

Электрические и электронные аппараты

Лекция № 3

*Физические явления в электрическом контакте.
Переходное сопротивление контакта.
Нагрев контактов в режиме длительного протекания
номинального тока.*

Физические явления в электрическом контакте

Контактные поверхности имеют шероховатость и, как правило, всегда покрыты пленками, образуемыми под воздействием кислорода и химических реагентов.

Пленки имеют толщину до 10^{-6} см и удельное сопротивление $\rho=10^5$ Ом·см. В результате металлическое контактирование осуществляется не по всей поверхности контактов, а лишь в немногих точках.

Физические явления в электрическом контакте

Образованная пленка может быть, в отдельных случаях, продавлена прижимной силой (рисунок 3.1, а).

В других случаях пленка пробивается под влиянием разности потенциалов. При этом в месте пробоя может образоваться металлический перешеек, проводящий электрический ток (рисунок 3.1, б).

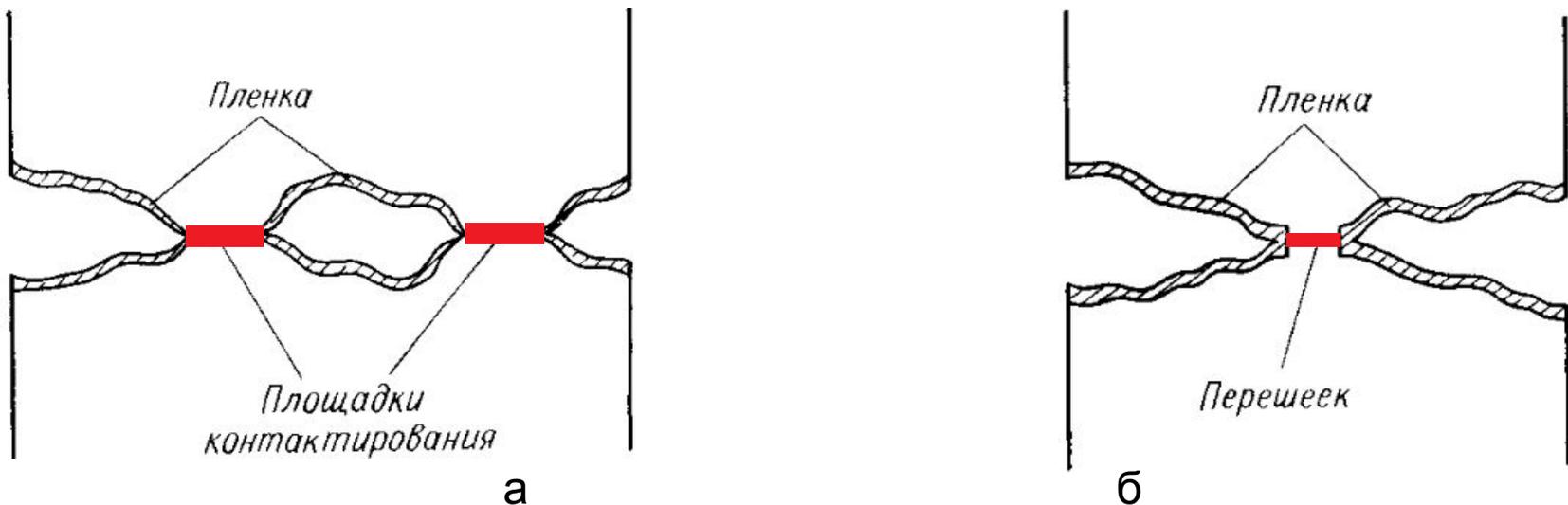


Рисунок 3.1 - Физические явления при контактировании

Физические явления в электрическом контакте

Явление пробоя пленки при некотором пороговом напряжении называется *фриттингом*.

При этом напряжении, значение которого зависит от вида и толщины пленки, ее сопротивление резко падает и в ней образуется тонкий металлический проводник, который может остаться при снятии напряжения.

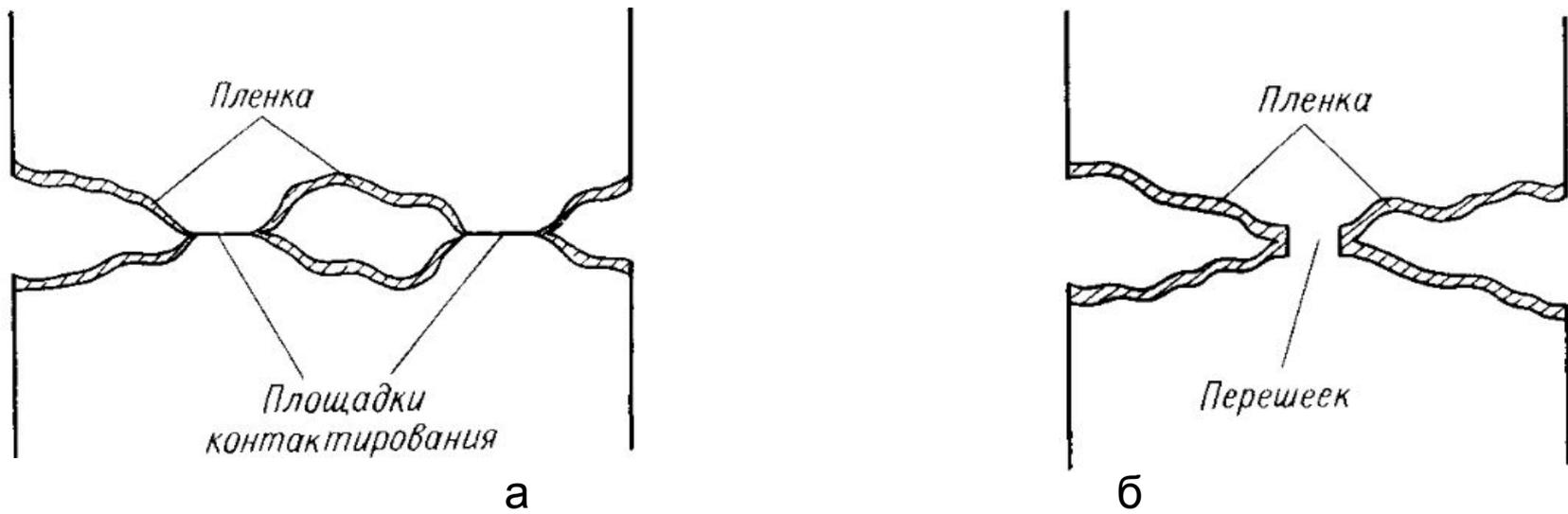
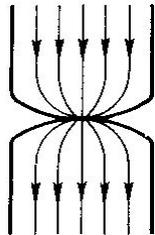
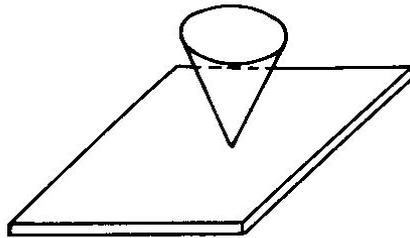


