм}$ . Более того, на поверхности контактов обнаружены осколки материала контактов (см. рис. 3.3). В [3.6, ч. II, параграф 4.4] показаны многочисленные капли из дугогасительной камеры автоматического выключателя после отключения тока в испытательном контуре, равного  $65,0 \text{ кА}$ .

Все приведённые экспериментальные наблюдения продуктов эрозии сильноточных контактов и результаты расчётов являются доказательствами протека-

### 3.4. Взрывная эрозия анода при отключении тока КЗ

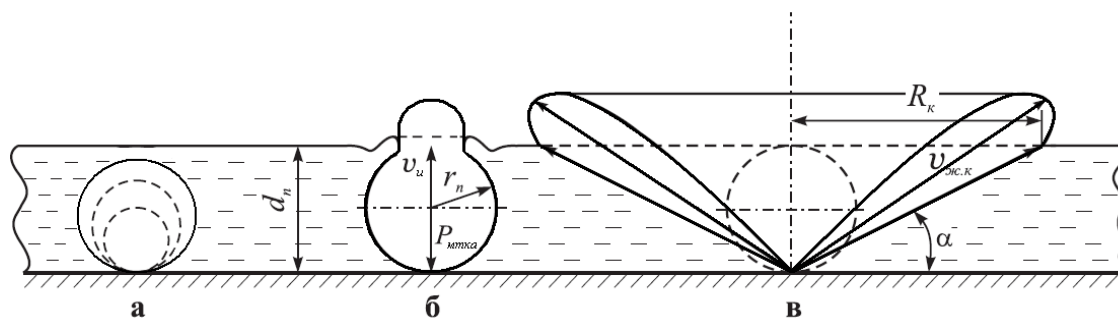
ния интенсивных взрывных процессов на их поверхности при отключении токов КЗ.

По данным Daalder'a, приведённым в [3.7, с. 379], при отключении токов в диапазоне от 52 до 210 А медными контактами капли разлетались под углом  $10^\circ \div 20^\circ$  относительно поверхности контактов.



**Рис. 3.3. Осколки металла контактов на их поверхности после отключения тока КЗ.**

Таким образом, при второй фазе взрыва микроплазмоида на месте микропузырька образуется конус эрозии (схематично показан на рис. 3.4,в) и выброс капель и твёрдых частиц металла контактов.



**Рис. 3.4. Схематическое изображение: а – образования микропузырька; б – прорыв оболочки микропузырька и образования микроплазмоида; в – образование конуса эрозии в результате взрыва кратера.**

Объём конуса:

$$V_{\text{кон}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot R_k^2 \cdot h,$$

где  $R_k$  – радиус основания конуса и  $h$  – его высота. Примем за высоту конуса средний диаметр микропузырька, то есть  $h=d_n=7 \cdot 10^{-4}$  см. Радиус конуса определяется из выражения:

$$R_k = \frac{d_n}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Угол разлёта каплей  $\alpha$  примем  $10^\circ$ , что соответствует углу разлёта каплей меди. В таком случае, радиус конуса и его объём будут равны:

$$R_k = \frac{d_n}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{7 \cdot 10^{-4} \text{ см}}{\operatorname{tg} 10^\circ} = \frac{7 \cdot 10^{-4} \text{ см}}{0,1763} = 39,7 \cdot 10^{-4} \text{ см},$$

$$V_{\text{кон}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot (39,7 \cdot 10^{-4} \text{ см})^2 \cdot 7 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3.$$

Средняя масса жидкого  $Ag$ , заключённого в конусе эрозии, при температуре его кипения, будет равна:

$$m_{\text{к.эр}} = \rho \cdot V_{\text{кон}} = 9,0 \text{ г/см}^3 \cdot 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 = 9,9 \cdot 10^{-8} \text{ г}.$$

Общая масса эрозии контактов, теряемая за счёт разлёта частиц из конуса эрозии на аноде при отключении тока  $16,0 \text{ кА}$  ( $i_{\text{д.макс}}=24,5 \text{ кА}$ ) в процессе горения дуги на контактах составляет:

$$\sum m_{\text{эр.кон}} = m_{\text{к.эр}} \cdot \sum N_{\text{эк.а}}(t_{\text{д}}) = 9,9 \cdot 10^{-8} \text{ г} \cdot 1,378 \cdot 10^7 = 1,364 \text{ г},$$

где  $\sum N_{\text{эк.а}}(t_{\text{д}})$  – общее количество эктонов, функционирующих на аноде за время горения дуги на контактах при отключении тока  $16,0 \text{ кА}$  (см. таблицу 2.13).

После завершения функционирования эктона и взрыва микроплазмоида конус эрозии, расположенный в жидком слое расплава  $Ag$ , схлопывается. На его месте происходит всплеск расплава в виде столбика с каплей на его вершине. Эти всплески расплава на анодных опорных пятнах дуги снова станут центрами концентрации зарядов. Оторвавшиеся капли от столбиков составляют жидкокапельную фракцию эрозии анода. Если принять диаметр каплей равным  $10^{-4} \text{ см}$  (см. рис. 2.14), то жидкокапельная фракция эрозии анода в рассматриваемом случае составит:

$$\sum m_{\text{кап}} = m_{\text{кап}} \cdot \sum N_{\text{эк.а}}(t_{\text{д}}) = 4,68 \cdot 10^{-12} \text{ г} \cdot 1,378 \cdot 10^7 = 6,45 \cdot 10^{-5} \text{ г}.$$

Согласно данным таблицы 2.12 плотность мощности  $q_{\text{ц.макс.а}}$ , приходящая на центры концентрации зарядов в виде столбиков на аноде за время горения дуги на контактах изменяется в диапазоне от  $6,32 \cdot 10^6$  до  $5 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$ , то есть не может



### 3.4. Взрывная эрозия анода при отключении тока КЗ

привести их к взрывному разрушению. Следовательно, жидкометаллическая фракция эрозии анода при отключении тока в контуре 16,0 кА при  $U_{\phi}=420$  В и  $\cos\varphi=0,2$  составляет:

$$M_{ж.к.а} = \sum m_{эр.кон} + \sum m_{кан} = 1,364 \text{ г} + 6,45 \cdot 10^{-5} \text{ г} = 1,365 \text{ г}.$$

Всплеск жидкого Ag в виде столбика, образующегося при схлопывании конуса эрозии, высотой  $h=5 \cdot 10^{-4}$  см под воздействием плотности мощности единицы  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> должен испариться и составить часть паровой фракции эрозии анода. При взрыве конуса эрозии пары Ag, заключённые в микропузырьке, также должны составить часть паровой фракции эрозии анода. Однако, как показывают расчёты, их общая масса в эрозии анода составляет только единицы ( $10^{-5} \div 10^{-6}$ ) г [3.6, ч. II, с. 137]. Поэтому указанные составляющие паровой фракции эрозии анода в общей массе эрозии контактов учитывать нет необходимости.

Таким образом, в приведённом примере расчёта эрозии анода общая её масса составляет:

$$M_{эр.а} = M_{пар.а} + M_{ж.к.а} = 115 \cdot 10^{-3} \text{ г} + 1,365 \text{ г} = 1,48 \text{ г},$$

где  $M_{пар.а} = \sum m_{пар.а}$  – таблица 3.2.

Доля жидкометаллической фракции в эрозии анода из серебрясодержащих контактов при отключении тока в контуре 16,0 кА составляет:

$$\frac{M_{ж.к.а}}{M_{эр.а}} \cdot 100\% = \frac{1,365 \text{ г}}{1,48 \text{ г}} \cdot 100\% = 92,2\%.$$

Общая масса эрозии серебрясодержащих контактов при отключении низковольтным выключателем тока в контуре, равного 16,0 кА, при  $U_{\phi}=420$  В и  $\cos\varphi=0,2$  равна:

$$M_{эр} = M_{эр.к} + M_{эр.а} = 163,7 \cdot 10^{-3} \text{ г} + 1,48 \text{ г} = 1,644 \text{ г}.$$

Эрозия анода в рассматриваемом примере превосходит эрозию катода в  $\frac{M_{эр.а}}{M_{эр.к}} = \frac{1,48 \text{ г}}{0,1637 \text{ г}} = 9$  раз, то есть практически на порядок. Доля паровой фракции эрозии контактов при отключении тока 16,0 кА составляет:

$$\frac{M_{пар.к} + M_{пар.а}}{M_{эр}} \cdot 100\% = \frac{147,1 \cdot 10^{-3} \text{ г} + 115 \cdot 10^{-3} \text{ г}}{1,644 \text{ г}} \cdot 100\% = 15,9\%.$$

Заметим, что в [3.6, ч. II, с. 138] эрозия обоих серебрясодержащих контактов при отключении тока в контуре 16,0 кА ( $i_{d.max}=24,5$  кА), рассчитанная по упрощённой методике, составила:

$$M'_{эп} = 2 \cdot M_{эп.к} = 2 \cdot 0,89 \text{ г} = 1,78 \text{ г}.$$

То есть расхождение в результатах расчётов по упрощённой и уточнённой методикам составляет:

$$\frac{M'_{эп}}{M_{эп}} \cdot 100\% = \frac{1,78 \text{ г}}{1,644 \text{ г}} \cdot 100\% = 10,8\%.$$

Следовательно, в практических инженерных расчётах для оценки ожидаемой эрозии контактов при отключении токов КЗ можно пользоваться упрощённой методикой её расчёта.

### 3.5. Механизм эрозии деионных пластин дугогасительной решётки

Срок службы выключателей и надёжность многократного отключения номинальных токов и токов КЗ зависят от эрозионной стойкости деионных пластин дугогасительной решётки, дугогасительных рогов и других деталей дугогасительных устройств выключателей. Снижение их эрозионного поражения может быть достигнуто только в результате глубокого исследования механизма их электрической эрозии. Механизмы электрической эрозии электродов и эрозионные следы дуговых разрядов многообразны. Это связано с большим количеством разновидностей дуговых разрядов и условий их возникновения. Очевидно, в каждом конкретном случае механизм эрозии электродов будет зависеть от электрических и геометрических характеристик дугового разряда, тепло- и электрофизических свойств металлов электродов и их паров и продолжительности воздействия дугового разряда на электроды.

В [3.6, § 3.4] рассмотрены основные особенности формы и структуры опорных пятен дуги отключения большой мощности на деионных пластинах с различными видами покрытий дугогасительных решёток низковольтных выключателей.

Эрозионное поражение деионных пластин в зависимости от значения силы отключаемого тока и геометрии дугогасительной решётки может быть либо в виде взрывного механизма с уносом значительной массы их металла, либо дискретным практически без потери металла.

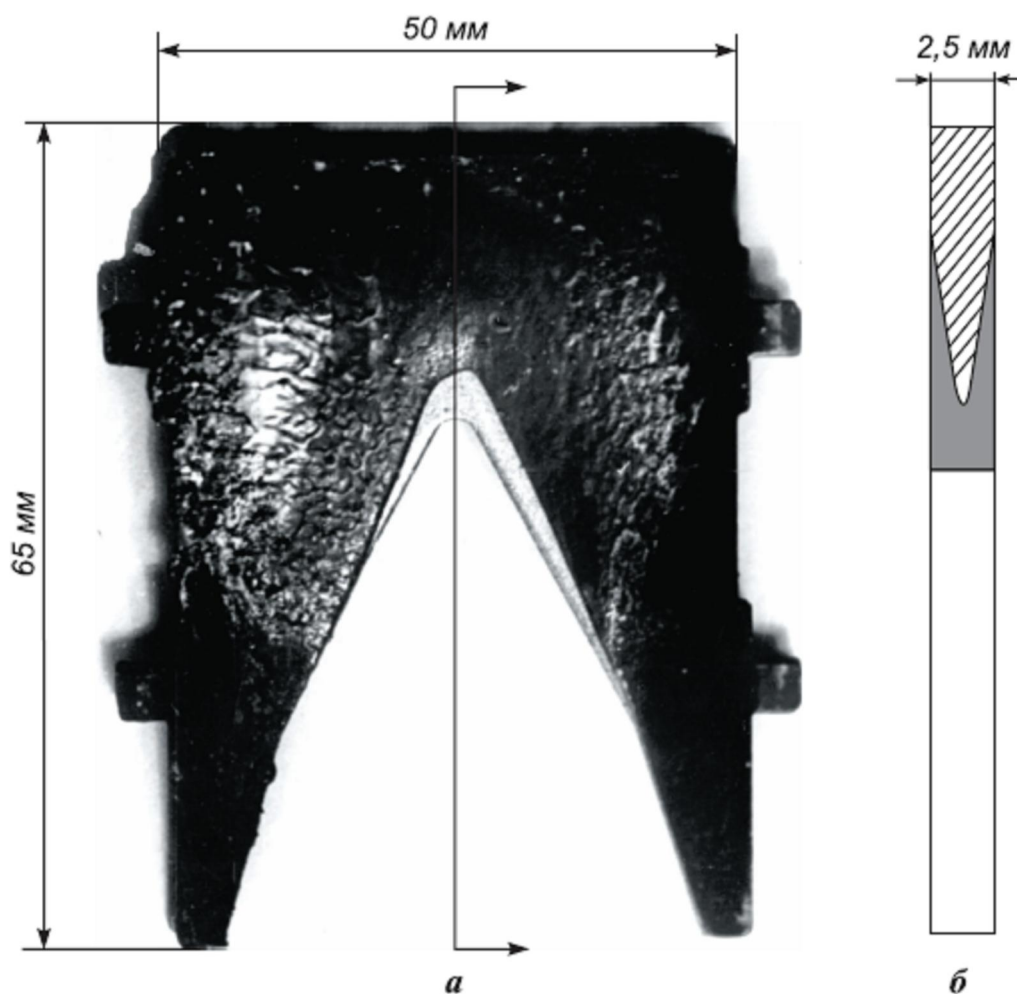
### 3.5. Механизм эрозии деионных пластин дугогасительной решётки

#### 3.5.1. Взрывная эрозия деионных пластин.

На рис. 3.5 показана фотография пластины из дугогасительной камеры после отключения тока КЗ. Для наглядности степени её эрозии снизу, под неё, подложена новая пластина. На рис. 3.5,б схематично показано изображение пластины в разрезе, на котором зачернённая часть – сечение унесённого металла.

