

В. М. ПОПОВ

ТЕПЛООБМЕН  
В ЗОНЕ  
КОНТАКТА  
РАЗЪЕМНЫХ  
И НЕРАЗЪЕМНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1971

**Попов В. М.**

II 58 Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М., «Энергия», 1971.

216 с. с ил.

Работа содержит результаты теоретического и экспериментального исследований теплообмена в зоне контакта твердых тел. Рассматриваются специфические особенности теплообмена через зону контакта при контакте поверхностей с волнистостью и макронеровностями, наличии окисных пленок, длительном воздействии нагрузки, начальных и последующих приложениях нагрузки. Выведенные расчетные зависимости для ряда указанных случаев теплового контакта подвергаются детальной экспериментальной проверке. Главное внимание при составлении работы было уделено выявлению физической сущности теплопередачи через зону контакта во всех специфических случаях контактирования и изложению инженерных методов расчета и искусственному изменению термического сопротивления. Приводятся практические рекомендации по использованию полученных результатов в различных отраслях промышленности. Книга рассчитана на инженеров и научных работников, работающих в области теплопередачи.

3-3-2  
24-70

6П2.2

*Виктор Михайлович Попов*

Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений

Редактор *Ю. М. Бабинов*

Технический редактор *О. П. Преснякова* Корректор *З. Б. Шлайфер*

Сдано в набор 29/ХII 1970 г.

Подписано к печати 13/У 1971 г.

T-06270

Формат 84×108<sup>1/16</sup>

Бумага типографская № 1

Усл. печ. л. 11,34

Уч.-изд. л. 12,87

Тираж 4 000 экз.

Цена 92 коп.

Зак. 1510

Издательство «Энергия» Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома  
Комитета по печати при Совете Министров СССР.  
Шлюзовая наб., 10.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие современной техники сопровождается интенсивным повышением тепловых нагрузок узлов и деталей конструкций. Значительные по величине тепловые потоки имеют место при работе высокофорсированных реактивных и газотурбинных двигателей, атомных реакторов, летательных аппаратов, паровых турбин и т. п. На тепловой режим узлов и деталей значительное влияние оказывает так называемое термическое сопротивление контакта, обусловленное несовершенством механического соединения контактирующих поверхностей. Этому вопросу в настоящее время посвящено значительное количество работ. Однако, несмотря на обширный материал, ощущается недостаток в обобщении ряда вопросов теплообмена в контактной зоне. Так, в имеющейся литературе отсутствуют исчерпывающие данные о влиянии на термическое сопротивление контакта физико-механических и геометрических характеристик реальных поверхностей. Остается открытым вопрос о контактном теплообмене для поверхностей с волнистостью и макронеровностями, при длительном тепловом контакте и наличии окисных пленок.

Предлагаемая вниманию читателей книга имеет цель в известной мере восполнить этот пробел. В данной книге приводится обзор последних экспериментально-теоретических работ по контактному теплообмену. Особое внимание уделяется вопросам физико-механических и геометрических свойств поверхностей и их контактирования в свете современных представлений. Этот раздел в значительной мере позволяет судить об особенностях теплообмена в контактной зоне твердых тел.

Приведенные в книге материалы по контактному теплообмену включают большое количество экспериментальных данных, подтверждающих для каждого частного случая предлагаемые расчетные зависимости. Даются рекомендации по искусственному изменению термического

сопротивления контакта разъемных и неразъемных соединений и примеры из различных областей техники по регулированию величины термического сопротивления. Все это может представить интерес для определенного круга научных и инженерно-технических работников.

Автор приписит благодарность канд. техн. наук, доц. М. С. Лазареву за советы при рассмотрении ряда вопросов.

В книге учтены ценные замечания, сделанные канд. техн. наук Ю. М. Бабиковым и доктором техн. наук Ю. П. Шлыковым.

*Автор*

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\alpha_K$  — тепловая проводимость контакта,  $вт/(м^2 \cdot град)$ ;

$\alpha_M$  — тепловая проводимость фактического контакта,  $вт/(м^2 \cdot град)$ ;

$\alpha_c$  — тепловая проводимость среды в зоне контакта,  $вт/(м^2 \cdot град)$ ;

$R_K = 1/\alpha_K$  — термическое сопротивление контакта,  $м^2 \cdot град/вт$ ;

$R_M = 1/\alpha_M$  — термическое сопротивление фактического контакта,  $м^2 \cdot град/вт$ ;

$R_c = 1/\alpha_c$  — термическое сопротивление межконтактной среды,  $м^2 \cdot град/вт$ ;

$R_o$  — термическое сопротивление окисной пленки,  $м^2 \cdot град/вт$ ;

$T_K$  — средняя температура в зоне контакта, °К;

$q$  — удельный тепловой поток,  $вт/м^2$ ;

$\Delta T = qR_K$  — температурный скачок в зоне контакта, °С;

$F$  — площадь поперечного сечения,  $м^2$ ;

$\delta$  — толщина прослойки среды в зоне контакта,  $м$ ;

$\lambda_c$  — коэффициент теплопроводности межконтактной среды,  $вт/(м \cdot град)$ ;

$\lambda_M$  — коэффициент теплопроводности контактирующего материала,  $вт/(м \cdot град)$ ;

$\bar{\lambda}_M = \frac{2\lambda_{M1}\lambda_{M2}}{\lambda_{M1} + \lambda_{M2}}$  — приведенная теплопроводность контактирующих материалов,  $вт/(м \cdot град)$ ;

$N$  — нормальная нагрузка,  $н$ ;

$p = N/S_n$  — удельная нормальная нагрузка на поверхность соприкосновения (контактное давление),  $н/м^2$ ;

$S_n$  — номинальная (геометрическая) площадь контакта,  $м^2$ ;

$S_f$  — фактическая площадь контакта,  $м^2$ ;

$S_K$  — контурная площадь контакта,  $м^2$ ;

$q_K = N/S_K$  — контурное давление,  $н/м^2$ ;

$\eta$  — относительная площадь контакта;

$\varepsilon$  — относительное сближение соприкасающихся поверхностей под действием нагрузки;

$h_{ср}$  — средняя высота выступов микронеровностей,  $м$ ;