Рисунок 3.1 - Физические явления при контактировании

Физические явления в электрическом контакте

По форме контактирования (характеру соприкосновения) различают три вида контактов:

- *точечный электрический контакт* – электрический контакт (ЭК), при котором соприкосновение рабочих поверхностей контакт-деталей происходит в точке (рисунок 3.2, а);



а

б

в

Рисунок 3.2 – Типы контактов и физические картины контактирования 5

Физические явления в электрическом контакте

По форме контактирования (характеру соприкосновения) различают три вида контактов:

- *линейный электрический контакт* – ЭК, при котором соприкосновение рабочих поверхностей контакт-деталей происходит по линии (рисунок 3.2, б);

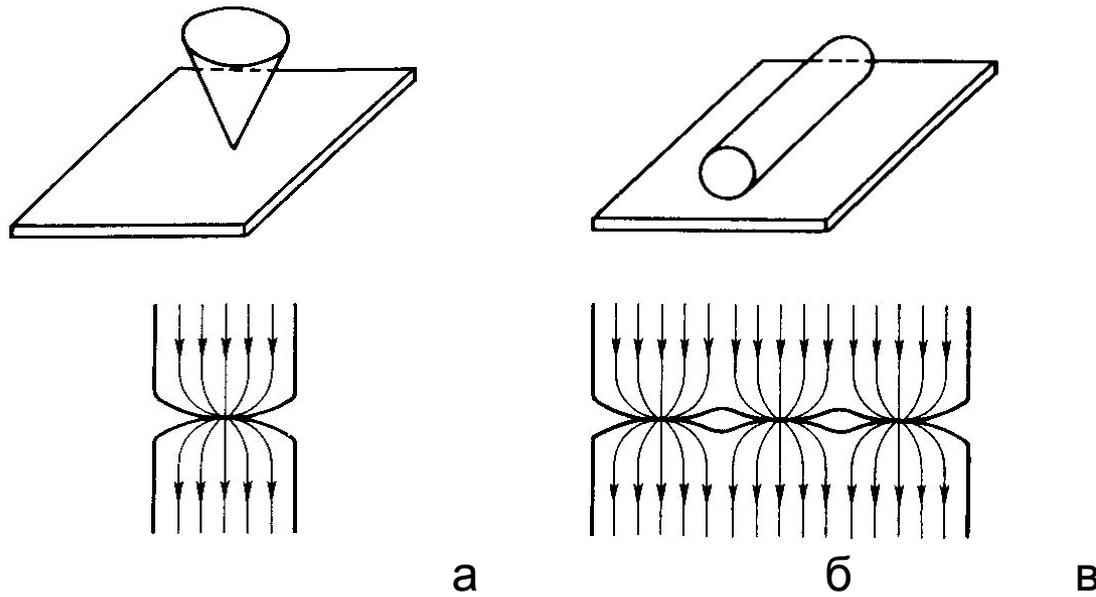


Рисунок 3.2 – Типы контактов и физические картины контактирования 6

Физические явления в электрическом контакте

По форме контактирования (характеру соприкосновения) различают три вида контактов:

- *поверхностный электрический контакт* – ЭК, при котором соприкосновение рабочих поверхностей контакт-деталей происходит по поверхности (рисунок 3.2, в).

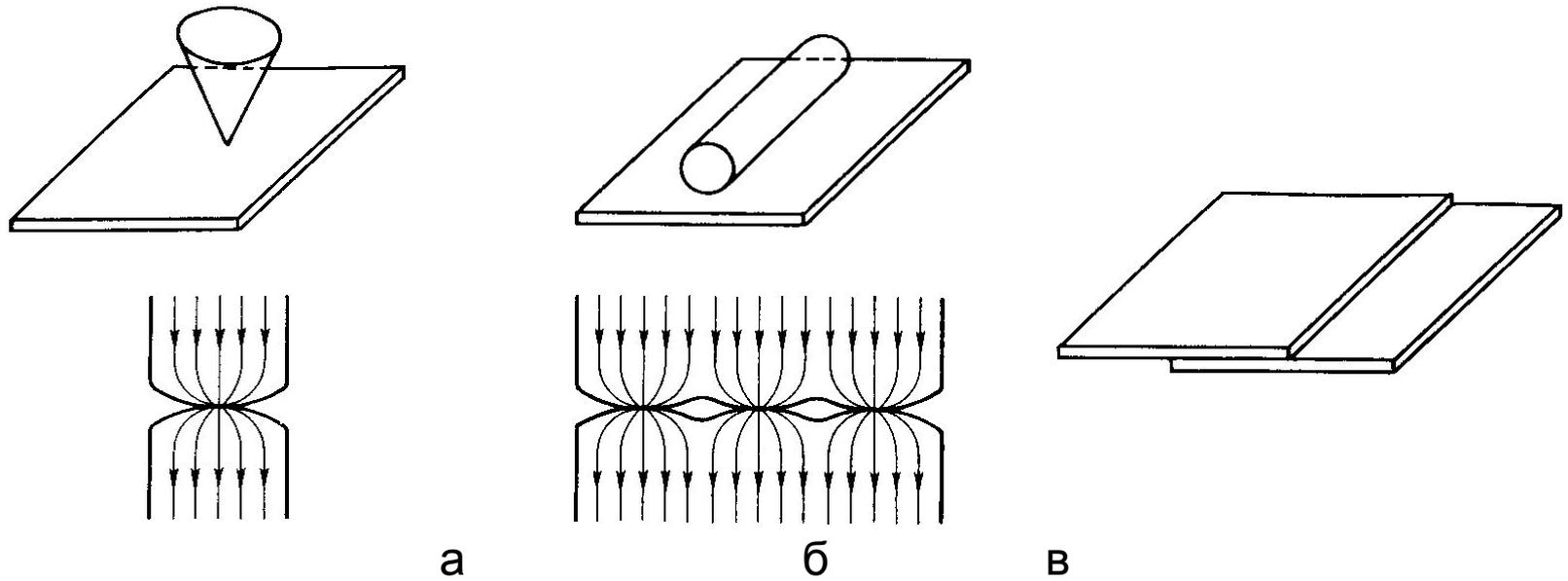


Рисунок 3.2 – Типы контактов и физические картины контактирования 7

Физические явления в электрическом контакте

Под *рабочей поверхностью* контакт-детали понимают часть ее поверхности, предназначенную для осуществления ЭК.