На рис. 3.6 приведена осциллограмма тока и напряжения в процессе гашения дуги при отключении тока КЗ быстродействующим выключателем, на котором была установлена камера с деионной пластиной, показанная на рис. 3.5. Максимальное мгновенное значение тока дуги в фазе А достигало  $i_{д.маx}=79,3$  кА. Средняя плотность тока, приходящаяся на площадь одной стороны деионной пластины, равной  $S_{д.пл}=2000$  мм<sup>2</sup>, составляет:

$$j_{ср.д.пл} = \frac{i_{д.маx}}{S_{д.пл}} = \frac{79300 \text{ А}}{2000 \text{ мм}^2} = 39,6 \text{ А/мм}^2.$$



**Рис. 3.5. Частично выгоревшая деионная пластина после отключения тока КЗ. Снизу подложена новая пластина.**

Так как расстояние между деионными пластинами составляла 3 и 5 мм, то дуга в дугогасительной решётке может быть только короткой контрагированной с характерным отношением  $l/r_{on} \ll 1$ . Дуга не проникла полностью в дугогасительную решётку, и площадь её опорного пятна на пластине составила только  $900 \text{ мм}^2$ . Поэтому, фактически, среднее значение плотности тока равно:

$$j_{\text{ф.ср.д.пл}} = \frac{i_{\text{д.макс}}}{S_{\text{он.ф}}} = \frac{79300 \text{ А}}{900 \text{ мм}^2} = 88 \text{ А/мм}^2.$$

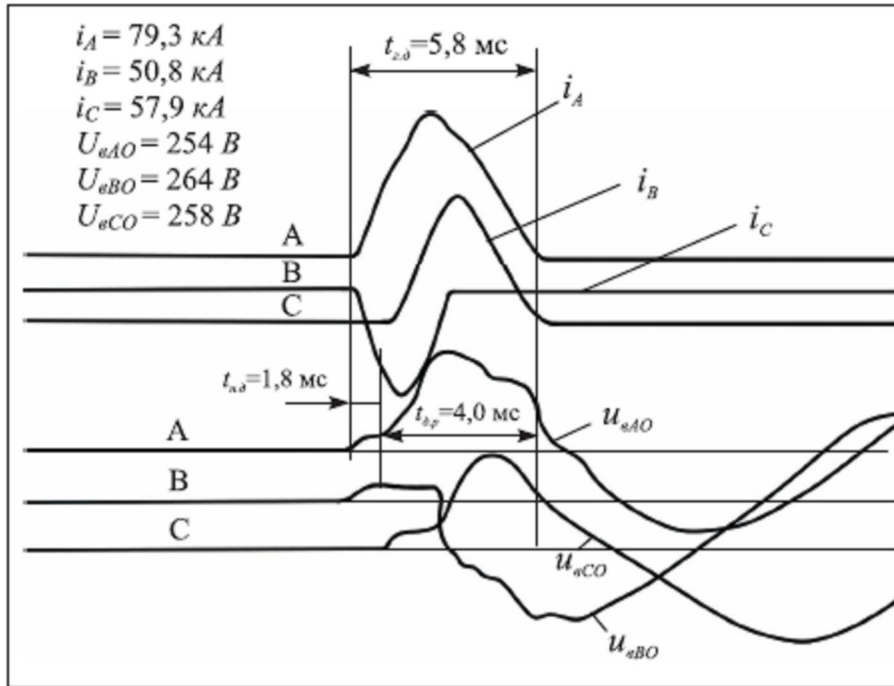


Рис. 3.6. Осциллограмма тока и напряжения при отключении тока КЗ быстродействующим выключателем.

Плотность мощности, приходящая на всю поверхность деионной пластины и на фактическую площадь опорного пятна дуги, составляет соответственно:

$$q_{\text{д.пл}} = \frac{\eta \cdot i_{\text{д.макс}} \cdot \Delta U_{\text{д}}}{2 \cdot S_{\text{д.пл}}} = \frac{0,66 \cdot 79300 \text{ А} \cdot 36 \text{ В}}{2 \cdot 20 \text{ см}^2} = 4,71 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

$$q_{\text{он.ф}} = \frac{\eta \cdot i_{\text{д.макс}} \cdot \Delta U_{\text{д}}}{2 \cdot S_{\text{он.ф}}} = \frac{0,66 \cdot 79300 \text{ А} \cdot 36 \text{ В}}{2 \cdot 9 \text{ см}^2} = 1,05 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Здесь  $\eta = \frac{U_{\text{к}} + U_{\text{а}}}{U_{\text{д}}} = \frac{(15,5 \div 17) \text{ В} + (6 \div 9) \text{ В}}{2 \cdot 36 \text{ В}} = 0,66$  – коэффициент учитываю-

щий долю мощности дуги, приходящей на поверхность электродов;  $U_{\text{к}} = (15,5 \div 17) \text{ В}$  – катодное и  $U_{\text{а}} = (6 \div 9) \text{ В}$  – анодное падения напряжений Fe

### 3.5. Механизм эрозии деионных пластин дугогасительной решётки

[2.6, ч. I, таблица 3.7, с. 281];  $U_{cp.(к+а)}^{Fe} = 23,75 B$  – сумма средних значений приэлектродных падений напряжения  $Fe$ ; число 2 в знаменателе формулы, определяющей  $q_{он.ф}$ , учитывает долю плотности мощности, падающей на поверхность одного электрода, и  $\Delta U_{\delta} = 36 B$  – напряжение на дуге в одном промежутке между деионными платинами из  $Fe$  [2.6, ч. II, рис. 5.47].

Оценим возможность проникновения тепла во внутренние слои тела пластины из  $Fe$  с помощью критерия Био:

$$Bi = \frac{q_{он.ф} \cdot \delta_{\delta.пл}}{\lambda \cdot T_{кун}} = \frac{(1,05 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2) \cdot 10^7 \text{ эрг/(с} \cdot \text{см}^2) \cdot 0,2 \text{ см}}{29 \cdot 10^5 \text{ эрг/(с} \cdot \text{см} \cdot \text{К}) \cdot 3023 \text{ К}} = 24 \gg 1,$$

где  $\delta_{\delta.пл} = 0,2 \text{ см}$  – толщина деионной пластины,  $\lambda = 29 \cdot 10^5 \text{ эрг/(с} \cdot \text{см} \cdot \text{К)}$  – коэффициент теплопроводности ст. 08 при температуре  $1200 \text{ К}$  [3.6, ч. I, таблица 1.23, с. 110],  $T_{кун} = 3023 \text{ К}$   $Fe$  [3.6, ч. I, таблица 1.5, с. 68].

Значение критерия Био  $\gg 1$  означает, что тепло дугового разряда не проникает во внутренние слои тела пластины, а распределяется в тонком слое кипящего металла на поверхности опорного пятна.

Время прогрева поверхностного слоя металла на опорном пятне под воздействием плотности мощности  $q_{он.ф}$  до температуры кипения составляет:

$$\tau_{он.кун} = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot (T_{кун} - T_0)^2}{4 \cdot q_{он.ф}^2} = \frac{\pi \cdot 29 \cdot 10^5 \text{ эрг/(с} \cdot \text{см} \cdot \text{К})}{4}$$

$$\times \frac{0,666 \cdot 10^7 \text{ эрг/(г} \cdot \text{К}) \cdot 6,86 \text{ г/см}^3 \cdot (3023 \text{ К} - 273 \text{ К})^2}{[1,05 \cdot 10^{12} \text{ эрг/(с} \cdot \text{см}^2)]^2} = 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad \text{где}$$

$c = 0,159 \text{ кал/(г} \cdot \text{град}) \cdot 4,19 \cdot 10^7 = 0,666 \cdot 10^7 \text{ эрг/(г} \cdot \text{К)}$  – теплоёмкость ст. 08 при температуре  $1300^\circ \text{C}$  [3.9, с. 162] и  $\rho = 6,86 \text{ г/см}^3$  – плотность  $Fe$  при температуре кипения  $3023 \text{ К}$  [3.6, ч. I, таблица 1.8, с. 69]. Это время хорошо совпало со временем привязки опорного пятна дискретной струйки плазмы, показанной на Рис. 1.16.

$$t_{\delta} \sim 0,7 \text{ мс} \simeq 0,74 \text{ мс} = t_{он.кун}.$$

Время формирования микрократера на расплаве опорного пятна дуги, горячей на деионной пластине из  $Fe$ , равно [3.7, с. 354]:

$$t_{\kappa} = \frac{r_{\kappa}^2}{4 \cdot a_{жс}} = \frac{(10 \cdot 10^{-4} \text{ см})^2}{4 \cdot 0,07 \text{ см}^2/\text{с}} = 3,57 \cdot 10^{-6} \text{ с},$$

где  $r_k=10 \cdot 10^{-4}$  см – наибольшее значение радиуса микрократеров на поверхности пластины из ст. 08 и  $a_{жс}=0,07$  см<sup>2</sup>/с – коэффициент температуропроводности жидкого Fe [3.7, таблица 7.2, с. 123].

Из приведённых результатов расчётов следует, что под воздействием плотности мощности на опорное пятно дуги  $q_{он.ф} \simeq 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> на нём образуется тонкий слой жидкого металла и вполне возможно протекание поверхностного пузырькового кипения с образованием кратеров. На рис. 3.7 приведены электронномикроскопические снимки фрагментов эрозионного поражения деионной пластины из рис. 3.5. Эрозия пластины после 3<sup>х</sup>-кратного воздействия дуги характеризуется глубоким поражением в виде усечённых **конусов эрозии** со сложной топологией, диаметры которых достигают 90 мкм, микрократеров с диаметрами до 20 мкм и наличием большого количества микрокапель на их поверхности.

Наличие микроволн на внутренних поверхностях конусов эрозии и кратеров и многочисленных шарообразных частиц продуктов эрозии диаметра 1÷5 мкм подтверждает образование их в результате взрывных процессов в микропузырьках на кипящем расплаве и является их характерной особенностью.

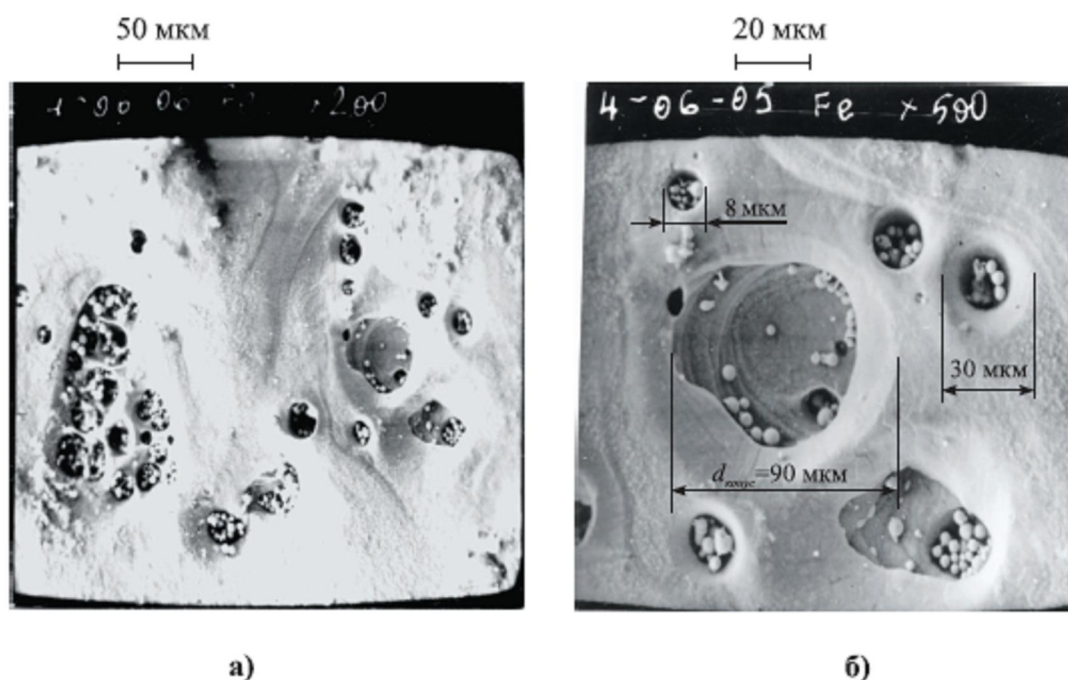


Рис. 3.7. Фрагменты эрозионного поражения деионной пластины из рис. 3.5: а -  $\times 200$ ; б -  $\times 500$ .  $I_{д.мах}=79,3$  кА.