$h_{макс}$  — максимальная высота выступов микронеровностей,  $м$ ;

$H_{ср.в}$  — средняя высота выступов воли,  $м$ ;

$H_{\text{макс.в}}$  — максимальная высота выступов волн, м;

$L$  — шаг волны, м;

$d_{\text{экрв}} = d_1 + d_2$  — общая эквивалентная неполюскость, м;

$E$  — модуль Юнга, н/м<sup>2</sup>;

$\mu$  — коэффициент Пуассона;

$HВ$  — твердость по Бринеллю, н/м<sup>2</sup>;

$H_M$  — твердость по Мейеру, н/м<sup>2</sup>;

$\sigma_v$  — временное сопротивление разрыву или предел прочности, н/м<sup>2</sup>;

$\varphi$  — коэффициент стягивания линий теплового тока в местах фактического контакта;

$m$  — коэффициент заполнения профиля микронеровностей;

$K$  — коэффициент заполнения профиля волн.

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНТАКТНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

#### 1-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О КОНТАКТНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

При прохождении теплового потока через соприкасающиеся поверхности двух тел температуры на границе раздела их в любой момент времени будут равны только в том случае, если соприкосновение происходит во всех точках поверхности, т. е. если контакт является идеальным. В результате этого линии теплового потока при подходе к зоне контакта не претерпевают сколько-нибудь заметных отклонений от прямых.

Практически соприкосновение поверхностей двух твердых тел при контактировании происходит в отдельных точках и характеризуется неравенством температур на границе раздела этих тел, а линии теплового потока при подходе к зоне контакта имеют отклонения от прямых.

В инженерной практике могут быть выделены две разновидности теплового контакта деталей: неразъемные соединения и разъемные соединения. Многие неразъемные соединения с совершенным механическим контактом практически могут быть отнесены к идеальным контактам. Разъемные же соединения всегда имеют дискретный характер механического соприкосновения поверхностей деталей, т. е. непосредственный контакт происходит в отдельных точках (пятнах) или группах точек номинальной поверхности. Это обусловлено наличием на соприкасающихся поверхностях, как бы ни были они тщательно обработаны, неровностей в виде шероховатости, волнистости или макронеровности. В результате теплообмен в контактной зоне сопровождается равенством температур лишь в отдельных точках или группах точек касания номинальной поверхности. Поскольку теплопроводность контактирующих материалов обычно во много

раз выше теплопроводности межконтактной среды, заполняющей пространство между выступами неровностей, основная часть теплового потока устремляется к пятнам фактического контакта (рис. 1-1,а). Таким образом, в контактной зоне наблюдается стягивание линий теплового потока к пятнам фактического контакта. Отсутствие сплошности механического контакта приводит к температурному перепаду между соприкасающимися поверхностями деталей:

В современных тепловых машинах величина температурного скачка в контактной зоне деталей составляет

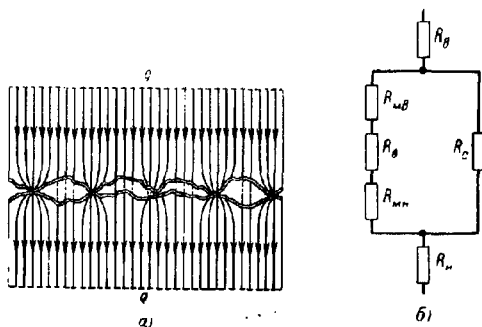


Рис. 1-1. Контакт плоскостно-шероховатых поверхностей.

а — стягивание линий теплового потока к пятнам фактического контакта; б — составляющие термического сопротивления контакта.

в большинстве случаев десятки градусов, доходя в конструкциях ядерных реакторов, газовых турбин и летательных аппаратов до нескольких сотен градусов.

Наличие температурного перепада между контактирующими поверхностями характеризует величину контактного термического сопротивления  $R_k$ . Термическое сопротивление контакта является следствием процесса стягивания линий теплового тока к пятнам непосредственного контакта и наличия малотеплопроводной межконтактной среды. Таким образом, контактное термическое сопротивление на границе раздела твердых тел обуславливается несовершенством их контакта.

Вследствие дискретного характера контакта процесс передачи тепла через зону контактирующих поверхностей твердых тел представляет собой довольно сложную



картину. В первом приближении можно считать, что передача тепла через зону контакта при наличии теплопроводной среды осуществляется одновременно тремя путями: теплопроводностью непосредственно через пятна фактического контакта материалов, теплопроводностью через среду, заполняющую впадины неровностей и, наконец, излучением между поверхностями. Ввиду того, что для большинства разновидностей контактов твердых тел высота неровностей мала по сравнению с общей площадью соединения, целесообразно пренебречь теплообменом в зоне контакта как от теплопроводности вдоль зазора, так и от свободной конвекции. До температур в контактной зоне порядка 700—750° К теплообменом путем излучения можно также пренебречь, так как по оценкам экспериментальных работ его величина незначительна. При температурах выше 700—750° К наиболее целесообразно вводить так называемый эффективный коэффициент теплопроводности.

С учетом указанных выше допущений общая проводимость контакта может быть представлена суммой проводимости мест фактического контакта  $\alpha_m$  и проводимости межконтактной среды  $\alpha_c$ , т. е.

$$\alpha_k = \alpha_m + \alpha_c, \quad (1-1)$$

или, выразив проводимости через термические сопротивления контакта, получим:

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_c} \quad (1-2)$$

Составляющие общего термического сопротивления  $R_k$  контакта имеют различный механизм образования. Первая составляющая образуется в результате стягивания линий теплового тока к пятнам фактического контакта, т. е. сопротивления  $R_m$ , и наличия препятствий на их пути в виде малотеплопроводной окисной пленки, т. е. сопротивления  $R_o$ . Следовательно, образуются два добавочных термических сопротивления, включенных последовательно:  $R_m$  и  $R_o$ . Термическое сопротивление фактического контакта  $R_m$  (рис. 1-1,б) равно сумме сопротивлений для верхнего и нижнего тел, т. е.  $R_m = R_{mв} + R_{mн}$ . Вторая составляющая общего термического сопротивления  $R_c$  является следствием наличия малотеплопроводной среды в зоне контакта, препятствующей распространению тепла, и действует параллельно первой

составляющей. Как показывает практика работы узлов и деталей конструкций, их контактирующие поверхности зачастую испытывают однозначные либо циклические механические и тепловые нагрузки. Очевидно, что при изменении условий сжатия поверхностей будет наблюдаться перераспределение линий теплового потока. Увеличение нагрузки приведет к снижению термического сопротивления контакта за счет увеличения фактической площади касания поверхностей и, наоборот, уменьшение нагрузки повысит термическое сопротивление.