Часть рабочей поверхности по которой происходит соприкосновение с другой деталью, называют *условной площадью контактирования*.

Часть условной площади, по которой ток переходит из одной контакт-детали в другую, называется *эффективной площадью контактирования*.

Размеры площадок контактирования пропорциональны силе F , сжимающей детали, и зависят от сопротивления смятию материала деталей σ .

Электродинамические усилия в КА при переменном токе

Размер площадки контактирования (при точечном контакте)

может быть определен по формуле, м²:

$$q = \frac{F}{\sigma} \quad (3.1)$$

где F – сила, сжимающая детали, Н;

σ – временное сопротивление материала смятию, Н/м² (Па).

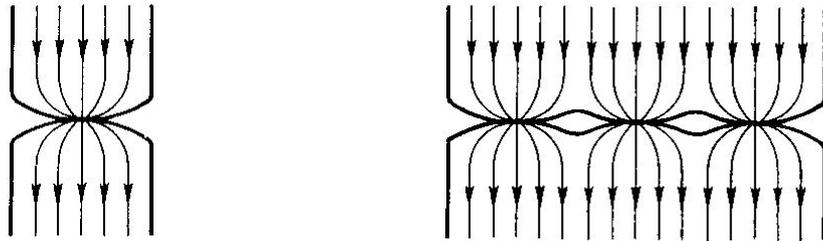
Если детали контактируют в m площадках, то размер общей площади контактирования будет равен сумме размеров отдельных площадок. При этом силу сжатия для каждой площадки можно определить по выражению:

$$F' = \frac{F}{m} \quad (3.2)$$

Переходное сопротивление контакта

В зоне перехода тока из одной детали в другую имеет место относительно большое электрическое сопротивление, называемое *переходным сопротивлением* $R_{\text{п}}$.

Это сопротивление определяется сопротивлением участков, по которым ток проходит к площадкам сжатия (см. рис. 3,2, а, б), и сопротивлением узких металлических перешейков, возникающих вследствие фриттинга.



Переходное сопротивление контакта

Сопротивление контакта можно представить в виде:

$$R_{\Pi} = R_c + R_{\text{пл}} \quad (3.3)$$

где $R_{\text{пл}}$ – сопротивление окислительной пленки;

R_c – сопротивление стягивания.

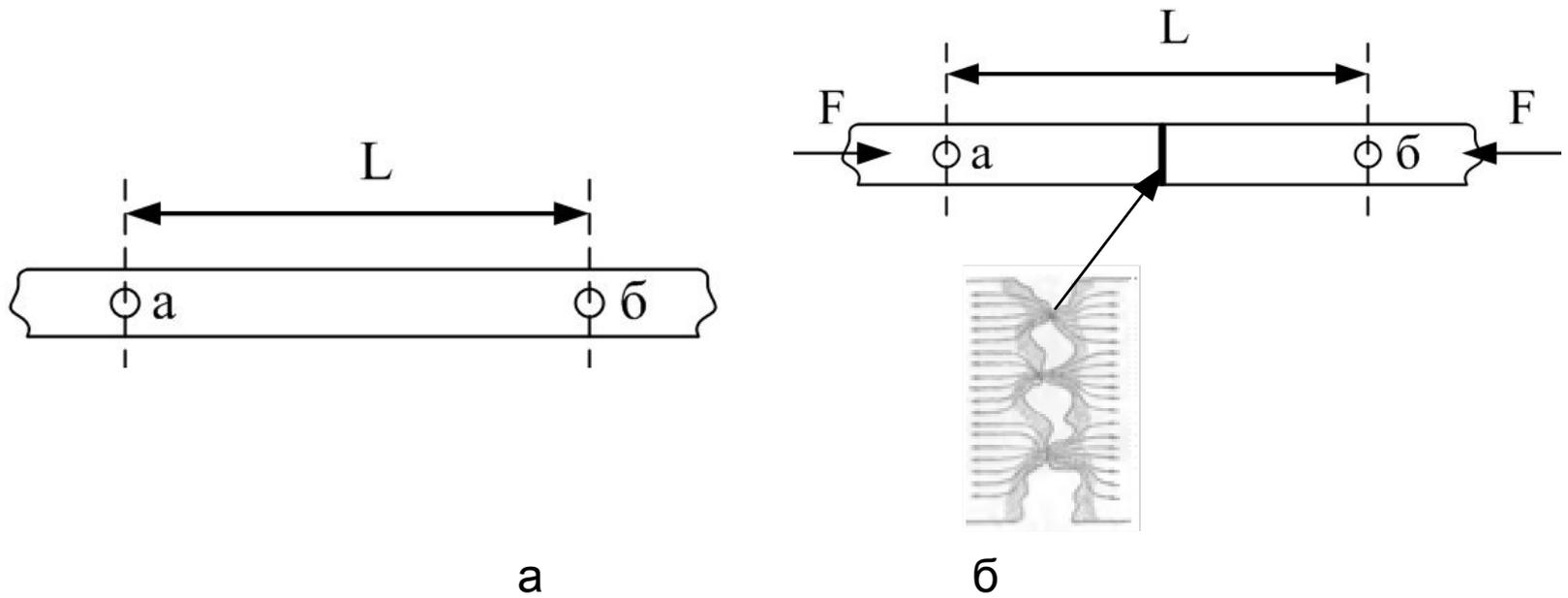


Рисунок 3.3 – К определению переходного сопротивления контактов 11

Переходное сопротивление контакта

Между точками а и б, находящимися на расстоянии L , разность потенциалов определится как $U_1 = R_1 I$.

Тогда активное сопротивление участка будет равно $R_1 = U_1 / I$.