Масса новой пластины  $M_{д.пл.}$ , показанной на рис. 3.5, составляет 51,6 г. После трёхкратного отключения тока КЗ масса деионной пластины  $M_{д.пл.эр}$  оказалась равной 47,7 г. Унос массы металла деионной пластины после однократного отключения тока КЗ, следовательно, составил:

### 3.5. Механизм эрозии деионных пластин дугогасительной решётки

$$\Delta M_{\text{эр.д.пл}} = \frac{M_{\text{д.пл}} - M_{\text{д.пл.эр}}}{3} = \frac{51,6 \text{ г} - 47,7 \text{ г}}{3} = 1,3 \text{ г}.$$

Определим электро- и теплофизические свойства короткой контрагированной дуги в одном промежутке дугогасительной решётки с расстоянием между деионными пластинами 5 мм при отключении тока  $i_{\text{д,max}}=79,3 \text{ кА}$ . На рис. 3.6 показано, что время гашения дуги  $t_{\text{г,д}}$  в фазе А составляет 5,8 мс, которое складывается из времени неподвижности дуги на контактах  $t_{\text{н,д}}=1,8 \text{ мс}$  и времени нахождения дуги в дугогасительной решётке  $t_{\text{д,р}}=4,0 \text{ мс}$ . Поскольку ток в процессе гашения дуги изменялся, разделим  $t_{\text{д,р}}$  на интервалы  $\Delta t=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  и определим среднее значение тока дуги  $i_{\text{д}}$  за каждый интервал  $\Delta t$  (таблица 3.3). Напряжение в приэлектродной области примем для Fe равным [3.6, ч. II, рис. 5.47]:

$$\Delta U_{\text{эл}} = \frac{U_{\text{ср.(к+а)}}}{2} = \frac{23,75}{2} = 11,87 \text{ В}.$$

Удельную электропроводность приближённо определим по формуле:

$$\sigma = \frac{i_{\text{д}} \cdot l}{S_{\text{он}} \cdot \Delta U_{\text{эл}}},$$

где  $i_{\text{д}}$  – в А;  $l=0,5 \text{ см}$ ,  $S_{\text{он}}=9,0 \text{ см}^2$ .

Средняя плотность тока в опорном пятне:

$$j_{\text{он}} = \frac{i_{\text{д}}}{S_{\text{он}}}.$$

Избыточное давление в приэлектродной области дуги:

$$P_{\text{д}} = 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot j_{\text{он}} \cdot i_{\text{д}} \text{ атм},$$

где  $j_{\text{он}}$  – в А/см<sup>2</sup> и  $i_{\text{д}}$  – в А.

Эффективную температуру в приэлектродной области дуги оценим по удельной электропроводности  $\sigma$  при давлении  $P_{\text{д}}$  с помощью графиков [3.6, ч. I, рис. П.3.2, с. 335].

Степень ионизации паров Fe  $x_e$  при  $P_{\text{д}}$  получим из данных, приведённых в [3.6, ч. I, Приложение 1, с. 325]. Концентрацию нейтральных атомов в парах Fe  $n_0$  определим по формуле:

$$n_0 = n_{\text{кин}} \cdot \frac{T_{\text{кин}} \cdot P_{\text{д}}}{T_{\text{эф}} \cdot P_0}$$

с использованием  $pT$ -диаграммы [3.6, ч. I, рис. 1.5, с. 71, таблица 1.8, с. 69]. Концентрация электронов равна:

$$n_e = n_0 \frac{x_e}{1 + x_e}.$$

Направленная скорость электронов:

$$v_e = 0,593 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{\Delta U} = 0,593 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{36 B} = 3,56 \cdot 10^8 \text{ см/с},$$

где  $\Delta U=36 B$  – напряжение на дуге при расстоянии между электродами 5 мм [3.6, ч. I, рис. 5.47].

Результаты расчётов параметров плазмы в канале короткой контрагированной дуги в одном промежутке деионной решётки при отключении тока  $i_{d.max}=79,3 \text{ кА}$  приведены в таблице 3.3.

Оценим электрические параметры микроструек плазмы, истекающих из кратеров, которые образуются на расплаве опорного пятна дуги.

Ток, возникающий в результате взрыва микропузырька и протекающий через кратер  $i_k$ :

$$i_k = j_n \cdot S_k,$$

где за  $S_k = \pi \cdot r_k^2 = \pi \cdot (4 \cdot 10^{-4} \text{ см})^2 = 50,2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2$  примем первоначальную среднюю площадь микрократеров, из которых в результате взрывов микропузырьков образуются конусы эрозии (рис. 3.7,б).

Плотность тока в микроструйке плазмы:

$$j_n = 3,34 \cdot 10^{-10} \cdot e \cdot n_e \cdot v_e \text{ А/см}^2,$$

где  $e=4,8 \cdot 10^{-10}$  ед. СГС – заряд электрона;  $n_e$  – концентрация электронов,  $\text{см}^{-3}$ , и  $v_e$  – их скорость,  $\text{см/с}$ .

Плотность мощности, приходящая на один кратер:

$$q_k = \frac{i_k \cdot \Delta U_{эл}}{S_k} \text{ Вт/см}^2,$$

где  $i_k$  – в А,  $\Delta U_{эл}$  – в В,  $S_k$  – в  $\text{см}^2$ .

Избыточное давление в микроструйке плазмы, извергающейся из взрывающего микропузырька:

$$P_{см} = 9,87 \cdot 10^{-9} \cdot j_n \cdot i_k \text{ атм.}$$

На опорном пятне дуги одновременно функционирует  $n_k = \frac{i_d}{i_k}$  кратеров:

Время цикла функционирования микропузырька примем равным:

$$t_u \simeq \frac{r_k^2}{4 \cdot a} = \frac{(4 \cdot 10^{-4})^2}{4 \cdot 0,07 \text{ см}^2/\text{с}} = 5,71 \cdot 10^{-7} \text{ с},$$

где  $r_k=4 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  – среднее значение начального радиуса микрократера,  $a=0,07 \text{ см}^2/\text{с}$  – коэффициент температуропроводности жидкого Fe. За интервал времени  $\Delta t=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  на одном месте может повторяться

$n_u = \frac{\Delta t}{t_u} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}}{5,71 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 876$ . циклов функционирования микропузырьков:



### 3.5. Механизм эрозии деионных пластин дугогасительной решётки

Число  $N_{\Delta t}$  взорвавшихся микропузырьков на опорном пятне дуги за время  $\Delta t = 0,5 \cdot 10^{-3}$  с равно  $N_{\Delta t} = n_u \cdot n_k = 876 \cdot n_k$ .

**Таблица 3.3. Электро- и теплофизические характеристики короткой контрагированной дуги в одном промежутке решётки с расстоянием между деионными пластинами 5 мм при отключении тока  $i_{d,max}=79,3$  кА и микроструек плазмы.**

$\Delta t, 10^{-3}$ с	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$i_d, \text{кА}$	68	79,3	68	62	54	44	24	8
$\sigma, (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$	102	119	102	93	81	66	36	12
$j_{on}, 10^3, \text{А/см}^2$	7,56	8,81	7,56	6,89	6,0	4,89	2,67	0,89
$P_d, \text{атм}$	5,07	6,90	5,07	4,22	3,2	2,12	0,63	0,07
$T_{эф}, \text{К}$	14000	14500	14000	12800	11400	9800	7600	6000
$x_e$	0,9	0,9	0,9	0,84	0,72	0,43	0,13	0,024
$n_0, 10^{18}, \text{см}^{-3}$	4,61	5,8	4,61	4,34	3,92	3,38	2,28	1,9
$n_e, 10^{18}, \text{см}^{-3}$	2,18	2,75	2,18	1,98	1,64	1,02	0,26	0,045
$j_n, 10^8, \text{А/см}^2$	1,092	1,377	1,092	0,991	0,821	0,511	0,130	0,023
$i_k, \text{А}$	54,8	69,1	54,8	49,7	41,2	25,6	0,65	0,11
$q_k, 10^8, \text{Вт/см}^2$	12,9	16,3	12,0	11,7	9,7	6,0	0,15	0,026
$P_{см}, \text{атм}$	58,7	93,9	58,7	48,3	33,2	12,8	0,08	0,002
$n_k$	1241	1147	1241	1247	1311	1719	–	–
$N_{\Delta t}, 10^4$	108,71	100,48	108,71	109,24	114,84	150,58	–	–
$\Sigma N_{\Delta t}, 10^4$	692						–	–

Результаты расчётов сведены в таблицу 3.3. Из данных таблицы 3.3 видно, что например, плотность мощности  $q_k$ , приходящая на микрократер, и избыточное давление  $P_{см}$  в микроструйке плазмы, извергающейся из микропузырька, в конце процесса гашения дуги резко падают. Отсюда следует, что в конце процесса гашения дуги пузырьковое кипение на опорном пятне прекращается.

При определении общего числа конусов эрозии, которые образуются в процессе гашения дуги на одной деионной пластине, были учтены только те, у которых избыточное давление в микроструйках плазмы превышало 10 атм (табл. 3.3).

Общее число конусов эрозии на обеих сторонах деионной пластины:

$$2 \sum N_{\Delta t} = 2 \cdot 692 \cdot 10^4 = 1384 \cdot 10^4.$$

Объём конуса равен:

$$V_{\text{кон}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot R_{\text{кон}}^2 \cdot h = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot (45 \cdot 10^{-4} \text{ см})^2 \cdot 8 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3,$$

где  $R_{\text{кон}} = 45 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  и  $h = d_k = 8 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  (рис. 3.7).

Масса единичного конуса эрозии жидкого *Fe* при температуре его кипения составляет:

$$m_{\text{эр.кон}} = \rho_{\text{ж}} \cdot V_{\text{кон}} = 6,863 \text{ г/см}^3 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 = 11,67 \cdot 10^{-8} \text{ г},$$

где  $\rho_{\text{ж}} = 6,863 \text{ г/см}^3$  – плотность жидкого железа при температуре кипения [3.6, ч. I, таблица 1.8, с. 69 и рис. 1.5, с. 71].

Масса унесённого металла с поверхности деионной пластины при однократном отключении тока КЗ составляет:

$$M_{\text{д.пл.эр}} = m_{\text{эр.кон}} \cdot 2 \cdot \sum N_{\Delta t} = 11,67 \cdot 10^{-8} \text{ г} \cdot 1384 \cdot 10^4 = 1,61 \text{ г}.$$

По экспериментальным данным, масса унесённого металла деионной пластины при однократном отключении тока  $i_{\text{д.мах}} = 79,3 \text{ кА}$  составляет 1,3 г. Расчётное значение массы унесённого металла достаточно удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными. Погрешность расчёта для инженерной практики вполне приемлема.

Многokратные испытания выключателей разных типов и производителей на наибольшую отключающую способность, оснащённых дугогасительными решётками, в которых расстояния между пластинами приняты равными 3÷5 мм, показали, что пластины подвергаются сильному оплавлению с частичным их выгоранием (рис. 3.5) и короблению. На поверхности деионных пластин образуются наплывы жидкого металла, которые нередко приводят их к переключению.

#### 3.5.2. Дискретное поражение пластин.

В [3.6, ч. I, рис. 21, с. 40] показана дугогасительная камера выключателей на 4000 и 6300 А номинального тока, наибольшая отключающая способность кото-

### 3.5. Механизм эрозии деионных пластин дугогасительной решётки

рых при номинальном напряжении 380 В составляет, соответственно, 65 и 115 кА действующего значения. На рис. 1.18 приведена осциллограмма тока и напряжения при отключении тока в контуре 65 кА в операции О. Максимальное мгновенное значение тока дуги оказалось в фазе В и составило  $i_{d,max}=79,4$  кА.

На рис. 1.19 показаны деионные пластины после отключения тока 65 кА в режиме О-ВО-ВО. Расстояние между деионными пластинами в решётке составляло 17 мм, дуга полностью входила в решётку и приобретала диффузную форму с расщеплённым ядром. Дискретные эрозионные следы дуги равномерно распределены по всей площади пластин. Эрозия пластин оказалась поверхностной и незначительной, практически без потери её массы.

В случае диффузной дуги с расщеплённым ядром дискретные следы эрозии достаточно равномерно располагаются по всей поверхности деионных пластин. Подобное их распределение вызывает электрическое поле, которое достаточно однородно в промежутке между деионными пластинами, имеющих прямоугольную форму и относительно большую площадь. Электрическое поле, в таком случае, способствует равномерному распределению линий тока по всей площади электрода, и краевые его искажения практически не влияют на их распределение. Если деионные пластины имеют относительно малую площадь и, тем более, они имеют вырезы, то краевые искажения поля концентрируют линии тока на их кромках, повышая локальную плотность тока. Увеличение плотности тока на кромках деионных пластин приводит к более интенсивной их эрозии.

На рис. 1.21 приведены электронномикроскопические фотографии отдельных зон эрозионного поражения из рис. 1.19.

Сравнивая изображения эрозионных следов дуги на рис. 3.27, б и на рис. 1.21, б и в при одном и том же увеличении ( $\times 500$ ) и значении тока  $i_{d,max}\simeq 79,0$  кА, видны существенные различия между ними. Во-первых, при расстояниях между деионными пластинами  $l=3\div 5$  мм (короткая контрагированная дуга) наблюдается большая глубина поражения и конусы эрозии, а при расстояниях  $l=17$  мм (диффузная дуга с расщеплённым ядром) – поверхностное поражение и кратеры. Во-вторых, при  $l=3\div 5$  мм диаметр конусов эрозии достигает 90 мкм, а при  $l=17$  мм диаметры кратеров не превышают 15 мкм. В-третьих, при  $l=17$  мм на поверхности эрозионного поражения практически отсутствуют капли продуктов эрозии, а при  $l=3\div 5$  мм наблюдается большое количество каплеобразных частиц.