Можно также утверждать, что повышение температуры в зоне раздела приведет к снижению термического сопротивления за счет понижения твердости материалов и увеличения теплопроводности межконтактной газовой среды. Судить же о величине термического сопротивления контакта в каждом частном случае можно на основе эксперимента или расчета.

К работе современных машин предъявляются повышенные требования по интенсификации процессов охлаждения их рабочих зон. Одним из резервов на пути увеличения количества отводимого из рабочей зоны объекта тепла представляются мероприятия по снижению термического сопротивления составных конструкций.

Так, для нормальной работы радиоэлектронных устройств большое значение придается созданию оптимального теплового режима. Во избежание перегрева деталей они в большинстве случаев охлаждаются кондуктивно путем крепления к устройствам с развернутой теплоотдающей поверхностью (шасси, радиаторы). В местах посадки деталей на шасси или радиатор, как правило, имеет место воздушная прослойка переменной толщины за счет дискретного характера касания поверхностей. Следствием наличия в зоне посадки деталь — радиатор или шасси воздушной прослойки является термическое сопротивление, препятствующее охлаждению радиоэлектронных устройств.

Одним из главных направлений повышения экономичности газотурбинных двигателей считается создание компактных теплообменных аппаратов. Для этих целей применяются пластинчатые поверхности нагрева, соединенные припоем. Крепление пластинчатых поверхностей к разделительным пластинам на припое не исключает дискретного механического контакта и наличия газовых

прослоек. Возникающее при этом термическое сопротивление в зоне соединения пластин оказывает отрицательное влияние на процесс теплообмена.

Еще более остро ставится вопрос по интенсификации процесса теплообмена от тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, из рабочей зоны летательных аппаратов, а также в тех областях новой техники, где контактный теплообмен оказывает значительное влияние на тепловой режим работы теплонапряженных узлов и деталей.

Приведенные выше особенности теплообмена в зоне контакта узлов и деталей конструкций позволяют судить о том большом значении, которое играет контактный теплообмен в технике.

Более углубленное исследование контактного теплообмена в настоящее время вызывается необходимостью решения ряда практических задач.

## 1-2. ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАБОТ ПО КОНТАКТНОМУ ТЕПЛООБМЕНУ

По контактному теплообмену проведено большое количество исследований как экспериментального, так и теоретического характера [Л. 1—19]. В монографии Шлыкova и Ганина [Л. 14] приведен тщательный анализ результатов работ отечественных и зарубежных исследователей контактного теплообмена и механического контакта поверхностей [Л. 1—13]. Обзор указанных работ, посвящих в основном экспериментальный характер, позволяет сделать следующие практические выводы:

1. При тепловом контакте двух твердых тел в зоне раздела имеет место термическое сопротивление контакта.

2. Термическое сопротивление контакта понижается с увеличением нагрузки на соприкасающиеся поверхности по линейному закону для высокотвердых и малотеплопроводных металлов (сталь) и по экспоненте для мягких и высокотеплопроводных металлов (алюминий, медь, бронза).

3. Термическое сопротивление контакта мало зависит от нагрузки для поверхностей с высокой чистой обработкой.

4. Термическое сопротивление контакта понижается с увеличением чистоты обработки контактных поверхностей.

5. Термическое сопротивление контакта уменьшается при повышении температуры в зоне раздела.

6. Величина термического сопротивления контакта может быть снижена путем введения в контактную зону газов с более высоким коэффициентом теплопроводности, масла или фольги из мягких металлов.

7. Остается открытым вопрос о возможности теоретического решения проблемы.

Исследования контактного теплообмена затрагивают самые разнообразные области науки и техники. В этой связи следует отметить исследование Заварицкого [Л. 15], отвечающее нуждам измерительной техники. Необходимость постановки исследования была вызвана следующими причинами. При определении теплоемкости различного рода материалов для гелиевых температур зачастую необходимо осуществлять вначале тепловой контакт материала

с окружающей средой, после чего необходима его полная тепловая изоляция. Тепловой контакт со средой производится за счет теплопроводности газа, а тепловая изоляция — путем создания в измерительной камере высокого вакуума. Трудоемкость указанной операции заставила искать более рациональные решения. Автор ставит задачу замены теплового контакта через газ механическим контактом.

Для исследования применялась установка, схема которой приведена на рис. 1-2. Объектом исследования избирались медные образцы 1 и 2 с конусообразными поверхностями, расположенные внутри латунного цилиндра 3. Через стейбритовую трубку 4 осуществлялось нагружение образцов путем подвешивания грузов к рычагу. На образце 2 были намотаны нагреватель и термометр сопротивления. Вывод проводов осуществлялся через платиновые выводы 5. Посредством трубки 6 камера 3 в нагретом состоянии промывалась углекислотой для удаления остатков гелия. В камере создавалось остаточное давление порядка  $10^{-2}$  мм рт. ст. Во время опыта измерялась температура образца 2 с помощью термометра сопротивления.

Тепловая проводимость через зону контакта образцов вычислялась по формуле  $\alpha_{\text{к}} = W/\Delta T S$ , где  $W$  —

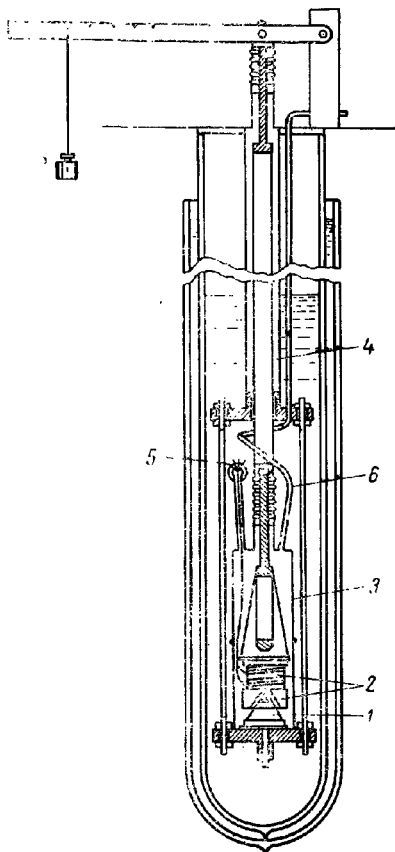


Рис. 1-2. Схема установки для исследования контактного теплообмена при гелиевых температурах.