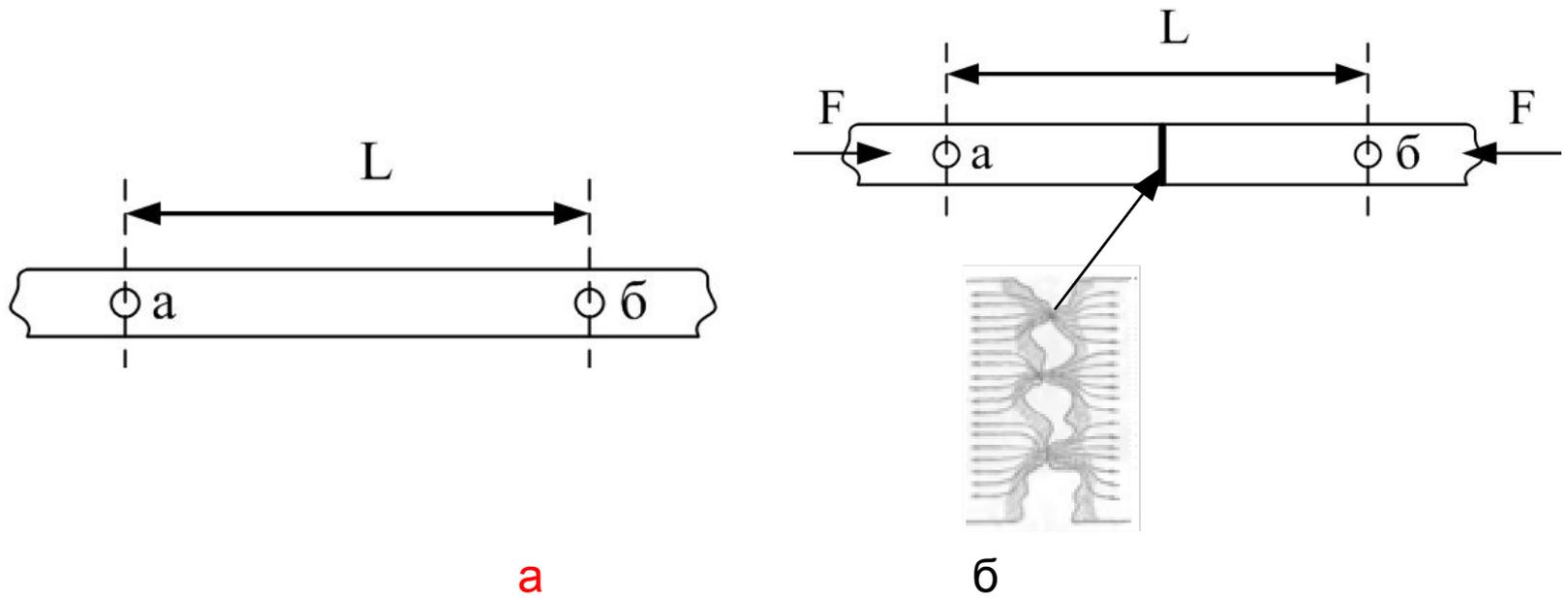


Рисунок 3.3 – К определению переходного сопротивления контактов 12

Переходное сопротивление контакта

Если разрезать проводник в средней части и затем снова его соединить, сжав с усилием F , то при протекании того же тока разность потенциалов будет отличаться от U_1 и определится как $U_2 = R_2 I$.

При этом сопротивление будет равно $R_2 = U_2 / I$.

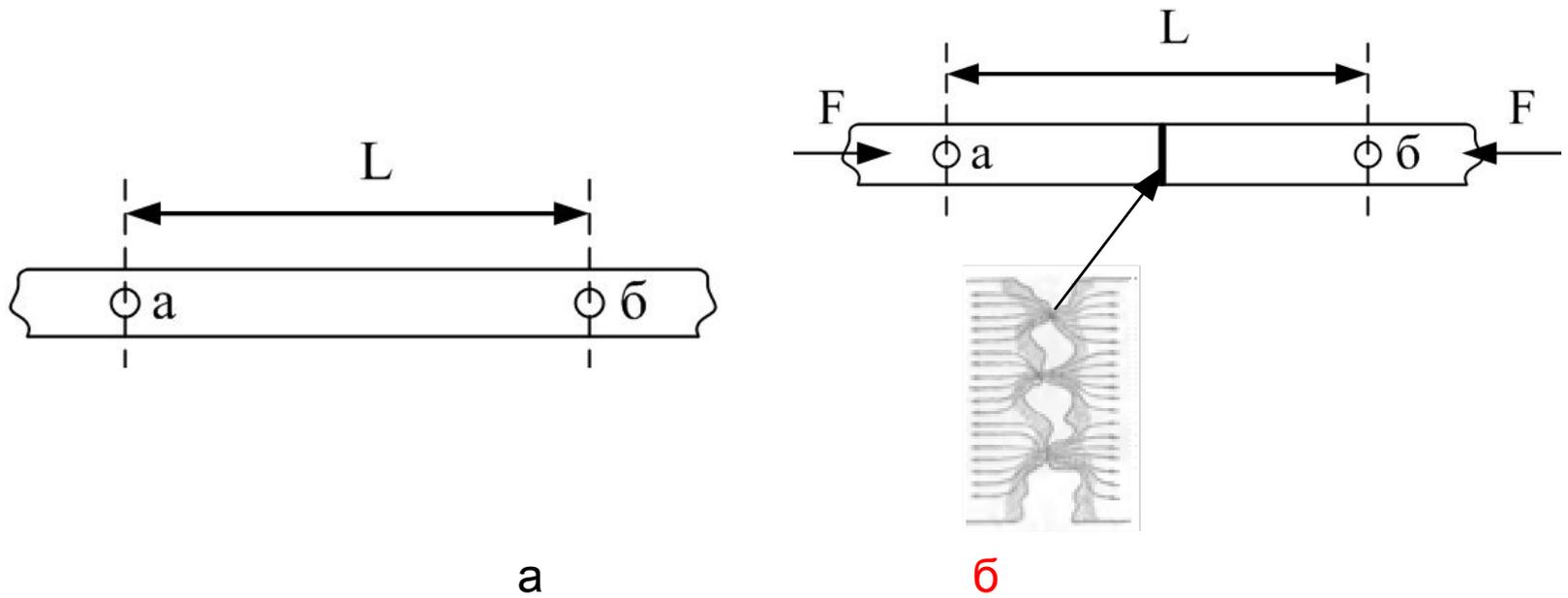


Рисунок 3.3 – К определению переходного сопротивления контактов 13

Переходное сопротивление контакта

Разность сопротивлений $R_{\text{п}} = R_2 - R_1$ и называется *переходным сопротивлением*.