По результатам расчётов параметров микроструек плазмы, истекающих из кратеров на опорном пятне дискретной струйки плазмы на аноде диффузной дуги с расщеплённым ядром, плотность тока составляет  $j_a=9,63\cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>, ток  $i_a=3,7$  А и избыточное давление  $P_k=0,35$  атм (см. параграф 1.4).

Очевидно, избыточное давление в микроструйке плазмы, истекающей из микропузырька, равное 0,35 атм, не может привести к образованию конуса эрозии на опорном пятне при взрыве микропузырька и, следовательно, к значительному поражению поверхности деионных пластин.

Таким образом, короткая контрагированная дуга наносит деионным пластинам глубокое эрозионное поражение со сплошным оплавлением их поверхности и уносом значительной массы металла. На поверхности опорного пятна дуги образуются кратеры в форме конусов с диаметром до 90 мкм и масса металлических частиц шарообразной формы, диаметры которых составляют  $\sim 1,0 \div 5,0$  мкм.

Диффузная дуга с расщеплённым ядром наносит деионным пластинам поверхностное дискретное эрозионное поражение. На поверхности опорных пятен дискретных струек плазмы наблюдаются кратеры с диаметром до 15 мкм с ровными заоваленными краями. Металлические частицы эрозии деионных пластин на их поверхности отсутствуют.

## Выводы к главе 3

Проведённые экспериментальные и теоретические исследования эрозии серебросодержащих контактов и деионных пластин дугогасительных решёток низковольтных автоматических выключателей при отключении токов КЗ и опубликованные работы ряда авторов дают возможность сделать следующие выводы.

3.1. Эрозию размыкаемых контактов составляют мостиковая и паровая, и жидкометаллическая фракции.

3.2. Жидкометаллический мостик может быть разрушен либо спокойным испарением, либо взрывообразно:

- при  $\frac{\Delta Q_{оп.м}}{S_{оп.м}} = \frac{\Delta Q_{кан}}{S_{бок}} \leq 300 \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{см}^2$  – мостик испаряется;
- при  $\frac{\Delta Q_{оп.м}}{S_{оп.м}} = \frac{\Delta Q_{кан}}{S_{бок}} \geq 3000 \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{см}^2$  – мостик взрывается.

3.3. Паровая фракция эрозии контактов составляет  $n \cdot 10^{-3}$  г:

- для катода  $n$  – десятки единиц;
- для анода  $n$  – сотни единиц.

3.4. Жидкометаллическая фракция эрозии контактов составляет единицы грамм.

3.5. Паровая фракция эрозии контактов может составить к общей массе их эрозии до 15%.

3.6. Основную долю эрозии катода составляет паровая фракция, которая может достигать 90% к общей массе его эрозии.

### 3.5. Механизм эрозии деионных пластин дугогасительной решётки

3.7. Основную форму эрозии анода составляют конусы эрозии и его жидкометаллическая фракция может достигать 92% к общей массе эрозии анода.

3.8. Короткая контрагированная дуга наносит глубокое эрозионное поражение деионным пластинам дугогасительной решётки в виде конусов эрозии с уносом значительной доли его массы.

3.9. Диффузная дуга с расщеплённым ядром наносит деионным пластинам дугогасительной решётки дискретное поверхностное незначительное эрозионное поражение.

### **Список литературы к главе 3**

3.1. *Раховский, В. И.* Разрывные контакты электрических аппаратов / В. И. Раховский, Г. В. Левченко, О. К. Теодорович. – М.; Л.: Энергия, 1966.

3.2. *Рывкин, А. М.* Износ сильноточных контактов под действием дуги отключения переменного тока / А. М. Рывкин // *Электричество*. – 1971. – №8.

3.3. *Белкин, Г. С.* Методика расчёта величины эрозии сильноточных контактов под воздействием электрической дуги / Г. С. Белкин // *Электричество*. – 1972. – №1.

3.4. *Буткевич, Г. В.* Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов / Г. В. Буткевич, Г. С. Белкин, Н. А. Ведешенков, М. А. Жаворонков. – М.: Энергия, 1978.

3.5. *Жаворонков, М. А.* Оценка коэффициента выброса при расчёте эрозии сильноточных контактов / М. А. Жаворонков, Г. Г. Нестеров, Е. И. Тайвер // *Известия вузов. Электромеханика*. – 1981. – №10.

3.6. *Мещеряков, В. П.* Электрическая дуга большой мощности в выключателях / В. П. Мещеряков. – Ульяновск; часть I, 2006; часть II, 2008.

3.7. *Месяц, Г. А.* Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга / Г. А. Месяц. – М.: Наука, 2000.

3.8. *Полежаев, Ю. В.* Тепловая защита / Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич. – М.: Энергия, 1976.

3.9. *Физические величины: справочник* / Под редакцией *И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова*. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

## Приложение

### К вопросу о выборе серебросодержащих контактов для автоматических выключателей

Выбор нужного контактного материала для выключателей с заданными электрическими и механическими характеристиками является трудной задачей. Для оценки возможности и границ применения выбранного материала в качестве электрического контакта требуются, во-первых, определённые знания основ физики твёрдого тела, металловедения и дугового разряда. Во-вторых, решение этой задачи затрудняет отсутствие исчерпывающих данных о характеристиках этих материалов в каталогах и ТУ на контакты, а также в опубликованных трудах по исследованию воздействия на контактные материалы механических и тепловых нагрузок дуговых разрядов разной мощности. Например, при определении времени достижения расплавом на опорном пятне дуги отключения температуры плавления и кипения необходимы данные о значениях для контактных материалов  $\lambda$  – коэффициента теплопроводности,  $c$  – удельной теплоёмкости и  $\rho$  – плотности при этих температурах. Эти данные при температуре кипения для *Ag*, *Cu*, *Ni*, *Fe* и других металлов отсутствуют. Для *Ag* и *Ni*, например, также отсутствуют  $pT$ -диаграммы с учётом их состояния в паровой фазе.

Для металлокерамических композиционных контактов в ТУ приводятся данные их плотности и удельного электрического сопротивления только для нормальных условий атмосферы. Такие данные как коэффициент теплопроводности и твёрдость по Бринеллю в ТУ практически не приводятся.

В настоящее время существует достаточно большое число модификаций композиционных контактов, состоящих из двух, трёх и более компонентов. Их свойства были изучены экспериментально, по результатам которых выработаны рекомендации по их применению. Существующие композиционные контакты применяются в широком диапазоне номинальных токов выключателей, вплоть до 10000 А.

Однако исследования процессов гашения дуги многих авторов в широком диапазоне токов показали, по крайней мере, на два их недостатка:

- длительная неподвижность дуги на размыкаемых контактах;
- применение графита приводит к снижению эрозионностойкости контактов, скорости восстановления электрической прочности межконтактного зазора после погасания дуги в бестоковой паузе при переходе тока через ноль и электрического сопротивления изоляции полюсов выключателя при разомкнутых его контактов после многократного отключения номинальных токов и токов КЗ.

Контактные материалы для автоматических выключателей должны обладать:

- высокой электропроводностью;
- высокой эрозионностойкостью;
- низкой твёрдостью;
- высокой теплопроводностью;
- низкой температурой плавления и кипения;
- высоким напряжением к свариванию;
- низкой работой выхода электронов;
- способностью к быстрому восстановлению электрической прочности межконтактного зазора;
- способностью обеспечивать с большой скоростью расширение опорных пятен дуги и перемещение её по контактам.

Однако механические и тепло- и электрофизические свойства компонентов контактов и их паров часто входят в противоречия, что существенно затрудняет выбор существующих контактных материалов и аналитический поиск их сочетаний в проектируемых композиционных контактах с заданными свойствами. Общие закономерности взаимного влияния компонентов более или менее просматриваются для композиционных контактов, состоящих из двух компонентов, которые, как правило, имеют противоположные свойства.

## П.1 Контактное переходное сопротивление

Кратко изложим основные положения, определяющие контактное переходное сопротивление.

Включение контактного соединения выключателя в электрическую цепь вызывает введение в неё дополнительного переходного сопротивления  $R_k$ , на котором в результате протекания тока возникает падение напряжения  $u_k$ , равное [1]:

$$u_k = I \cdot R_k = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot a},$$

где  $R_k = \frac{\rho}{2a}$  – контактное переходное сопротивление, Ом;  $\rho$  – удельное сопротивление металла контактов, Ом·см;  $a$  – радиус кругового пятна контакта, см.

Плотность тока в пятне контактирования распределяется неравномерно по его площади и определяется по закону:

$$j(r) = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sqrt{a^2 - r^2}}.$$

Здесь  $r$  – расстояние от центра пятна. Согласно этому закону максимальная плотность тока наблюдается на периферии пятна.

Для контактов «сфера-сфера» и «сфера-плоскость», значение радиуса пятна контактирования достаточно точно можно определить по формуле:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot P_k \cdot \left( \frac{1 - \sigma_1^2}{E_1} + \frac{1 - \sigma_2^2}{E_2} \right) \cdot \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)^{-1}},$$

где  $P_k$  – контактное нажатие, кг;  $\sigma_{1,2}$  – коэффициент Пуассона обоих контактов;  $E_{1,2}$  – модуль упругости обоих контактов, кг/см<sup>2</sup>;  $r_{1,2}$  – радиус кривизны контактов, см.

Для пары контактов *Ni-Ni* и *Cu-Cu*, для которых коэффициент Пуассона  $\approx 0,3$ , имеющих форму сфера-плоскость:

$$a = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_k \cdot r}{E}}.$$



Для пары контактов  $Ag-Ag$ , у которых  $r_1 = r, r_2 = \infty$  (плоскость),  $E_1 = E_2 = E$  и  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,4$  формула, определяющая переходное сопротивление, принимает вид:

$$R_{\kappa} = 0,58\rho \cdot \sqrt[3]{\frac{E}{P_{\kappa} \cdot r}}.$$

Увеличение переходного сопротивления  $R_{\kappa}$  в результате повышения температуры в области стягивания тока определяется из соотношения:

$$\frac{R_{\kappa}(T_0)}{R_{\kappa}(T_{\max})} = \frac{\alpha}{\varepsilon} \cdot \frac{2}{u_{\kappa}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot \lambda_0}{\varepsilon}} \cdot \arctg\left(\frac{u_{\kappa}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho_0 \cdot \lambda_0}}\right) + \frac{\beta}{\varepsilon},$$

где  $R_{\kappa}(T_0)$  – переходное сопротивление без нагрева, Ом;  $R_{\kappa}(T_{\max})$  – переходное сопротивление в нагретом состоянии, Ом;  $u_{\kappa}$  – контактное напряжение, В;  $\rho_0$  – удельное сопротивление металла контакта при температуре  $T_0$ , Ом·см;  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности металла контакта при температуре  $T_0$ , Вт/(см·К);  $\alpha$  – температурный коэффициент удельного сопротивления при температуре  $T_0$ , 1/К;  $\beta$  – температурный коэффициент теплопроводности при температуре  $T_0$ , 1/К;  $\varepsilon$  – определяется из выражения:

$$\rho \cdot \lambda = \rho_0 \cdot \lambda_0 [1 + \varepsilon(T_{\max} - T_0)] \approx \alpha + \beta.$$

Процессы деформации контактов очень сложны, так как пластичный металл не только растекается в стороны, но и деформируется в глубину. После многократных механических соударений контактов их поверхность упрочняется и происходит так называемый «наклёп». В таком случае поверхностный слой контактов приобретает более высокую твёрдость  $H$ .

Связь контактного нажатия с площадью контактного пятна выражается формулой:

$$P_{\kappa} = \pi \cdot a^2 \cdot H,$$

## Приложение. К вопросу о выборе... контактов...

где  $H$  – «контактная твёрдость» металла контактов,  $кг/см^2$ . Из последней формулы следует, что  $a = \sqrt{\frac{P_k}{\pi \cdot H}}$ .

«Контактная твёрдость» неравнозначна технологической. Но она мало отличается от твердости по Бринеллю  $H_B$ . Поэтому в практических инженерных расчётах можно пользоваться значениями  $H_B$ . Переходное сопротивление контактов, имеющих один и тот же металл, может быть определено по формуле, полученной экспериментально:

$$R_k = 0,89\rho \cdot \sqrt{\frac{H_B}{P_k}}. \quad (1.1)$$

Если контакты выполнены из разнородных металлов, то с достаточной точностью для расчётов можно принять формулу:

$$R_k = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \cdot \sqrt{\frac{H_B}{P_k}},$$

где  $\rho_{1,2}$  – удельное сопротивление контактных металлов,  $Ом \cdot см$  и  $H_B$  – твёрдость более мягкого контактного металла,  $кг/см^2$ .

Зависимость максимальной температуры области стягивания тока и падения напряжения  $u_k$  выражается равенством:

$$L \cdot (T_{max}^2 - T_0^2) = \frac{u_k^2}{4},$$

где  $L \approx 3 \cdot 10^{-8}, (B/K)^2$  – коэффициент Лоренца для  $Ag$ , не зависящий от температуры вплоть до температуры его кипения.