1 — снятый образец, складываемый гелием; 2 — опытный образец с нагревателем; 3 — корпус; 4 — стейбритовая трубка; 5 — платиновые выводы; 6 — трубка для промывки.

мощность выделяющаяся в нагревателе;  $\Delta T$  — разность температур между образцом 2 и гелием;  $S$  — площадь контактирующих поверхностей.

В результате экспериментов было выявлено, что тепловая проводимость контакта прямо пропорциональна нагрузке и квадрату абсолютной температуры при одном и том же значении нагрузки.

В работе [Л. 15] считается что тепловая проводимость контакта определяется в основном передачей тепла через места непосредственного контакта при давлении в камере порядка  $10^{-2}$  мм рт. ст. В то же время отмечается, что повышение давления гелия до  $10^{-1}$  мм рт. ст. повышает тепловую проводимость контакта при нагрузке  $p = 30 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> в 3 раза. Это объясняется тем, что при давлении в камере  $10^{-1}$  мм рт. ст. значительно увеличивается передача тепла через газовую прослойку. К сожалению, отсутствие данных по чистоте контактирующих поверхностей не даст возможности провести какие-либо сопоставления.

Наиболее значительной с точки зрения выявления действительной физической сущности теплообмена в зоне контакта металлических плоских поверхностей и вывода расчетных формул для раздельного определения составляющих термического сопротивления

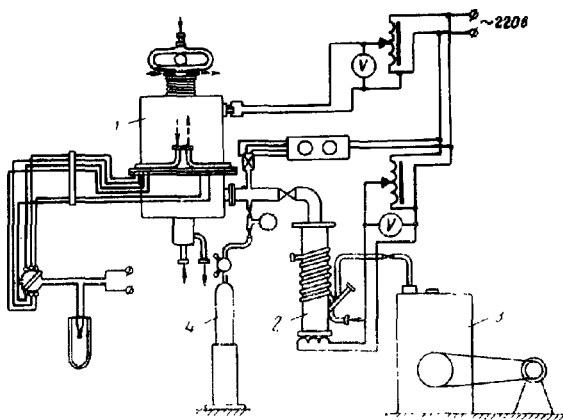


Рис. 1-3. Схема экспериментальной установки.

1 - герметическая рабочая камера; 2 - диффузионный масляный насос; 3 - форвакуумный насос; 4 - газовый баллон для заполнения рабочей камеры газом.

по упрощенной схеме представляется серия работ Шлыкова и Ганина [Л. 14, 16—19], которые отвечают запросам теплоэнергетики.

Приняв за основу схему формирования фактической площади контакта в результате чисто пластической деформации микронеровностей, аналитически описанной в работах [Л. 12, 20], и применив известное решение уравнения Лапласа [Л. 21], авторы в результате ряда других допущений пришли к следующему выражению для определения термической проводимости контакта плоских поверх-

ностей:

$$\frac{1}{R_k} = \frac{2\lambda_0}{h_{cp1} + h_{cp2}} + 2,1 \frac{N\lambda_m}{3\sigma_n S_n} \cdot 10^4. \quad (1-3)$$

Первое слагаемое выражения (1-3) представляет собой тепловую проводимость межконтактной среды. Отсюда термическое сопротивление межконтактной среды представляется в виде

$$R_c = \frac{h_{cp1} + h_{cp2}}{2\lambda_0}. \quad (1-3a)$$

Второе слагаемое выражения (1-3) является тепловой проводимостью через места фактического контакта. В этом случае термическое сопротивление фактического контакта описывается следующим выражением:

$$R_m = \frac{3\sigma_n S_n}{2,1N\lambda_m} \cdot 10^{-4}. \quad (1-3b)$$

Формулы (1-3)—(1-3b) показывают, что минимальные значения термических сопротивлений для контакта плоских шероховатых поверхностей будут иметь место при отсутствии волнистости и макроровности.

Для выявления достоверности и границ применения предложенных зависимостей (1-3)—(1-3b) авторами была поставлена серия опытов на специально изготовленной установке стержневого типа (рис. 1-3) по методике, применяемой в работах [Л. 7, 9].

В состав экспериментальной установки входил герметическая рабочая камера с образцами, диффузионный масляный насос, форвакуумный насос, баллон для заполнения рабочей камеры газом, а также электропитательная и измерительная аппаратура. В рабочей камере установки, изготовленной в виде разъемного сосуда, между электронагревателем и водяным холодильником помещалось по два цилиндрических образца диаметром 30 и длиной 34 мм каждый. По длине образцов устанавливались 10 термопар, по пять на каждом образце. Сжатие образцов производилось при помощи рычажного винтового пресса с одновременным замером усилия динамометрической скобой. При проведении опытов измерялись температура по длине образцов, сила сжатия и давление (вакуум) газовой среды. Исследованиям подвергались в основном однородные контактные пары из металлов и сплавов Д16, М-2, Ст. 3, 1Х18Н9Т. Температура в зоне контакта выдерживалась в

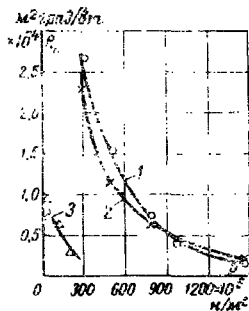


Рис. 1-4. Зависимость термического сопротивления контакта с металлическими прокладками от сжатия. Материал пары 1Х18Н9Т—1Х18Н9Т; чистота обработки поверхностей  $\nabla 6-\nabla 6$ ;  $T_{\text{кон}} = 383^\circ \text{K}$ .