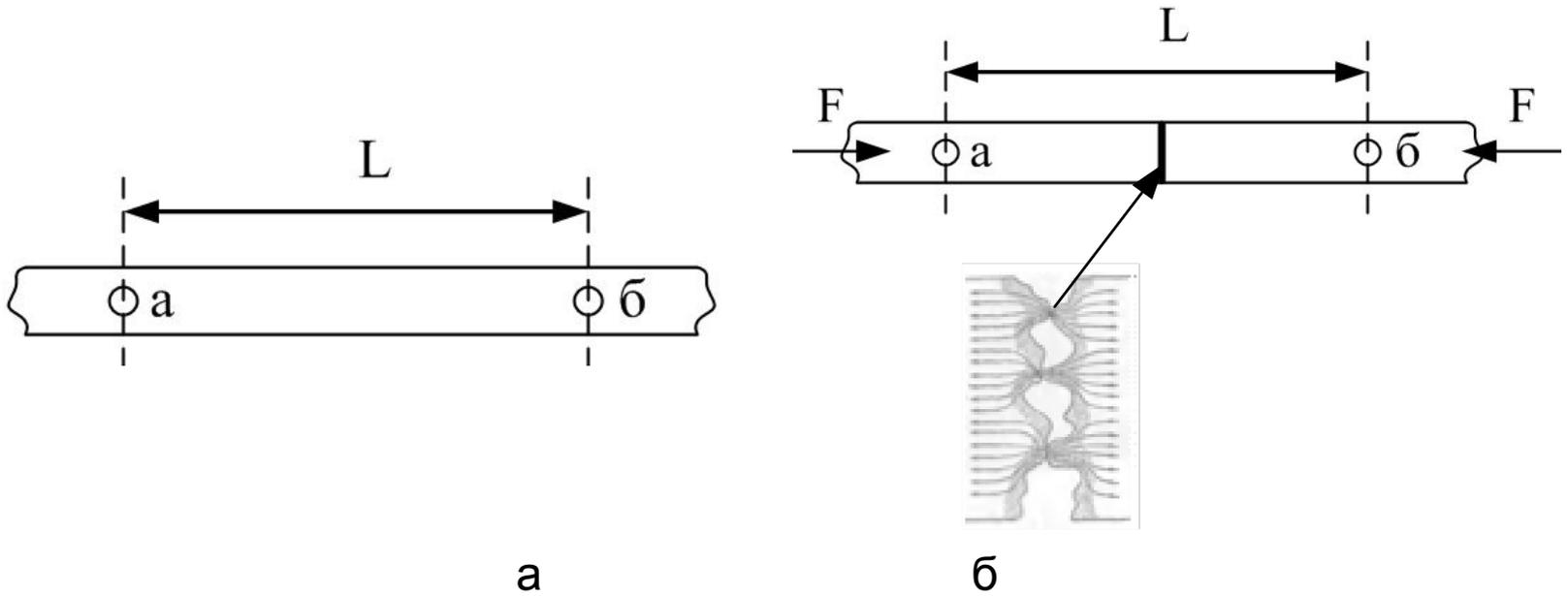


Рисунок 3.3 – К определению переходного сопротивления контактов 14

Переходное сопротивление контакта

При точечном контактировании на некотором удалении от пятна контакта линии тока параллельны друг другу, а в непосредственной близости от пятна они искривляются, «стягиваясь» к нему.

Область, где линии тока искривляются, стягиваясь к пятну, называется *областью стягивания*.

В этой области сечение проводника используется не полностью, что вызывает дополнительное сопротивление по сравнению с однородным проводником. Оно называется *сопротивлением стягивания* R_c .

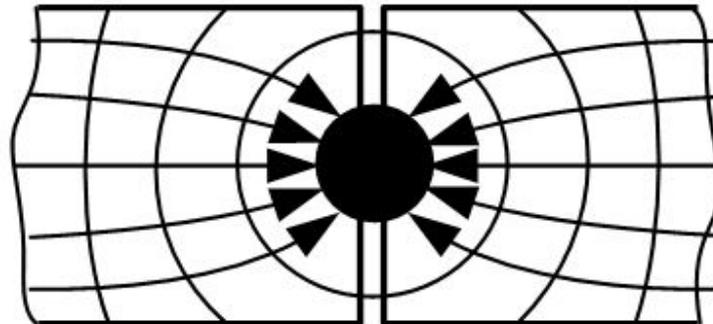


Рисунок 3.4 – Область стягивания электрического контакта

Переходное сопротивление контакта

На основании опытных данных значение переходного сопротивления определяется выражением:

$$R_{\text{п}} = \frac{\varepsilon}{F^n} \quad (3.4)$$

где ε – некоторая величина, зависящая от материала и формы контакта, способа обработки контакта и состояния контактирующих поверхностей, Ом/Н^{0,5};

F – сила сжатия;

n – показатель степени, характеризующий число точек соприкосновения. Для одноточечного контакта $n = 0,5$, для линейного $n = 0,7 \div 0,8$, для поверхностного $n = 1$.

Переходное сопротивление контакта

При эксплуатации КА стараются обеспечить устойчивость или малую зависимость (стабильность) $R_{\text{п}}$ во времени.

Для этого необходимо учитывать множество факторов, основными из которых являются:

- контактное нажатие;
- температура;
- состояние контактной поверхности;
- длительное значение тока.

Переходное сопротивление контакта (зависимость от нажатия)

Кривая 1 соответствует процессу возрастания нажатия, кривая 2 – снижению нажатия.

При увеличении нажатия при определенном его значении сопротивление перестает уменьшаться, так как снижается интенсивность деформации неровностей.