Для жидкого  $Ag$  максимальная температура в области стягивания тока может быть определена с точностью  $\pm 10\%$  по формуле:

$$T_{max} \approx 3100 \cdot u_k.$$

Таким образом, предельное значение переходного падения напряжения, при котором происходит плавление  $Ag$ , составляет:

$$u_k = \frac{T_{nl}}{3100} = \frac{1285K}{3100} = 0,41B.$$

Это напряжение определяет тенденцию контактов к свариванию. Сваривание контактов выключателей в основном наблюдается при протекании через них тока короткого замыкания. В таком случае  $u_k$  следует определять по формуле:

$$u_k = i_{y0} \cdot R_k = i_{y0} \cdot \frac{\rho}{2a} = i_{y0} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \sqrt{\frac{P_k}{\pi \cdot H_B}} \quad (1.2)$$

где  $i_{y0} = K\sqrt{2} \cdot I$  – ударный ток короткого замыкания при наличии апериодической составляющей,  $A$ ;  $K$  – коэффициент ударности, значение которого зависит от  $\cos \varphi$  электрической цепи, и  $I$  – действующее значение установившегося тока короткого замыкания,  $A$ .

Таблица 1. Зависимость коэффициента  $\sqrt{2} K$  от  $\cos \varphi$

$\cos \varphi$	0	0,10	0,15	0,2	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	1,0
$\sqrt{2} K$	2,83	2,44	2,30	2,17	2,06	1,96	1,80	1,68	1,58	1,45	1,41

Сваривание серебросодержащих контактов, например, при  $i_{y0} = 100 \text{ кА}$  может произойти, если переходное сопротивление в одном  $a$ -пятне будет составлять:

$$R_k = \frac{u_k}{i_{y0}} = \frac{0,41 \text{ В}}{10^5 \text{ А}} = 4,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} = 4,1 \text{ мкОм} \quad (1.3)$$

Здесь следует иметь в виду, что переходное сопротивление в токоведущей цепи полюса выключателя составляет только его часть. В таблице 2 приводятся данные сопротивления полюсов в зависимости от номинального тока выключателей разных производителей.

Для снижения в одном  $a$ -пятне переходного сопротивления  $R_k$  (формула 1.1) и напряжения  $u_k$  (формула 1.2) очевидно необходимо снижать удельное сопротивление  $\rho$  и контактную твёрдость  $H_B$  материала контактов и создавать достаточное контактное нажатие  $P_k$ .

С целью снижения влияния переходного сопротивления  $R_k$  в одном  $a$ -пятне на сопротивление полюса необходимо один контакт делить на несколько параллельных.

При этом следует иметь в виду, что при включении контактов происходит их вибрация (дребезг), в результате которой может произойти отскок контактов. Опытным путем было установлено, что для устранения дребезга контактов с их

## Приложение. К вопросу о выборе... контактов...

отскоком необходимо на каждом контакте создавать контактное нажатие  $P_k \geq 5 \div 7$  кгс.

**Таблица 2. Сопротивление полюсов в мкОм в зависимости от номинального тока выключателя**

Номинальный ток, А	100	160	250	400	600	1000	1600	2500	4000	6300
Выключатель XS стандарт-ной серии. Terasaki	1030	720	420	180	190	53				
Выключатели Masterpact NT и NW. Merlin Gerin							26		8	5
Выключатели AE стандарт-ной серии SS. Mitsubishi Electric						26	16	8	9	8,5

В зоне *a*-пятна происходит сужение тока, в результате которого возникает электродинамическая сила отброса контактов, равная [2]:

$$F = 1,08 \cdot 10^{-8} \cdot i^2 \ln \left( \frac{S_k}{S_a} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ кгс}, \quad (1.4)$$

где  $i$  – мгновенное значение тока, А;  $S_k = \pi R^2$  – площадь контакта, см<sup>2</sup>;  $S_a = \pi a^2$  – эффективная площадь контактирования, см<sup>2</sup>.

С помощью расчётов по формулам (1.3) и (1.4) необходимо исключить возможность термической приварки и электродинамических отбросов замкнутых контактов при протекании через них ударного тока  $i_{y\partial}$ .

## П.2 Энергетический баланс дуги на контактах и их эрозия

Уравнение энергетического баланса системы «контакты-дуга» во время неподвижности дуги на размыкаемых контактах имеет вид [3]:

$$\Delta W_{\delta} = \Delta Q_{\text{кон}} + \Delta Q_{\text{канал}},$$

где  $\Delta Q_{\text{кон}} = \eta_{\text{эл}} \cdot \Delta W_{\delta} = \frac{U_{\text{к}} + U_{\text{а}}}{u_{\delta}} \cdot \Delta W_{\delta}$  – энергия дуги, поглощаемая контактами

за счёт приэлектродных явлений, и  $\Delta Q_{\text{канал}}$  – энергия канала дуги.

Доля энергии короткой контрагированной дуги, находящейся на размыкаемых контактах в неподвижном положении и поглощаемая ими, может составлять от 75 до 45%. Эту часть энергии можно оценить с помощью геометрического коэффициента распределения энергии дуги за счёт теплоотдачи между контактами и каналом дуги:

$$\eta_{\text{э}} = 1 - \frac{\delta}{r_{\text{он}} + \delta},$$

где  $r_{\text{он}}$  – радиус опорного пятна дуги на контактах и  $\delta$  – раствор контактов. Отношение  $\frac{\delta}{r_{\text{он}} + \delta}$  определяет энергию канала дуги, находящейся в неподвижном положении.

Энергия канала  $\Delta Q_{\text{канал}}$  короткой контрагированной дуги рассеивается в окружающую среду потоками плазмы и излучением.

Согласно классической теории теплопроводности равномерность распределения температуры между наружными и внутренними слоями тела контакта определяется критерием Био:

$$Bi = \frac{q \cdot h}{\lambda \cdot T_p},$$

где  $q = \frac{\eta \cdot i_{\delta} \cdot u_{\delta}}{2S_{\text{он}}}$  – поверхностная плотность теплового потока (плотность мощности),  $\text{Вт}/\text{см}^2$ ; приходящая на опорное пятно дуги площадью  $S_{\text{он}}$ ,  $\text{см}^2$ ;  $h$  – толщина контактной напайки, см;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности металла,  $\text{эрг}/(\text{с} \cdot \text{см} \cdot \text{К})$ ;

## Приложение. К вопросу о выборе... контактов...

$T_p$  – температура разрушения, равная температуре плавления или кипения легкоплавкого компонента контакта,  $K$ .

Как показывают расчёты при нахождении дуги на размыкаемых контактах в неподвижном положении критерий Био  $Bi \gg 1$ . Это означает, что тепло, подводимое к контактам, прогревает только верхний их слой и не проникает внутрь тела контактов. При отключении токов КЗ плотность мощности, приходящая на опорное пятно, составляет  $10^4 \div 10^5 \text{ Вт/см}^2$ . При плотности мощности  $10^5 \text{ Вт/см}^2$  на опорном пятне протекает поверхностное пузырьковое кипение. При взрыве микропузырьков образуются конусы эрозии, сумма элементарных масс которых является основной составной частью эрозии контактов. Внутренняя часть тела контакта прогревается только за счёт джоулева тепла, выделяемого при протекании тока в теле контакта ( $i^2 \cdot r$ ).

Экспериментальные данные и расчёты тока дуги  $i_d$  в процессе её гашения показывают, что за время нахождения дуги на размыкаемых контактах в неподвижном положении из-за низкого её напряжения  $u_d$  относительно напряжения сети  $U_c$ , ток дуги  $i_d$  мало отличается от ожидаемого тока сети  $i_{ож}$ . Поэтому, для предварительной оценки возможной эрозии контактов при разработке новых конструкций выключателей можно воспользоваться упрощённой методикой расчёта эрозии контактов и полуволну тока, во время которой будут размыкаться контакты, разделить на отрезки времени  $\Delta t$  и определить:

- $i_d$  – среднее значение тока за интервал времени  $\Delta t$ ;
- $n_k = i_d / i_k$  – число одновременно функционирующих кратеров (конусов эрозий) на опорном пятне дуги;  $i_k = 280 \text{ А}$  – средний ток струйки плазмы, протекающей через один кратер на опорном пятне короткой контрагированной дуги при отключении тока короткого замыкания;
- $n_u = \Delta t / t_u$  – число циклов функционирующих кратеров на опорном пятне, которые могут возникать на одном месте за интервал времени  $\Delta t$ ,  $t_u = 5,6 \cdot 10^{-8} \text{ с}$  – продолжительность функционирования одного кратера на поверхности контакта из  $Ag$ ;
- $N_{\Delta t} = n_k \cdot n_u$  – число конусов эрозии на опорном пятне дуги, возникающих за время  $\Delta t$ ;

- $\sum N_{\Delta t} = \frac{N_{\Delta t} \cdot t_n}{\Delta t}$  – общее число конусов эрозии на опорном пятне за время

нахождения дуги на контактах  $t_n$ , которое можно определить по осциллограмме тока и напряжения дуги или принять его значение равным  $5,45 \text{ мс}$  – среднестатистическое время неподвижности дуги на контактах;

- $M_{\text{эр.к}} = m_{\text{к.эр}} \sum N_{\Delta t}$  – масса эрозии контакта при одном отключении тока КЗ;

$m_{\text{к.эр}} = 9,9 \cdot 10^{-8} \text{ г}$  – средняя элементарная масса жидкого  $\text{Ag}$  в конусе эрозии;

- $\Delta = M_{\text{эр.к}} / (\rho \cdot S_{\text{он}})$  – толщина слоя твёрдого  $\text{Ag}$ , уносимого с площади опорного пятна дуги:  $S_{\text{он}} = i_{\text{д}} / j_{\text{он}}$  – средняя площадь опорного пятна дуги;  $j_{\text{он}} = 10^4 \text{ А/см}^2$  – средняя плотность тока в опорном пятне дуги на контактах при протекании тока КЗ;  $\rho = 10,5 \text{ г/см}^3$  – плотность твёрдого  $\text{Ag}$  при нормальных условиях.

Значения  $i_{\text{к}} = 280 \text{ А}$ ;  $t_{\text{ц}} = 5,6 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ;  $m_{\text{к.эр}} = 9,9 \cdot 10^{-8} \text{ г}$ ;  $j_{\text{он}} = 10^4 \text{ А}$  получены либо расчётным, либо экспериментальным путём [3].

Для снижения эрозии контактов необходимо придать им скорость размыкания не менее  $6,5 \text{ м/с}$ . При такой скорости размыкания контактов время неподвижности дуги составит не более  $t_n \simeq 1,0 \text{ мс}$ , вместо  $5,45 \text{ мс}$ , равного среднестатистическому времени неподвижности дуги при размыкании контактов со скоростью  $1,5\text{-}2,0 \text{ м/с}$ .

Доля паров металла контактов при отключении токов КЗ в их электрическом износе мала. Поэтому её в расчёте эрозии контактов принимать нет необходимости.

Введение в композиционные контакты компонентов, у которых температура кипения и потенциал ионизации будет выше, а коэффициент теплопроводности ниже, чем у  $\text{Ag}$ , приведёт к более высокой температуре на опорном пятне и в канале дуги, что, в свою очередь, вызовет увеличение электрической эрозии контактов. Например, плотность тока в свободно горящей дуге на электродах  $\text{Cu-Cu}$  составляет  $(1,0\text{-}1,6) \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$ ,  $\text{Ni-Ni}$  –  $(1,6\text{-}2,0) \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$ ,  $\text{Zn-Zn}$  –  $(3,3\text{-}3,8) \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$ .

Следует также иметь в виду, что снижение плотности (увеличение пористости) металлокерамических контактов может привести к значительному снижению коэффициента теплопроводности.

Введение в медные контакты  $\approx 5\%$  цезия ( $\text{Cs}$ ) снижает падение напряжения на дуге на  $\approx 25\%$ , что приводит к снижению плотности мощности на опорное пятно и соответственно уменьшает эрозию контактов [4].

### П.3. Восстанавливающаяся электрическая прочность дугового промежутка

Тепло- и электрофизические свойства металла контактов и их паров существенно влияют на восстанавливающуюся электрическую прочность дугового канала.

Повторные зажигания дуги в результате электрических пробоев между контактами возникают в бестоковой паузе при естественном переходе тока через ноль, при выходе дуги на рога и при входе её в дугогасительную решётку.

В опубликованных работах рассматривают восстановление электрической прочности в коротких и длинных отключающих промежутках. К коротким промежуткам относят те, у которых процесс восстановления электрической прочности после перехода тока через ноль в отключающем зазоре происходит в тонком газовом слое, примыкающем к поверхности катода, и на его поверхности. При этом имеется в виду, что эмиссия электронов может происходить как под действием высокой температуры поверхности катода (термоэлектронная эмиссия), так и под действием высокой напряжённости поля (автоэлектронная эмиссия). В низковольтной дуге отключения возможна только термоэлектронная эмиссия.

На рис. П.1 схематично показано изменение напряжения пробоя при двух значениях зазора между электродами и восстанавливающегося напряжения во времени [5].

Из рис. П.1 видно, что при коротком зазоре ( $\delta_1 < \delta_2$ ) электрическая прочность отключающего промежутка растёт быстрее, чем при более длинном, при котором происходит пробой (точка *a*).