1 — медная фольга; 2 — алюминиевая фольга; 3 — оловянная пластинка

диапазоне 353—543° К; тепловые потоки поддерживались в пределах  $(160 \div 2000) \cdot 10^3$  вт/м<sup>2</sup>. Чистота обработки поверхностей находилась в широком диапазоне от 3-го до 12-го класса. Экспериментальная установка позволяла создавать с помощью масляного и форвакуумного насосов глубокий вакуум (до  $10^{-4}$  мм рт. ст.), когда теплопроводность газовой среды была пренебрежимо мала ( $\lambda_c \rightarrow 0$ ). Результаты подавляющего большинства опытов подтверждают ряд положений предшествующих исследований.

Авторами работ [Л. 14, 16—19] получен был также ряд новых данных по контактному теплообмену. Так, рекомендуется пренебрегать зависимостью сопротивления прослойки среды от силы сжатия и принимать его постоянным, т. е. зависимость полного термического сопротивления контакта от давления считать обусловленной только изменением проводимости фактического контакта. Представляют интерес результаты раздельного опытного определения составляющих термического сопротивления, которые подтверждают приведенные положения. Кроме того, авторы детально объясняют физическую сущность процесса теплообмена в зоне контакта. Так повышение чистоты обработки контактных поверхностей, при которой снижается средняя высота микронеровностей, ведет к повышению проводимости среды, т. е. к возрастанию первого, постоянного, члена суммы двух слагаемых в формуле (1-3)). Вторая, переменная часть суммы выражения (1-3), представляющая проводимость фактического контакта и зависящая от нагрузки, оказывает меньшее влияние на сумму двух слагаемых, и зависимость  $R_p = f(p)$  уменьшается. Установлено уменьшение зависимости термического сопротивления контакта от нагрузки при повышении теплопроводности межконтактной среды и снижении пластичности материала.

Проведенные исследования по снижению термического сопротивления контакта путем введения в зону контакта прокладок из мягких металлов (рис. 1-4) указывают на наибольший эффект, получаемый при использовании прокладок из олова.

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований контактного теплообмена авторы работ [Л. 14, 16—19] делают следующие выводы:

1. Общее термическое сопротивление контакта и его составляющие с достаточной для практических целей точностью могут быть определены расчетным путем для плоских поверхностей с чистотой обработки 4—9-го класса (рис. 1-5) при достаточно удовлетворительной сходимости с экспериментальными данными.

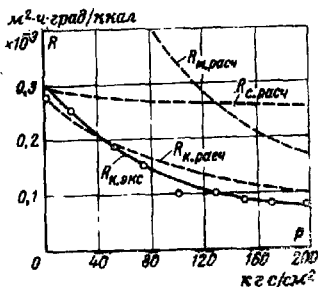


Рис. 1-5. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки для пары из стали 1X18H9T с шероховатой и гладкой поверхностями. Чистота обработки поверхностей  $\nabla 4 - \nabla 12$ ;  $q_{\text{ср}} = 92,5 \cdot 10^3$  вт/м<sup>2</sup>; межконтактная среда — воздух.

2. При контакте тел из мягких металлов с большой теплопроводностью основная часть теплового потока проходит через места фактического контакта, а для твердых металлов с малой теплопроводностью определяющую роль играет проводимость среды (рис. 1-6).

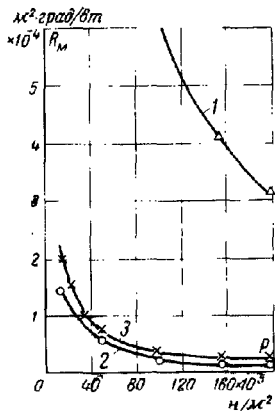


Рис. 1-6. Зависимость термического сопротивления фактического контакта от нагрузки.

1 — пара 1Х18Н9Т—1Х18Н9Т; 2 — пара Д16—Д16; 3 — пара М2—М2.

3. Изменение общего термического сопротивления в зависимости от усилий сжатия в основном зависит от изменения проводимости через места фактического контакта.

Полученные в работах [Л. 14, 16—19] результаты имеют большое значение для понимания физики процесса передачи тепла через контактные соединения. Однако эти работы в общем ограничиваются рассмотрением исключительно плоских поверхностей с чистой обработкой в пределах 4—9-го классов.

Интересное решение задачи теплообмена в зоне контакта для идеализированной схемы было осуществлено в работе Фенча и Розенова [Л. 22]. Они предложили математический расчет для случая идеального контакта, имеющего форму цилиндра конечной высоты и окруженного жидкостью, заполняющей зазоры. Цилиндры имеют постоянный радиус  $c$  и располагаются по треугольной сетке. Один такой «кнопочный» контакт изображен на рис. 1-7, где  $\delta_1$  и  $\delta_2$  представляют собой среднюю высоту полосы для двух материалов: 1 и 2. Вследствие наличия многочисленных условий, подлежащих удовлетворению, точный анализ распределения температур для данной задачи авторы считают неприемлемым. Они вводят допущения, чтобы решить задачу методом разделения переменных  $r$  и  $z$  в каждой из трех цилиндрических областей (I, I' и II) канала теплового потока.

Пренебрегая зависимостью коэффициента теплопроводности материалов от температуры, авторы представляют уравнение теплопроводности для стационарных условий в виде

$$\nabla^2 T = 0. \quad (1-4)$$

Для упрощения решения задачи с различными краевыми усло-

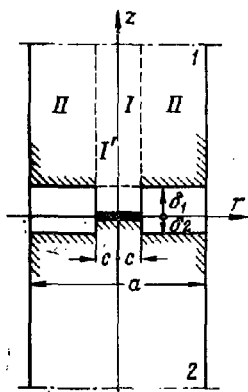


Рис. 1-7. Схема идеализированного «кнопочного» контакта.



виями авторы идут по пути приближенного решения с использованием средних граничных условий между областями. Средние граничные условия записываются в виде:

область I

$$z \rightarrow \infty; T_I \rightarrow gz; \delta < z < \infty; r = 0; T_I \text{ регулярна;}$$

область I'

$$z = 0; 0 < r < c; \int_0^c (T_{I'} - T_0) r dr = 0;$$

область II

$$z \rightarrow \infty; T_{II} \rightarrow gz; \delta < r < \infty; r = a; \int_{\delta}^{\infty} \frac{\partial T_{II}}{\partial r} dz = 0,$$

где  $T_0$  — температура в месте фактического контакта;

$c$  — средний радиус контакта (рис. 1-7).