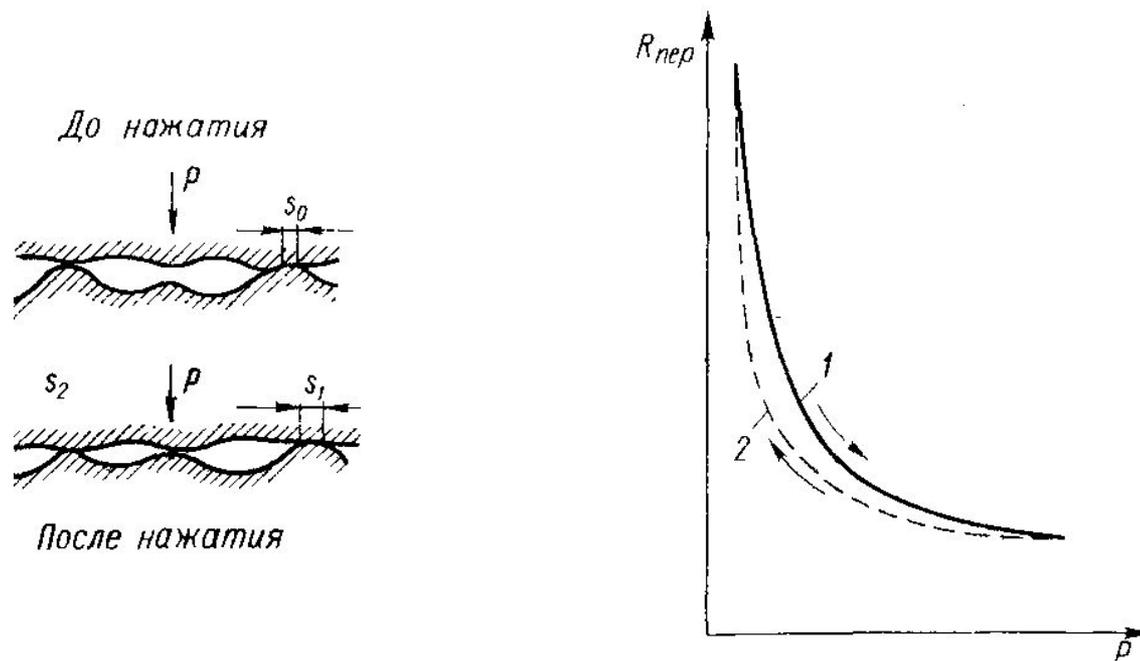


Рисунок 3.5 – Зависимость $R_{пер}$ от контактного нажатия

Переходное сопротивление контакта (зависимость от нажатия)

При снятии нажатия различие кривых объясняется наличием остаточных деформаций отдельных площадок, по которым происходит контактирование.

При каждом замыкании контакт деталей сопротивления могут существенно различаться, что объясняется различием числа и размера площадок контактирования.

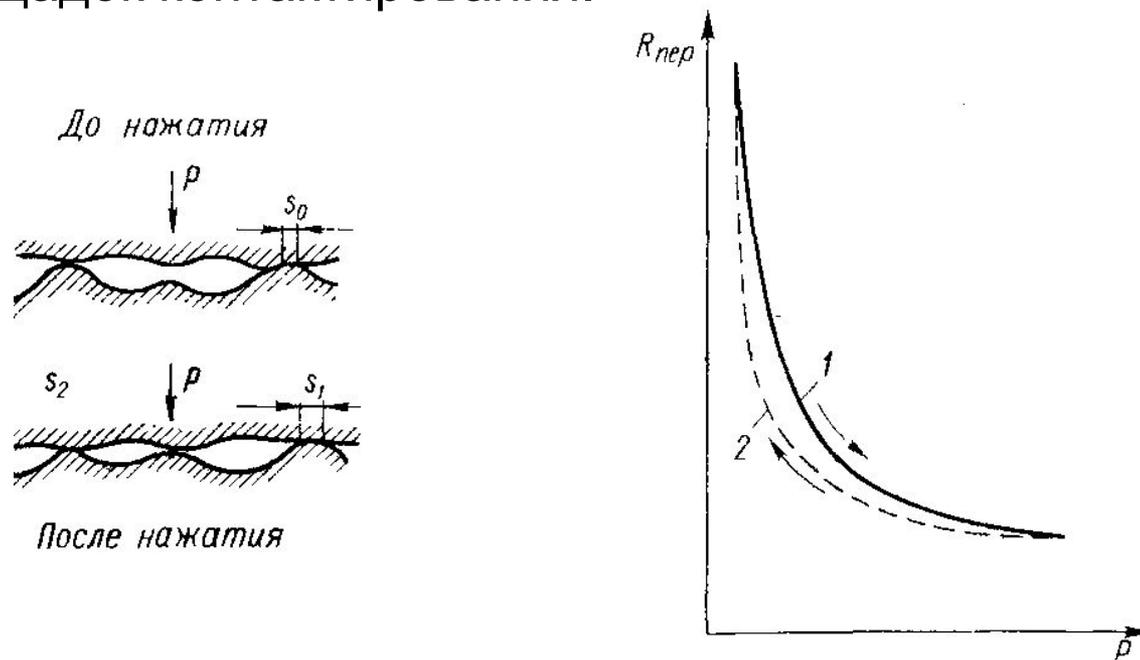


Рисунок 3.5 – Зависимость $R_{п}$ от контактного нажатия

Переходное сопротивление контакта (зависимость от температуры)

С увеличением температуры меняется структура бугорков и площадок соприкосновения за счет изменения удельного сопротивления смятию σ .



Рисунок 3.6 – Зависимость $R_{п}$ от температуры

Переходное сопротивление контакта (зависимость от температуры)

$$R_{\text{п}\theta} = R_{\text{п}} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \theta \right) \quad (3.5)$$

где θ – температура нагрева контактных площадок, °С;

α – температурный коэффициент сопротивления материала, 1/°С (1/К).



Рисунок 3.6 – Зависимость $R_{\text{п}}$ от температуры

Переходное сопротивление контакта (зависимость от температуры)

В начале с ростом температуры сопротивление растет (участок I).

Затем при некоторой температуре $\theta_{кр1}$ происходит резкое снижение механических свойств материала.

При том же нажатии увеличивается площадка контактирования и сопротивление падает (участок II).