Признано, что более высокая электрическая прочность коротких дуговых промежутков, чем длинных, обеспечивается за счёт отвода большего количества энергии, выделенного в зазоре между контактами в электроды, чем в канал дуги. Доля энергии, отводимой в электроды за счёт теплоотдачи, определяется формулой [3]:

$$\eta_2 = 1 - \frac{\delta}{r_{on} + \delta},$$

где  $\eta_2$  – геометрический коэффициент, определяющий долю энергии, выделенной в дуговом промежутке, отводимой в оба электрода,  $\delta$  – раствор контактов,  $r_{on}$  – радиус опорного пятна дуги или остаточной плазмы её канала и отношение



$\delta/(r_{on}+\delta)$  – доля энергии, которая составляет энергию канала дуги или её остаточной плазмы.

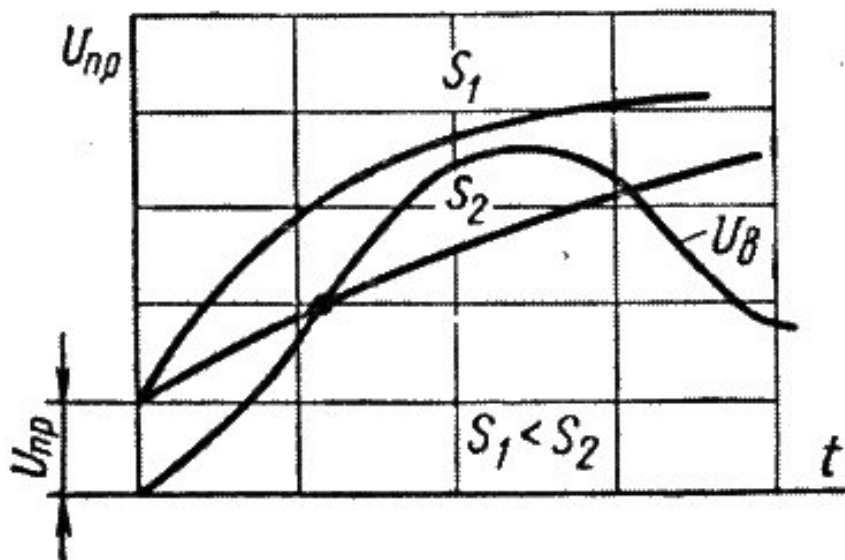


Рис. П.1 [5]. Рост электрической прочности в коротких промежутках при различных расстояниях между электродами.

Если, например, принять  $r_{on}=3,0$  мм и для одного случая –  $\delta=1,0$  мм и для другого –  $\delta=7,0$  мм, то тогда получим:

$$1) \eta_2 = 1 - \frac{1,0 \text{ мм}}{3,0 \text{ мм} + 1,0 \text{ мм}} = 0,75;$$

$$2) \eta_2 = 1 - \frac{7,0 \text{ мм}}{3,0 \text{ мм} + 7,0 \text{ мм}} = 0,3.$$

То есть в первом случае оба контакта поглотили бы 75% энергии, выделяемой дугой, а во втором – только 30%.

Действительно, чем меньше зазор между электродами, тем большее количество энергии дуги отбирается ими. Однако следует заметить, что, чем больше энергии будет поглощаться электродами, тем выше будет температура их поверхности. Предельной температурой нагрева металла на опорном пятне дуги является его температура кипения. При достижении слоем расплава на опорном пятне температуры кипения при продолжении поступления энергии опорное пятно будет расширяться и увеличиваться масса его расплава.

Очевидно, что после прекращения подачи энергии процесс деионизации плазмы протекает за более короткое время, чем её остывание, а остывание

## Приложение. К вопросу о выборе... контактов...

расплава металла на опорном пятне дуги после её погасания происходит за ещё более длительное время, чем остывание плазмы. Поэтому можно принимать температуру плазмы в процессе её деионизации постоянной и равной той, которая была перед прекращением подачи энергии [6].

Процесс деионизации плазмы происходит как на поверхности опорного пятна дуги, так и в её объёме.

Время полной рекомбинации электронов на поверхности опорного пятна дуги можно определить по формуле [3]:

$$t_{p.on} = \frac{4 \cdot \delta}{v_e},$$

где  $\delta$  – раствор контактов, см;  $v_e$  – средняя тепловая скорость электронов, см/с.

Время рекомбинации заряженных частиц в объёме канала дуги составляет [6]:

$$t_{p.ob} \simeq \frac{1}{\beta \cdot n_{e.o}},$$

где  $\beta$  – коэффициент рекомбинации паров металла контактов, см<sup>3</sup>/с;  $n_{e.o}$  – начальная концентрация электронов в канале дуги, см<sup>-3</sup>.

Из приведённых формул следует, что время рекомбинации электронов в обоих случаях зависит от температуры паров металла контактов, так как:

$$v_e = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}; \quad n_{e.o}(T, P) \text{ и } \beta(T, P).$$

То есть время деионизации остаточной плазмы в межконтактном зазоре в безтоковой паузе всецело зависит от тепло- и электрофизических свойств металла контактов и их паров. Поэтому при выборе контактов следует учитывать способность их металлов восстанавливать электрическую прочность межконтактного зазора после погасания дуги.

Для примера примем температуру остаточной плазмы, состоящей из ионизированных паров *Ag*, равной 6800 К, и её давление  $P=1,0$  атм. В таком случае средняя тепловая скорость электронов равна:

$$v_e = \left( \frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-16} \text{ эрг} / \text{К} \cdot 6800 \text{ К}}{9,11 \cdot 10^{-28} \text{ э}} \right)^{1/2} = 55,6 \cdot 10^6 \text{ см} / \text{с}.$$

Время рекомбинации электронов на опорном пятне дуги при растворе контактов  $\delta=1,0 \text{ мм}$  составит:

$$t_{p.on} = \frac{4 \cdot 0,1 \text{ см}}{55,6 \cdot 10^6 \text{ см} / \text{с}} = 7,2 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Время рекомбинации заряженных частиц в объёме канала остаточной плазмы равно:

$$t_{p.ob} \simeq \frac{1}{\beta n_{e0}} = \frac{1}{1,7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 / \text{с} \cdot 5,82 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}} = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ с},$$

где  $\beta=1,7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 / \text{с}$  – коэффициент рекомбинации ионизированных паров *Ag* [3] и  $n_{e0}=5,82 \cdot 10^{16} \text{ см}^3$  – начальная концентрация электронов в ионизированных парах *Ag* при  $T=6800 \text{ К}$  и  $P=1,0 \text{ атм}$ .

Если раствор контактов составит  $\delta=7,0 \text{ мм}$ , то будем иметь:

$$t_{p.on} = \frac{4 \cdot 0,7 \text{ см}}{55,6 \cdot 10^6 \text{ см} / \text{с}} = 5,0 \cdot 10^{-8} \text{ с}.$$

Приведённые результаты расчётов показывают, что в разрядном промежутке, равном  $1,0 \text{ мм}$ , после прекращения подачи энергии распад остаточной плазмы при температуре  $6800 \text{ К}$  и давлении  $P=1,0 \text{ атм}$  происходит в равной степени за счёт рекомбинации заряженных частиц как на поверхности опорного пятна, так и в её объёме.

$$t_{p.on} = 7,2 \cdot 10^{-9} \text{ с} \simeq 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ с} = t_{p.ob}.$$

При одновременном протекании процессов рекомбинации заряженных частиц в коротком отключающем зазоре на опорном пятне дуги и в её объёме остаточной плазмы время его деионизации будет  $<5 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ .

В относительно длинной дуге распад остаточной плазмы после прекращения подачи энергии при переходе тока через ноль происходит в основном за счёт рекомбинации заряженных частиц в объёме плазмы ( $t_{p.ob}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ с} < 5,0 \cdot 10^{-8} \text{ с} = t_{p.on}$ ) и может быть продолжительнее, чем после

## Приложение. К вопросу о выборе... контактов...

погасания короткой дуги. Время деионизации отключающего промежутка относительно короткого может быть на порядок меньше, чем относительно длинного.

Следовательно, следует полагать, что более высокая электрическая прочность короткого разрядного промежутка обеспечивается более высокой скоростью его деионизации, а не отбором контактами большего количества энергии.

Однако сравнивая расчётные значения времени деионизации остаточной плазмы со временем восстановления электрической прочности в зазоре между контактами, полученных экспериментально и показанного на рис. П.2 [7], видим их различие значений на несколько порядков. Такое различие времени деионизации остаточной плазмы в канале дуги при переходе тока через ноль и времени восстановления прочности зазора между контактами можно объяснить только относительно длительным процессом охлаждения расплава на опорном пятне, с поверхности которого продолжают поступать пары металла контактов.

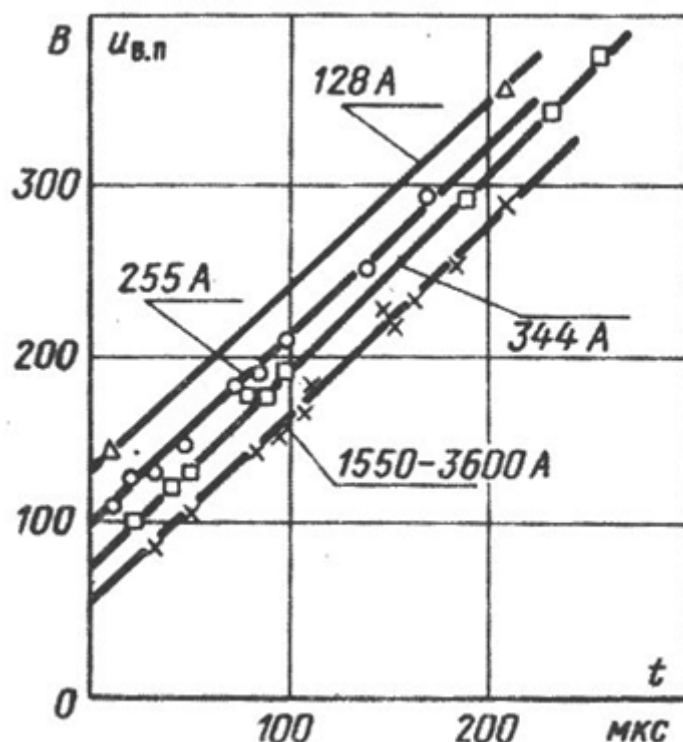


Рис. П.2. [7] Рост восстанавливающейся прочности при больших токах (свободная дуга).

Скорость восстановления электрической прочности промежутка между контактами после погасания дуги при переходе тока через ноль или выхода дуги с контактов на дугогасительные рога является важным параметром,

характеризующим материал контактов. Однако в опубликованной литературе о влиянии материалов контактов на скорость восстановления электрической прочности контактного промежутка приводятся весьма скудные сведения.

На скорость восстановления электрической прочности дугового промежутка между контактами существенное влияние оказывают тепло- и электрофизические свойства металлов контактов. Различные сочетания компонентов в металлокерамических контактах по-разному влияют на восстанавливаемую электрическую прочность дугового промежутка. На рис. П.3 приведены зависимости электрической прочности от значения силы тока для различных контактов [7].

Совокупность способности металла контактов хорошо проводить тепло, низкой температуры его кипения и подверженности ионизации с меньшей затратой энергии их паров, приводит к более высокой электрической прочности дугового промежутка между контактами после погасания дуги. Поэтому в промежутке между контактами из *Ag* электрическая прочность самая высокая, а из *AgC* – самая низкая.

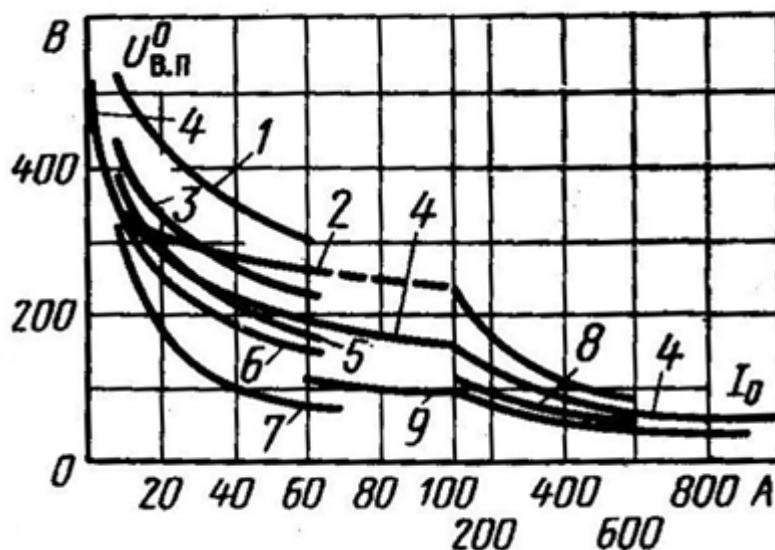


Рис. П.3 [7]. Начальная прочность в функции тока для различных контактных материалов. 1 – серебро; 2 – латунь; 3 – *Ag-Ni(40%)*; 4 – медь; 5 – *Ag-W(50%)*; 6 – *Ag-CdO(15%)*; 7 – *Ag-C(3%)*; 8 – алюминий; 9 – железо.

Казалось бы, низкое напряжение ионизации (таблица 3) должно облегчать зажигание дуги между контактами. Но снижение напряжения ионизации и температуры кипения металла контактов понижает температуру на опорном пятне дуги и плазмы в её канале. Снижение температуры плазмы в канале дуги, в свою очередь, уменьшает степень её ионизации и электропроводность.