Кроме того, на границах между областями также задавались определенные граничные условия:

переход I—I'

$$z = \delta; 0 < r < c; \int_{\delta}^c (T_I - T_{I'}) r dz = 0;$$

$$\int_0^c \frac{\partial (T_I - T_{I'})}{\partial z} r dz = 0;$$

переход I—II

$$\delta < r < \infty; r = c; \int_{\delta}^{\infty} (T_I - T_{II}) dz = 0;$$

$$\int_{\delta}^{\infty} \left( \frac{\partial T_I}{\partial r} - \frac{\partial T_{II}}{\partial r} \right) dz = 0.$$

На основании заданных условий решения имеют вид

$$T_I = T_0 + g(z + d) + A I_0(\alpha r) e^{-\alpha z};$$

$$T_{I'} = T_0 + gz;$$

$$T_{II} = T_0 + g(z + d) + B I_0(\beta r) e^{-\beta z} + N Y_0(\gamma r) e^{-\gamma z},$$

где  $I_0$  и  $Y_0$  — функции Бесселя 1-го и 2-го рода соответственно;

$d, A, B, N, \alpha, \beta, \gamma$  — постоянные, определяемые из граничных условий.

Член  $gd$  представляет собой температурный напор за счет теплового возмущения в контактной зоне. Тепловая проводимость через контактную зону представляется авторами в виде

$$\alpha_k = \frac{1}{\frac{d_1}{\lambda_{м1}} + \frac{d_2}{\lambda_{м2}}}, \quad (1-5)$$

где неизвестные  $d_1$  и  $d_2$  определяются путем решения для постоянных из граничных условий.

Произведя замену  $d_1$  и  $d_2$  и проделав ряд элементарных преобразований, Фенеч и Розенов получили следующую формулу для тепловой проводимости контакта:

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{\frac{\lambda_c}{\delta_1 + \delta_2} \left[ (1 - \eta) \left( \frac{4,26\delta_1 \sqrt{n_1/\eta} + 1}{\lambda_{\text{м1}}} + \frac{4,26\delta_2 \sqrt{n_1/\eta} + 1}{\lambda_{\text{м2}}} + \right. \right.}{(1 - \eta) \left[ 1 - \frac{\lambda_c}{\delta_1 + \delta_2} \left( \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{м1}}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{\text{м2}}} \right) \right] \times} \rightarrow$$

$$\left. \left. + 1,1 \sqrt{\eta} f(\sqrt{\eta}) \left( \frac{1}{\lambda_{\text{м1}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{м2}}} \right) \right] + 4,26 \sqrt{\eta} n_1}{\times \left[ \frac{4,26\delta_1 \sqrt{n_1/\eta} + 1}{\lambda_{\text{м1}}} + \frac{4,26\delta_2 \sqrt{n_1/\eta} + 1}{\lambda_{\text{м2}}} \right]}, \quad (1-6)$$

где  $\eta$  — относительная площадь фактического контакта;

$n$  — число точек контакта на единицу площади;

$f(\sqrt{\eta})$  — функция, представленная на графике на рис. 1-8.

Выражение (1-6) представляет собой сумму двух дробей. Первая дробь с квадратными скобками в числителе характеризует тепловой поток через межконтактную прослойку, а вторая — через пятна фактического контакта. Входящие в эту формулу величины  $\delta$ ,  $n$  и  $\eta$  авторы предлагают определять графическим способом по профилограммам поверхностей. Последний требует определения физико-механических и геометрических характеристик контактирующих материалов и поверхностей. На профилометре получают линейные профили двух контактирующих поверхностей по двум взаимно перпендикулярным направлениям для каждой поверхности.

Ориентация двух направлений на одной поверхности должна быть такой, чтобы при контакте они совпадали с соответствующими двумя направлениями на другой поверхности. Путем взаимного наложения полученных профилограмм не представляет особого труда определить  $\delta$ ,  $n$  и  $\eta$  для данной контактной пары.

Для проверки этого метода авторы провели серию опытов на стандартной установке. Испытаниям подвергались образцы из армо-железа и алюминия с поверхно-

стями, имеющими пирамидальные выступы. К образцам прикладывались нагрузки в диапазоне  $(6 \div 176) \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Результаты опытов подтвердили достоверность предлагаемой зависимости (1-6). Следует отметить, что указанный метод определения геометрических характеристик контактирующих поверхностей путем наложения профилограмм более приемлем для научных исследований по выявлению физики процесса контактного теплообмена, нежели для применения в широкой инженерной практике.

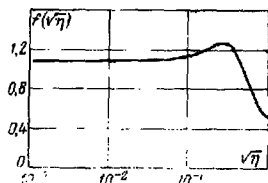


Рис. 1-8. График функции  $f(\sqrt{\eta})$ .

Экспериментальные работы Миллера [Л. 23—25], отвечающие запросам турбостроения, и Хижняка [Л. 26, 27] для нужд самолетостроения ставили перед собой цель заполнить ряд пробелов в экспериментальной части исследований по контактному теплообмену.

Работы Миллера включают постановку опытов на образцах из бронзы, дюрала, меди, стали 45, 1X13 в широком диапазоне классов чистоты обработки поверхностей ( $\nabla 2$ — $\nabla 8$ ) при усилиях сжатия до  $4900 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . В зоне контакта использовались различные газовые среды: воздух, углекислый газ, водород. Часть опытов проводилась в условиях глубокого вакуума. Для постановки опытов применялась обычная установка стержневого типа. Экспериментальные данные в основном подтверждают ранее выявленные положения по контактному теплообмену металлических поверхностей.

Термическое сопротивление контакта уменьшается с повышением теплопроводности контактирующих металлов, увеличением усилия сжатия образцов и повышением класса чистоты обработки поверхностей. Подтверждается также значительное увеличение термического сопротивления контакта в среде глубокого вакуума.