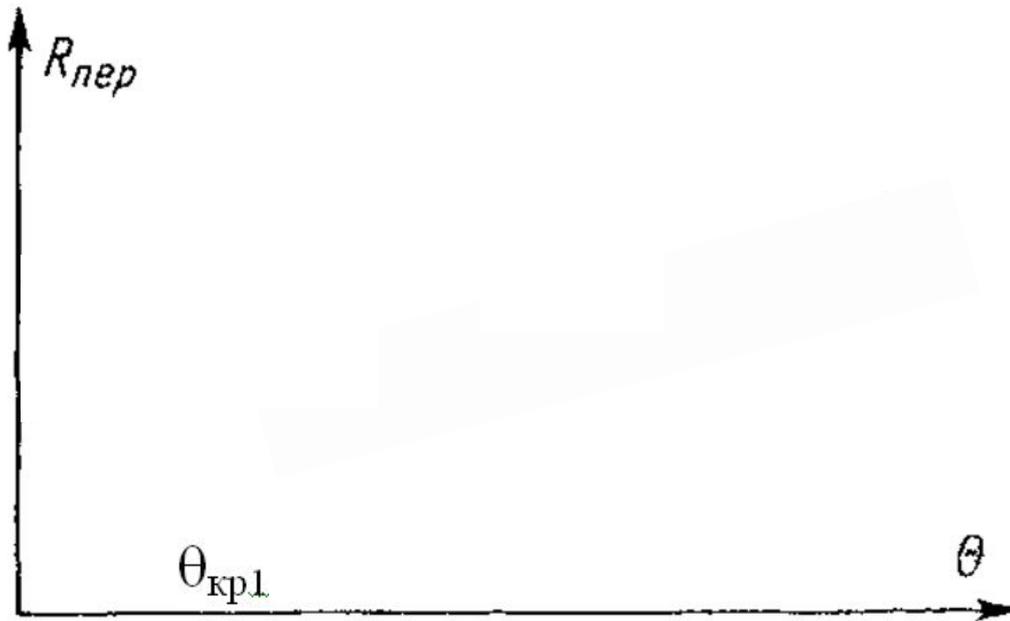


Рисунок 3.6 – Зависимость $R_{п}$ от температуры

Переходное сопротивление контакта (зависимость от температуры)

Далее сопротивление возрастает с увеличением температуры (участок III).

При температуре плавления материала контакты свариваются, сопротивление снижается (участок IV).

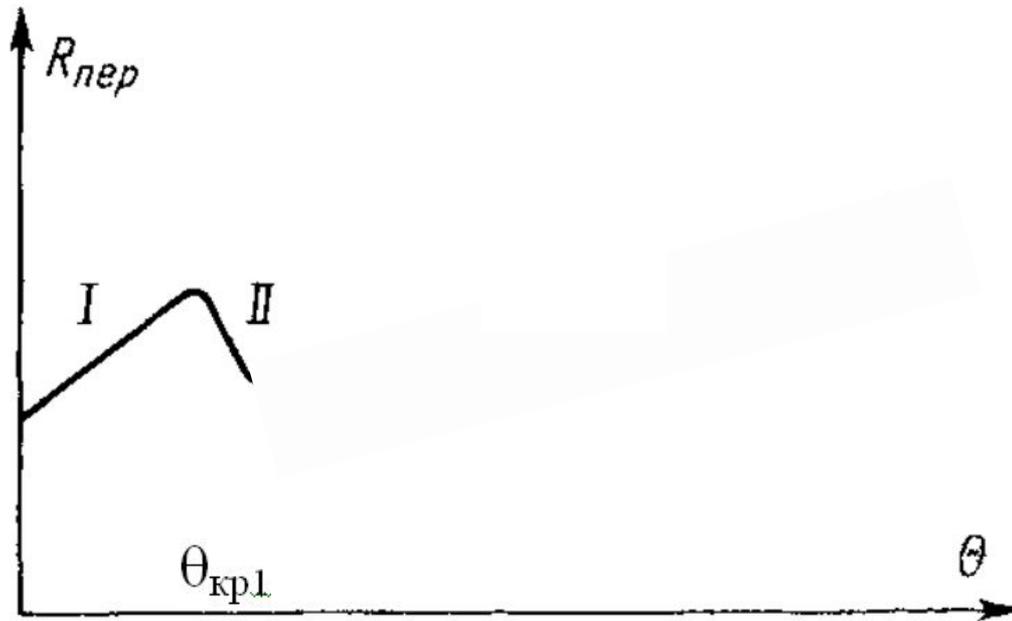


Рисунок 3.6 – Зависимость $R_{п}$ от температуры

Переходное сопротивление контакта (зависимость от состояния КП)

Шлифовка поверхностей увеличивает переходное сопротивление по сравнению с обработкой напильником, так как при шлифовке бугорки на поверхности становятся более пологими и смятие их затрудняется.

Переходное сопротивление контакта (зависимость от материала)

Значение $R_{\text{п}}$ существенно зависит от окисления поверхности. При этом оксиды многих металлов (в том числе и меди) являются плохими проводниками. Переходное сопротивление медных контактов со временем может возрасти в тысячи раз.

Повышение контактного нажатия затрудняет образование оксидных пленок, тем самым повышая срок службы КА.

Оптимальным материалом для контактов является серебро, так как его оксидные пленки имеют сопротивление близкое к сопротивлению чистого серебра.

Переходное сопротивление контакта (зависимость от тока)

Влияние величины тока, протекающего через контактные площадки, связано с повышением пластичности материала контактов при увеличении нагревания их током.