**Таблица 3. Тепло- и электрофизические свойства металлов**

Параметр	<i>Ag</i>	<i>Cu</i>	<i>Ni</i>	<i>W</i>	<i>Fe</i>	<i>Zn</i>	<i>Cd</i>	<i>Sn</i>	<i>C</i>	<i>Cs</i>
$T_{пл}, K$	1285	1357	1728	3863	1808	692	594	505	3650	301,5
$T_{кип}, K$	2485	2840	3003	5933	3023	1179	1038	2543	испарен.	978
$\frac{\lambda, Вт}{см \cdot K}$	4,18	3,8	0,7	1,9	0,6	1,1	0,9	0,64	0,15-1,6	0,18
$U_i, В$	7,54	7,72	7,63	7,98	7,83	9,39	8,99	7,33	11,22	3,87

Для примера в таблице 4 приведены их значения при  $T=5000 K$  и давлении  $P=1 атм$ .

**Таблица 4. Степень ионизации  $x_e$ , удельная электропроводность  $\sigma$  и коэффициент объёмной рекомбинации  $\beta$  паров контактных металлов при  $T=5000 K$  и  $P=1 атм$**

Параметр	<i>Ag</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Cs</i>
$x_e$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$5,53 \cdot 10^{-3}$	$4,25 \cdot 10^{-3}$	$2,61 \cdot 10^{-1}$
$\sigma, (Ом \cdot см)^{-1}$	1,79	4,0	3,89	5,65
$\beta, 10^{-10}, см^3/с$	6,39	5,7	10,31	345,4

Введение добавок к *Ag* с низкими значениями температуры кипения и напряжения ионизации, а также с высокими значениями коэффициентов теплопроводности и объёмной рекомбинации способствует повышению восстанавливающийся электрической прочности дугового промежутка между контактами после погасания дуги. Добавки с более высокими значениями напряжения ионизации и температуры кипения, чем у *Ag*, особенно графита, снижают электрическую прочность контактного промежутка. Эти же материалы имеют значения коэффициента теплопроводности ниже, чем у серебра.

Как правило, один компонент композиционных контактов обладает повышенной тугоплавкостью и механической прочностью, а другой – высокой электропроводностью. Компоненты не должны давать между собой твёрдых растворов и химических соединений. В качестве тугоплавких компонентов применяют чистые металлы и их химические соединения: окислы, карбиды и неметаллы: графит, бор.

Чистый *Cs* обладает низким потенциалом ионизации, и его соединения даже в небольших количествах существенно снижают температуру на опорном пятне

дуги и плазмы в её канале. Лантаниды и другие элементы, имеющие низкую работу выхода электронов, приводят к диффузному расширению опорного пятна и рассредоточению тепловой нагрузки на поверхности контактов [4].

Присадки к *Ag* окислов металлов и фтористых соединений (*CdF<sub>2</sub>*, *AlF<sub>3</sub>*) под воздействием дуги выделяют фтор и кислород, которые способны захватывать электроны и образовывать отрицательные ионы. Тяжёлые отрицательные ионы снижают электропроводность плазмы [4].

Окислы *CdO* и *Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>* благоприятно влияет на износостойкость контактов, так как под воздействием дуги они разлагаются с поглощением большого количества энергии:  $(2\div 4) \cdot 10^3 \text{ Bm/g}$  [4].

#### **П.4. К вопросу о выборе направления по созданию новых контактных материалов**

Длительная неподвижность дуги на размыкаемых контактах (среднестатистическое экспериментальное время неподвижности дуги при отключении токов КЗ составляет 5,45 мс) приводит к значительной их эрозии [3, ч. II].

Снижение скорости восстановления электрической прочности межконтактного зазора приводит к повторным зажиганиям дуги не только при естественном переходе тока через ноль, но и при выходе её на дугогасительные рога и входе в дугогасительную решётку. Повторные зажигания дуги затягивают время её гашения и тем самым увеличивают тепловые и механические разрушения в месте возникновения КЗ и электрический износ выключателя [3, ч. II].

Снижение электрического сопротивления изоляции выключателя вызывает необходимость проведения внепланового профилактического его ремонта.

Исходя из вышеизложенного, поиск новых композиций компонентов контактов целесообразно проводить с целью:

- сокращения времени неподвижности дуги на размыкаемых контактах при отключении малых критических и номинальных токов и токов КЗ;
- замены графита в композиционных контактах.

На время неподвижности дуги на размыкаемых контактах существенное влияние оказывают её инерционные свойства, обусловленные относительно большой массой паров металла контактов и их вязкостью в канале короткой контрагированной дуги, находящейся в неподвижном положении [3, ч. II].

Масса паров металла в канале дуги состоит из суммы масс атомов и ионов элементов, входящих в состав паров контактов и их плотности, зависящей от температуры и давления плазмы в её канале.

На время неподвижности дуги, очевидно, влияет и способность опорного пятна достаточно быстро перемещаться по поверхности контактов. Известно, что по окисленной поверхности электрода опорное пятно перемещается с большей скоростью, чем по очищенной однородного металла [8]. Перемещение опорного пятна дуги по поверхности металлокерамических контактов существенно затруднено из-за разности температур плавления и кипения компонентов, составляющих контакт [9].

Следует также обратить внимание на энергию поверхностного натяжения отдельных компонентов контакта, под действием которого поверхностный рельеф расплава на контакте может быть очень неоднородным.

Если за базовую композицию контактов принять  $AgNi$ , среднестатистическое время неподвижности дуги на которых составляет  $5,45 \text{ мс}$  при скорости размыкания контактов до  $2,0 \text{ м/с}$ , то присадка к ним должна иметь массу атома  $m_0$  значительно меньше, чем масса атомов  $Ag$  и  $Ni$  [3, ч. I, 10]:

$$m_0^{Ag} = 179,1 \cdot 10^{-24} \text{ з}; m_0^{Ni} = 97,5 \cdot 10^{-24} \text{ з}.$$

Из анализа таблицы периодической системы элементов Д. И. Менделеева следует, что одним из первых претендентов в качестве присадки к композиционным контактам  $AgNi$  может служить  $Li$ , атомная масса которого  $m_\mu = 6,94$ , и его соединения.

Масса атома  $Li$  составляет:

$$m_0^{Li} = m_\mu \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ з} = 6,94 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ з} = 11,52 \cdot 10^{-24} \text{ з}.$$

То есть масса атома  $Li$  более чем на порядок меньше массы атома  $Ag$ , доля которого в металлокерамических контактах составляет, как правило, 70%.

Однако температура плавления  $Li$  составляет только  $180,5^\circ\text{C}$ , что может привести при размыкании контактов к быстрому его выплавлению. Поэтому целесообразно к серебрясодержащим контактам в качестве присадки использовать соединение  $Li-LiF$ . Масса молекулы  $LiF$  при нормальных условиях составляет  $m_0 = 43,06 \cdot 10^{-24} \text{ з}$  и соизмерима со средней массой молекулы воздуха, которая равна  $m_{0,возд} = 48,09 \cdot 10^{-24} \text{ з}$ .

При температуре плазмы в канале дуги, равной, например,  $8000 \text{ K}$ , масса молекулы воздуха составит:



$$m_{0, \text{возд}} = m_{\mu} \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ з} = 15,394 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ з} = 25,55 \cdot 10^{-24} \text{ з}.$$

Молекулы  $LiF$  при температуре  $8000 \text{ K}$  будут подвергнуты диссоциации, а их атомы – ионизации. Поэтому, в зависимости от процентного содержания  $LiF$  по массе в составе композиционных контактов  $AgNi$ , масса плазмы в канале дуги будет значительно меньше, чем если бы плазма состояла только из атомов и ионов  $Ag$  и  $Ni$ . Таким образом, инерционность плазмы в канале короткой контрагированной дуги на размыкаемых контактах будут существенно снижена, и она может приобрести подвижность.

Работа выхода электрона  $\varphi$  у  $Li$  почти в два раза меньше, чем у  $Ag$  и  $Ni$ . Поэтому опорное пятно дуги может быстрее расширяться и плотность мощности  $q$ ,  $Vm/cm^2$ , приходящая на его поверхность, будет существенно снижена [4]. Это, в свою очередь, приведёт к снижению эрозии контактов [4]. Установлено, что при  $q \geq 10^5 \text{ Vm/cm}^2$  на опорном пятне при отключении токов КЗ образуются конусы эрозии, приводящие к значительной эрозии контактов. При  $q < 10^5 \text{ Vm/cm}^2$  конусы эрозии могут не образовываться, что приведёт к снижению эрозии контактов [3, ч. II].

Атомы фтора, выделяющиеся при диссоциации молекул  $LiF$ , обладают способностью притягивать электроны, образуя отрицательные ионы. Средство электронов с атомами фтора оценивается  $3,62 \text{ эВ}$ . Относительно тяжелые отрицательные ионы  $F$  могут заметно снизить электропроводность остаточной плазмы в канале дуги после её погасания в бестоковой паузе при естественном переходе тока через ноль [4] или в межконтактном зазоре при выходе дуги с контактов на дугогасительные рога, или при её входе в дугогасительную решётку. Значительное снижение электропроводности остаточной плазмы может привести к достаточно быстрой деионизации дугового промежутка и предотвратить повторное зажигание дуги.

В опубликованных работах есть данные, которые указывают на быстрое диффузное расширение опорного пятна дуги и снижение её напряжения при введении в контакты в качестве присадок  $Cs$  и  $La$  [4]. То и другое снижает плотность мощности  $q$ ,  $Vm/cm^2$ , на опорное пятно и тем самым снижают электрическую эрозию контактов при отключении токов. Однако массы атомов  $Cs$  и  $La$  значительно превосходят массы атомов  $Ag$  и  $Ni$ .

$$m_0^{Cs} = 220,6 \cdot 10^{-24} \text{ з} \text{ и } m_0^{La} = 230,6 \cdot 10^{-24} \text{ з}.$$

Следовательно, применение  $Cs$  и  $La$  в качестве присадок к металлокерамическим контактам может увеличить инерционность паров плазмы в канале дуги и время её задержки на размыкаемых контактах. Принимая во внимание, что дуга на размыкаемых контактах приобретает подвижность при условии  $l_{\partial}/r_{on} > 1$  ( $l_{\partial}$  – длина

## Приложение. К вопросу о выборе... контактов...

дуги,  $r_{on}$  – радиус опорного пятна), то от применения  $Cs$  и  $La$  оптимального результата по снижению эрозии контактов может не получиться.

Наиболее интенсивный процесс эрозии контактов происходит на начальном этапе их размыкания, который продолжается  $\sim 1,0$  мс. Поэтому для того чтобы существенно снизить эрозию контактов необходимо время задержки дуги на размыкаемых контактах снизить со среднестатистического времени, равного  $5,45$  мс, до  $0,15 \div 0,2$  мс. Для снижения времени неподвижности дуги до указанного значения, вероятно, будет недостаточно только снизить инерционность плазмы в канале дуги. Так как подвижность дуги происходит при условии  $l_d/r_{on} > 1$ , то необходимо увеличить скорость размыкания контактов от  $2,0$  м/с до  $6,5 \div 8,0$  м/с. При такой скорости размыкания контактов увеличение раствора контактов  $l_d$  будет опережать рост радиуса опорного пятна дуги  $r_{on}$  [3].

Замена графита, входящего в состав металлокерамических контактов  $AgNC$ , вызывает большие трудности.

Графит вводят в металлокерамические контакты для предотвращения сваривания контактов при протекании через них токов КЗ. Строго говоря, при протекании через контакты токов КЗ их сварка происходит всегда. Но благодаря строению кристаллической решётки графита место сварки при размыкании контактов достаточно легко разрушается. Поэтому поиск веществ, которые могли бы заменить графит, необходимо вести среди тех веществ, которые имели бы свойства кристаллических решёток, приближённые к свойствам кристаллических решёток графита. При этом электропроводность и теплопроводность предпочтительно была бы у них выше, чем у графита. Потенциал ионизации желательно у нового вещества был бы ниже, чем у графита, так как это несколько снижало бы температуру плазмы в канале дуги.

Предпочтительно рассматривать бор  $B$ , имеющий массу атома, равную:

$$m_0^B = \mu \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ з} = 10,81 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ з} = 17,95 \cdot 10^{-24} \text{ з},$$

которая на целый порядок меньше, чем у  $Ag$  и  $Ni$  и несколько меньше, чем у графита:

$$m_0^C = \mu \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ з} = 12,001 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ з} = 19,94 \cdot 10^{-24} \text{ з}.$$

Применение бора в составе контактов с композицией  $AgNi$  не привело бы к увеличению времени задержки дуги на размыкаемых контактах.

Однако бор является веществом с полупроводниковыми свойствами и, следовательно, со сложными зависимостями его параметров от температуры.

Бор может быть в кристаллическом и аморфном виде. Чистый кристаллический бор представляет собой серовато-чёрного цвета вещество, плотность которо-

го составляет  $2,34 \text{ г/см}^3$ ,  $t_{\text{пл}}^{\circ} = 2300^{\circ}$ ,  $t_{\text{кип}}^{\circ} = 2550^{\circ}$ . Атомная теплоёмкость  $3,3 \text{ кал/(г-атом}\cdot^{\circ})$  (от  $0^{\circ}$  до  $100^{\circ}$ ). Теплота сублимации  $95 \text{ ккал/г-атом}$  (при  $25^{\circ}$ ). Потенциал ионизации бора  $8,3 \text{ В}$ , который ниже, чем у графита ( $11,22 \text{ В}$ ).