Для нужд газотурбостроения, когда детали работают при температурах выше  $1100^\circ \text{К}$ , были поставлены опыты [Л. 23—25]

по определению термического сопротивления контакта стали с металлокерамическими сплавами в зависимости от нагрузки при различной чистоте обработки поверхностей (рис. 1-9). Примененные в опытах образцы из металлокерамики имели два вида контактных поверхностей. Контактные поверхности одной части образцов были обработаны анодно-механическим способом по 4—5-му классу чистоты, а контактные поверхности другой части образцов не подвергались специальной обработке и имели 2-й класс чистоты. Сила сжатия изменялась в диапазоне  $(5 \div 392) \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ; тепловые потоки достигали величины  $(25,6 \div 29,1) \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2$  при средней температуре зоны контакта  $T_k = 570^\circ \text{К}$ . Результаты опытов показывают, что для одних и тех же условий величина термического сопротивления при контакте металлокерамика—металл несколько меньше, чем для пары металлокерамика—металлокерамика. Термическое сопротивление контакта уменьшается при повышении чистоты обработки поверхностей, зависимость же сопротивления от усилия сжатия в области выше  $296 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  приобретает асимптотический характер (рис. 1-9).

Определенный практический интерес представляет предложенный метод снижения термического сопротивления контакта путем гальванического нанесения на контактные поверхности тонкого

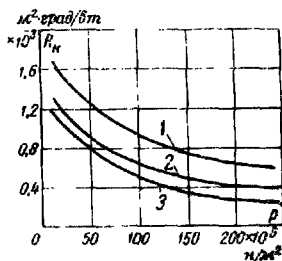


Рис. 1-9. Зависимость термического сопротивления контакта пары металлокерамика—сталь 45 от нагрузки при различной чистоте обработки поверхностей пары.

1 — для  $\nabla 5$  —  $\nabla 3$ ; 2 — для  $\nabla 5$  —  $\nabla 5$ ; 3 — для  $\nabla 5$  —  $\nabla 8$ .

слоя из высокотеплопроводного мягкого металла, например меди [Л. 25]. Было поставлено несколько серий опытов на образцах из стали 1Х13 с исходной чистотой обработки контактных поверхностей  $\nabla 3$ ,  $\nabla 5$  и  $\nabla 8$ . Результаты опытов (рис. 1-10) показывают, что величина контактного термического сопротивления при соприкосновении поверхностей с медным покрытием в диапазоне давлений  $(30 \div 150) \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  в 8-12 раз меньше, чем у поверхностей без покрытия. Дальнейшее увеличение усилия сжатия не оказывает существенного влияния на величину контактного сопротивления.

Основную роль в формировании термического сопротивления контакта автор приписывает явлению пластической деформации мягкого металла покрытия. Толщину покрытия рекомендуется выбирать в пределах, незначительно превышающих сумму средних высот микронеровностей контактных поверхностей.

В работах [Л. 23, 24] предпринимается попытка определения термического сопротивления в зоне контакта расчетным путем. На основе несложных рассуждений предлагается формула для определения термического сопротивления контакта в следующем виде:

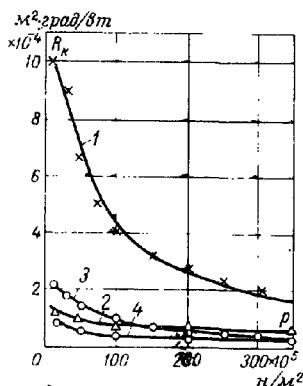


Рис. 1-10. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки для пары из стали 1Х13—1Х13 при различной чистоте обработки поверхностей.

1 — чистота обработки поверхностей  $\nabla 3$ ; 2 — поверхности покрыты слоем меди толщиной 100 мкм; 3 — чистота обработки поверхностей  $\nabla 8$ ; 4 — поверхности покрыты слоем меди толщиной 25 мкм.

$$R_k = \frac{\delta(1-\varepsilon)}{\omega\eta\lambda_m + (1-\eta)\lambda_c}, \quad (1-7)$$

где  $\varepsilon$  — относительное сближение поверхностей;

$\delta$  — толщина газовой прослойки;

$\omega$  — коэффициент поверхности, показывающий отличие теплопроводности поверхностного слоя от теплопроводности основного материала;

$\omega = 0,2 \div 0,8$ ;

$\eta$  — относительная площадь фактического контакта.

Входящие в формулу (1-7) относительные величины  $\varepsilon$ ,  $\eta$  и  $\omega$ , зависящие от нагрузки, прилагаемой к соприкасающимся поверхностям, по сути дела не расшифрованы, что значительно снижает практическую ценность данной формулы.

Несмотря на обширный опытный материал, автор не делает попыток к его обобщению и выводу количественных зависимостей для расчета термического сопротивления контакта плоских поверхностей. Выдвигаемая же автором концепция о преобладающей роли газовой прослойки в передаче

общего количества тепла через контактную зону преподносится без каких-либо доказательств.

В серии работ Хижняка [Л. 26, 27] экспериментальная программа включает в себя постановку опытов в широком диапазоне температур (334—774° К) и удельных тепловых потоков от  $2,7 \cdot 10^4$  до  $25 \cdot 10^4$   $вт/м^2$ , в основном для контактных пар из сплава Д16Т, стали 30ХГСА, титанового сплава ВТЗ, имеющих поверхности сопряжения повышенной частоты обработки  $\nabla 7$  и выше.

Постановка экспериментов была осуществлена на опытной установке стержневого типа с некоторыми изменениями конструктивного характера. В частности, применялся одновременно контакт трех образцов, что позволило за один опыт снимать данные по двум контактным парам поверхностей. Автор рассматривает не равномерный (идеальный) контакт по всей номинальной площади, а действительный характер сопряжения поверхностей деталей машин; при этом он учитывает наличие даже при высокой чистоте обработки поверхностей различного рода неровностей, которые могут оказать существенное влияние на величину контактного сопротивления соединения. Опытные данные в виде зависимости термического контактного сопротивления от нагрузки при наличии неровностей на контактных поверхностях представлены на рис. 1-11. Из рассмотрения этих графиков следует, что общий характер зависимостей  $R_k = f(p)$  не отличается от зависимостей для контакта плоских поверхностей.