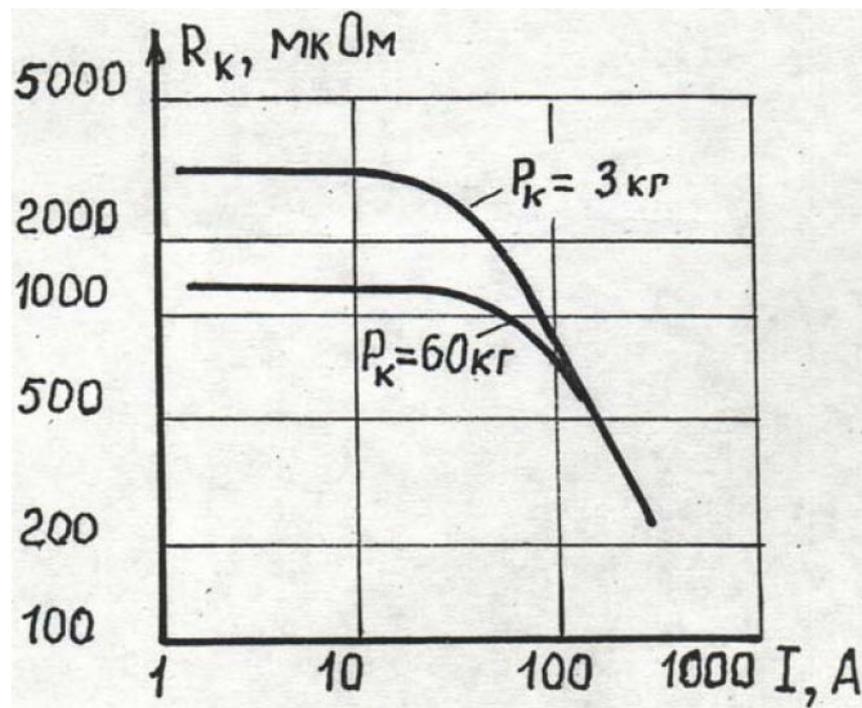


Рисунок 3.7 – Зависимость R_k от тока при разных давлениях

Нагрев контактов в режиме длительного протекания номинального тока

В процессе эксплуатации сопротивление контактов не остается постоянным.

Под воздействием агрессивных газов на поверхности металла образуется пленка, толщина которой со временем увеличивается.

Одновременно растет падение напряжения в контакте, и при достижении определенного значения происходит *фриттинг* контакта, т. е. разрушение пленки.

Затем начинается повторение процесса роста сопротивления и вновь наступает разрушение пленки.

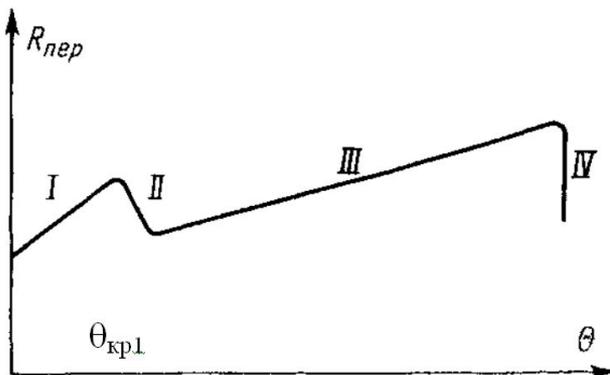
Если образующаяся пленка достаточно прочна, то сопротивление контакта может возрасти до недопустимых значений, при которых температура контакта будет опасна как для изоляции, так и для самих контактов.

Нагрев контактов в режиме длительного протекания номинального тока

Для надежной работы контактов необходимо, чтобы при номинальном токе $I_{\text{НОМ}}$ падение напряжения на переходном сопротивлении $R_{\text{п}}$ было меньше значения, определяемого соотношением:

$$I_{\text{НОМ}} R_{\text{п}} = (0,5 \div 0,8) U_{\text{КОНТ1}} \quad (3.6)$$

где $U_{\text{КОНТ1}}$ – критическое падение напряжения в контакте при температуре $\theta_{\text{кр1}}$, соответствующее точке размягчения материала (см. рисунок 3.6, переход с участка I на участок II).



Для различных материалов $U_{\text{КОНТ1}}$ колеблется от 0,1 до 0,4 В.

Нагрев контактов в режиме длительного протекания номинального тока

Температура и падение напряжения в контакте для точки
размягчения и точки плавления материала

Материал	$\Theta_1, ^\circ\text{C}$	$U_{\text{конт1}}, \text{В}$	$\Theta_2, ^\circ\text{C}$	$U_{\text{конт2}}, \text{В}$
Алюминий	150	0,1	658	0,3
Сталь	500	0,21	1530	0,6
Никель	520	0,22	1455	0,65
Медь	190	0,12	1083	0,43
Серебро	150	0,09	960	0,35
Кадмий	—	—	321	0,15
Вольфрам	1050	0,4	3370	1,0
Олово	100	0,07	232	0,13
Платина	540	0,25	1773	0,7
Графит	—	—	4700	5

Нагрев контактов в режиме длительного протекания номинального тока

Формула (3.6) используется для расчета слаботочных контактов.

По заданным току и падению напряжения определяется переходное сопротивление контакта для данного материала, после чего определяется требуемое контактное нажатие по формуле, Н:

$$F_{\text{кн}} = \sqrt{\frac{\rho \sqrt{\pi \sigma}}{2R_{\text{п}}}} \quad (3.7)$$

где ρ – удельное сопротивление, Ом·м;

σ – временное сопротивление материала смятию, Н/м² (Па).

Нагрев контактов в режиме длительного протекания номинального тока

Для контактов на большие токи можно использовать следующую

формулу:

$$F_{\text{кн}} = I_{\text{ном}}^2 \frac{B\pi HV}{16\lambda^2 \left(\arccos \frac{T_0}{T_{\text{к}}} \right)^2} \quad (3.8)$$

где B – число Лоренца;

HV – твердость по Виккерсу, Н/м^2 ;

λ – удельная теплопроводность материала контактов, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{С}^0)$;

$T_{\text{к}}$ – температура точки касания контактов, К ;

T_0 – температура тела контакта, К .

Нагрев контактов в режиме длительного протекания номинального тока

Для контактов на большие токи можно использовать следующую

формулу:

$$F_{\text{кн}} = I_{\text{ном}}^2 \frac{B\pi HV}{16\lambda^2 \left(\arccos \frac{T_0}{T_{\text{к}}} \right)^2} \quad (3.8)$$

Число Лоренца B и твердость зависят от температуры.

Температура точки касания в большинстве случаев не превышает температуры тела контакта более чем на 5 – 10 °С.

Нагрев контактов в режиме длительного протекания номинального тока

Температуру тела контакта можно определить по выражению:

$$T_0 = \frac{I^2 \rho}{k_T p q} + \theta_0 + 273 \quad (3.9)$$

где p – периметр сечения контакта, м;

q – сечение контакта, м²;

θ_0 – температура окружающей среды, °С, обычно принимается

$\theta_0 = 40$ °С.

k_T – удельный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·С⁰).

Нагрев контактов в режиме длительного протекания номинального тока

С точки зрения нагрева контакты являются наиболее нагруженным местом ТВС КА.

При токах 2 кА и выше идут по пути повышения температуры контактной точки и применения жидкостного охлаждения. В этом случае существенно облегчается контактная система, уменьшаются габариты КА, что дает возможность повысить быстродействие.