Аморфный бор имеет структуру мелкозернистого порошка, плотность которого  $\sim 1,73 \text{ г/см}^3$ .

Чистый бор очень плохо проводит электрический ток [11].

В [12] приводятся результаты экспериментальных исследований электропроводности бора в зависимости от его температуры (см. рис. П4).

Принимая во внимание очень низкую электропроводность и очень высокую твёрдость бора применение его в чистом виде в контактах, вероятно, не представляется возможным.

Бор входит в состав ряда химических соединений. Привлекает внимание нитрид бора  $\text{BN}$  – белый порошок, кристаллическая структура которого соответствует типу графита. Но он обладает высокими изоляционными свойствами.

Соединения бора с металлами (бориды) могут составлять ряд различных составов:  $\text{Me}_4\text{B}$ ,  $\text{Me}_3\text{B}$ ,  $\text{Me}_2\text{B}$ ,  $\text{Me}_3\text{B}_2$ ,  $\text{MeB}$ ,  $\text{Me}_3\text{B}_4$ ,  $\text{MeB}_2$ ,  $\text{Me}_2\text{B}_5$ ,  $\text{MeB}_4$  и  $\text{MeB}_6$ . При избытке атомов металла в решётке атомы бора обычно изолированы друг от друга. Если наоборот, то атомы бора образуют цепочки, сетки, каркасы.

В таблице 5 приведены некоторые параметры чистых металлов, применяемых в контактах, и их боридов.

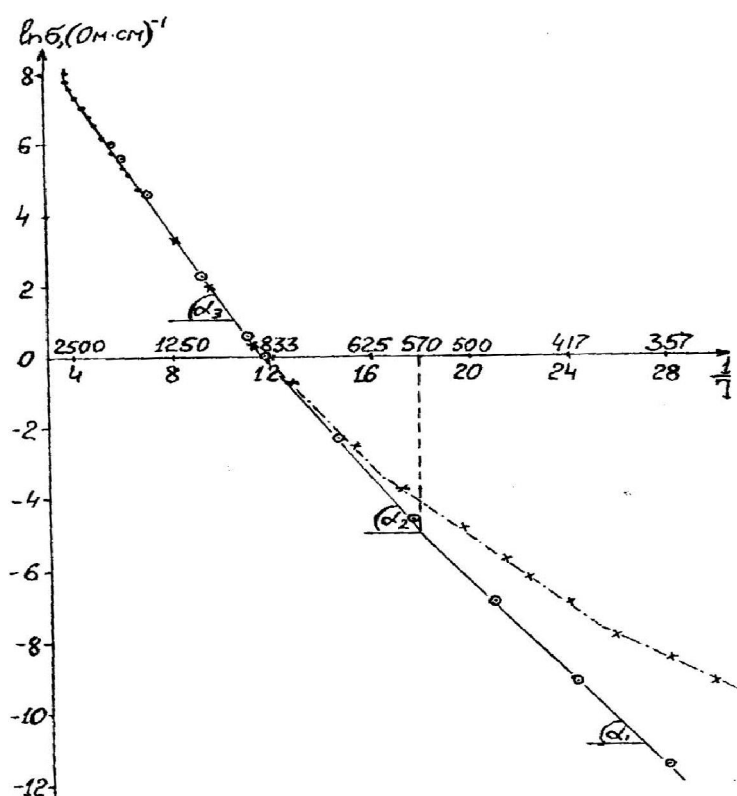


Рис. П4. График зависимости  $\sigma(T)$ , где  $\circ$  – кристаллический бор [13],  $\times$  – аморфный бор [13], · данные измерений[12].

Таблица 5. Параметры чистых металлов и их боридов.

Формула	Масса атома, $m_0, 10^{-24} \text{ г}$	Плотность $\rho, \text{ г/см}^3$	Удельное сопротивление, $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$	Температ. плавления, $K$	Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{см}\cdot K)$	Теплоёмкость, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot K)$
<i>B</i>	17,95	2,34	п/п	2573	0,015	$11,09 = C_p$ , $\text{Дж}/(\text{моль}\cdot K)$
<i>W</i>	305,1	19,3	5,5	3670	1,9	0,134
$W_2B_5$	-	11	21	2573	0,318	
<i>Mo</i>	159,3	10	5,8	2900	1,4	0,264
$Mo_2B_5$	410	8,6	25	2373	0,268	0,3
<i>Al</i>	44,8	2,7	2,9	873	2,1	
$AlB_2$	80,68 (молек.)	3,19	2,35	1928		
<i>C</i>	19,94	1,8	700	3973	1,14	0,71

Соединения бора с *W*, *Mo*, и другими подобными металлами образуют тугоплавкие материалы. Некоторые из них применяют в качестве катодов в электронных приборах.

Соединение бора с *Al* ( $AlB_2$ ) образует структуру кристаллической решётки в виде сетки. Чешуйчатая структура кристаллов  $AlB_2$ , как нам представляется, будет подвергаться более лёгкому излому места сварки контактов в случае протекания

через них тока КЗ. Кроме того, пары  $B$  и  $Al$  в канале дуги будут снижать инерционность её плазмы, состоящей из паров  $Ag$  и  $Ni$ , и, тем самым, обеспечат её подвижность по контактам [3, ч. II, с. 62, таблица 4.11 и с. 63, рис. 4.29].

К сожалению, автор не смог найти в опубликованных работах ряд физических свойств диборида алюминия  $AlB_2$ . Тем не менее, нам представляется, что измельчённый диборид алюминия до мелкозернистой структуры целесообразно ввести в малых дозах в композиционные контакты  $AgNi$  и провести необходимые исследовательские испытания с целью определения возможности замены им графита в контактах.

Безусловно, рассмотренный пример замены графита в контактах является одним из вариантов. Автор призывает специалистов, работающих в области создания контактов, усилить свои поиски компонентов, заменяющих графит, применение которого в контактах **крайне нежелательно**.

## **Выводы**

При выборе контактных материалов для автоматических выключателей следует учитывать тепло- и электрофизические свойства компонентов, входящих в композиционные контакты, и их паров.

1. На значение переходного сопротивления  $R_k$  и переходного напряжения  $U_k$  оказывает влияние  $\rho$  – удельное сопротивление,  $H_B$  – твёрдость по Бринеллю, коэффициент теплопроводности  $\lambda_0$  материалов контактов, контактное нажатие  $P_k$  и максимальное мгновенное значение тока ( $i_{y0}$ ).
2. Переходное напряжение  $u_k$ , при котором серебрясодержащие контакты свариваются под тепловым воздействием протекаемого тока, составляет  $u_k = 0,41$  В.
3. Электродинамические силы, возникающие в замкнутых контактах в зоне сужения тока, могут привести к отбросу контактов и либо их к привариванию, либо их к выгоранию.
4. Механизм эрозии контактов при отключении токов КЗ представляет собой поверхностное пузырьковое кипение, сопровождаемое взрывными процессами на опорных пятнах дуги, которые приводят к образованию конусов эрозии. Сумма элементарных масс функционирующих конусов эрозии на опорных пятнах короткой контрагированной дуги, находящихся в неподвижном положении на контактах, составляет общую массу их эрозии.
5. Тепло- и электрофизические свойства контактных металлов и их паров существенно влияют на восстанавливающуюся электрическую прочность дугового

промежутка. Чем выше у металла контактов коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , коэффициент объемной рекомбинации  $\beta$  и ниже температура его кипения  $T_{кип}$  и потенциала ионизации  $U_i$  тем быстрее восстанавливается электрическая прочность дугового промежутка.

6. Введение в контакты  $\approx 5\%$  Cs снижает напряжения на дуге на  $\approx 25\%$ , что приводит к снижению плотности мощности на опорное пятно и соответственно к уменьшению эрозии контактов.

7. Лантаниды и другие элементы, имеющие низкую работу выхода электронов, приводят к быстрому диффузному расширению опорного пятна и рассредоточению тепловой нагрузки на поверхность контактов, что снижает эрозию контактов.

8. Окислы  $CdO$  и  $Ta_2O_5$  приводят к снижению эрозии контактов, так как под воздействием дуги они разлагаются с поглощением большого количества энергии

9. Присадки к Ag фтористых соединений  $CdF_2$  или  $AlF_3$  под воздействием дуги выделяют фтор, который способен захватывать электроны, образуя отрицательные ионы. Тяжелые отрицательные ионы снижают электропроводность плазмы.

10. Предположительно графит в композиционных контактах может быть заменен диборидом алюминия  $AlB_2$ .

### Список литературы к приложению

1. Мерл, В. Электрические контакты / В. Мерл. – М.; Л.: ГЭИ, 1962.
2. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М.: ИЛ, 1961.
3. Мещеряков, В. П. Электрическая дуга большой мощности в выключателях / В. П. Мещеряков. – Ульяновск; часть I, 2006; часть II, 2008.
4. Намитоков, К. К. Электроэрозионные явления / К. К. Намитоков. – М.: Энергия, 1978.
5. Буткевич, Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Г. В. Буткевич. – М.: Высшая школа, 1967.
6. Намитоков К. К. Математическое моделирование процессов в газоразрядной плазме / К. К. Намитоков, П. Л. Пахомов, С. Н. Харин. – Алма-Ата: Наука, 1988.
7. Таев, И. С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения / И. С. Таев. – М.: Энергия, 1973.

8. Электроэрозионная обработка металлов / М. К. Мицкевич, А. И. Бушик, И. А. Бакуто, В. А. Шилов, И. Г. Девойно. – Минск: Наука и техника, 1988.
9. *Брон, О. Б.* Потоки плазмы в электрической дуге включающих аппаратов / О. Б. Брон, Л. К. Сушков. – Л.: Энергия, 1975.
10. *Радциг, А. А.* Справочник по атомной и молекулярной физике / А. А. Радциг, Б. М. Смирнов. – М.: Атомиздат, 1980.
11. Краткая химическая энциклопедия. Том 1 // ГНИ «Советская энциклопедия». – М.: 1961.
12. Оптические и электрические свойства бора при температурах горения / *Л.А. Коваль, А. В. Флорка* // Одесский национальный университет им. *И. И. Мечникова*.
13. *Березин, А. А.* Электрические свойства бетаромбоэдрического бора и аморфного бора // А. А. Березин, О. А. Голиков, В. К. Зайцев. – М.: Мир, 1988.
14. Физические величины: справочник / Под редакцией *И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова*. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
15. *Полежаев, Ю. В.* Тепловая защита / Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич. – М.: Энергия, 1976.
16. Физический энциклопедический словарь // ГНИ «Советская энциклопедия». – М., 1960-1966.
17. *Самсонов, Г. В.* Бориды / Г. В. Самсонов, Т. Н. Серебрякова, В. А. Неронов. – М., 1975.
18. Солициды, бориды, интерматериаллиды и другие тугоплавкие соединения. *J. H. Westibrook*. Исследования при высоких температурах. М.: ИЛ, 1962.
19. Каталог. Производство металлических нанопорошков. Advanced Powder Technologies LLC. АРТ. – Томск, 2008.
20. On the electronic and structural properties of aluminum diboride  $Al_{0.9}B_2$ . *Ulrich Burkhard, Vladimir Gurin, Frank Haarman, Horst Borrmann, Walter Schnelle, Alexander Yaresko and Yuri Grin*. Available online 27 October 2003.

*Научное издание*

МЕЩЕРЯКОВ Валентин Петрович

**ВЗРЫВНАЯ ЭРОЗИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ**

**КОНТАКТОВ И ЭЛЕКТРОДОВ**

Набор и вёрстка – *И. С. Егоркин, С. Д. Мигунов.*

Редактор – *М. В. Штаева.*

ЛР № 020640 от 22.10.97

Подписано к печати 22.08.2011. Формат 60x84/8.

Усл. печ. л. 23,25. Тираж 300 экз. Заказ 846.

Оригинал-макет подготовлен ОАО «Контактор»

432001, г. Ульяновск, ул. К. Маркса, 12

[www.kontaktor.ru](http://www.kontaktor.ru) Тел. (8422)67-52-05

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования

«Ульяновский государственный технический университет»

432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.

Типография УлГТУ. 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32.





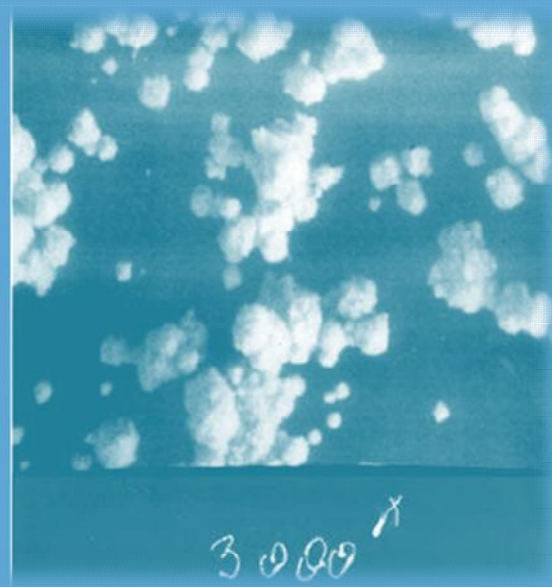
KMK-A30M, 150<sup>x</sup>



KMK-A10M, 150<sup>x</sup>



1000<sup>x</sup>



3000<sup>x</sup>