В то же время величина термического сопротивления для пар с неровностями поверхностей значительно превышает величину сопротивления пар с плоскими поверхностями. Результаты опытов привели также к выводу о нецелесообразности обработки поверхностей выше  $\nabla 9$ , так как выигрыш в снижении величины  $R_k$  незначителен.

Определенный практический интерес представляет предложенный в работе [Л. 27] расчетный способ определения составляющих контактного термического сопротивления без постановки опытов в глубоком вакууме на специальных экспериментальных установках.

В работе [Л. 26] приводится полуэмпирическая зависимость для приближенного расчета контактной термической проводимости

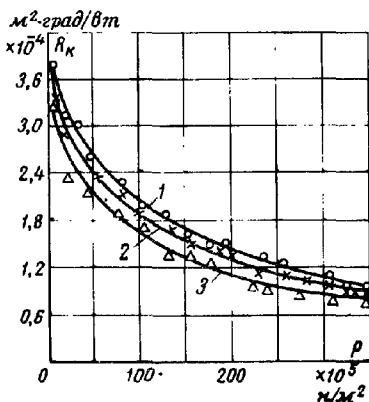


Рис. 1-11. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки для пары с неровностями контактных поверхностей порядка  $0,6$   $мм/м$  при различных термических условиях. Материал пары сталь 30ХГСА—30ХГСА; чистота обработки поверхностей  $\nabla 9$ — $\nabla 10$ .  
 1 — для  $T_k = 360^\circ$  К;  $q_{ср} = 2,95 \cdot 10^4$   $вт/м^2$ ;  
 2 — для  $T_k = 373^\circ$  К;  $q_{ср} = 4,18 \cdot 10^4$   $вт/м^2$ ;  
 3 — для  $T_k = 630^\circ$  К;  $q_{ср} = 14,5 \cdot 10^4$   $вт/м^2$ .

при обработке поверхностей в основном выше  $\nabla 7$ :

$$\frac{1}{R_{\text{ж}}} = \frac{1}{\frac{0,015 \sqrt{h_{\text{ср}}}}{\lambda_{\text{ж}}} \left( \frac{H_{\text{М}}}{\rho} - 1 \right) \left( 1 - \frac{\lambda_{\text{с}}}{\lambda_{\text{ж}}} \right)} +$$

$$+ \frac{1}{\eta_{\text{н}} \frac{h_{\text{ср}}}{\lambda_{\text{с}}} \left[ 1 - \left( \frac{\rho}{H_{\text{М}} b} \right)^{1/3} \right] + \frac{\delta_{\text{ср}}}{\lambda_{\text{с}}}} +$$

$$+ \frac{5,67 \epsilon_{1-2} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}, \quad (1-8)$$

где  $\delta_{\text{ср}}$  — средняя толщина межконтактного зазора при наличии неплоскопараллельности;

$T_1, T_2$  — температуры поверхностей соответственно первого и второго образцов;

$\eta_{\text{н}}$  — коэффициент, зависящий от качества поверхности и нагрузки (изменяется линейно от 1 до 2);

$\nu, b$  — параметры кривой опорной поверхности;

$\epsilon_{1-2}$  — приведенная степень черноты контактирующих поверхностей:

$$\epsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1},$$

где  $\epsilon_1, \epsilon_2$  — степени черноты контактирующих поверхностей соответственно первого и второго образцов (из таблиц).

Наличие в выражении (1-8) величины  $\delta_{\text{ср}}$  без каких-либо рекомендаций ее определения мало оправдано и поэтому теряет смысл. Вся зависимость требует более детальной проверки и указания точных границ ее применения.

Бурное развитие реактивной авиации и космической техники в свою очередь поставило ряд вопросов по исследованию контактного теплообмена в конструкциях летательных аппаратов. Так, в целях поддержания температуры внутри аппарата в заданных пределах необходимо наметить соответствующие пути отвода тепла от охлаждаемого устройства на оболочку аппарата и затем в окружающую среду. Все это требует достаточно полного анализа возможных путей отвода тепла, которые в той или иной мере определяются величиной термического сопротивления в зоне контакта соединителей. Исследованию указанных вопросов посвящена работа Фрида и Костелло [Л. 28]. Авторы этой работы считают термическое сопротивление контакта своего рода поверхностным эффектом, который определяется физико-механическими свойствами межконтактной среды. Их взгляды на вопросы формирования фактической площади контакта аналогичны взглядам предыдущих исследователей этой проблемы и опираются в целом на теорию, разработанную Хольмом [Л. 29].

Для определения термической проводимости контакта авторы работы [Л. 28] предлагают следующее выражение:

$$\frac{1}{R_{\text{ж}}} = \frac{\lambda_{\text{ж}}}{l_{\text{ж}}} \gamma + \frac{\lambda_{\text{с}}}{\delta} + \alpha_{\text{н}}. \quad (1-9)$$

где  $l_m$  — «длина пути» теплового потока в материале контактирующих тел;

$\eta$  — относительная фактическая площадь контакта;

$\alpha_{л}$  — тепловая проводимость в межконтактном зазоре лучеисаусканием.

Вследствие того что фактическая площадь касания в соединениях с малым контактным давлением и большими номинальными площадями соприкосновения деталей незначительна, решение проблемы сводится к задаче о зазоре конечных размеров между плоскостями. Решение задачи для определения термического сопротивления межконтактной среды в виде разреженного газа или глубокого вакуума может быть получено путем использования закономерностей кинетической теории газов.

В то же время выражение (1-9), рекомендуемое авторами работы [Л. 28] для выявления физики явления, в расчетах не используется, так как величины входящих в его состав членов  $\eta$ ,  $l_m$  и  $\delta$  неизвестны или их трудно вычислить. Все это заставляет авторов отдать предпочтение экспериментальному исследованию вопроса.

Задача экспериментальной программы сводилась к определению термического сопротивления контакта в вакууме для соединений с поверхностями, имеющими отклонения от плоскостности, при малых усилиях сжатия  $p = (0,2 \div 2,4) \cdot 10^3$  н/м<sup>2</sup>. Исследованиям подвергались образцы из магния и алюминия с поверхностями, характеристики которых приведены в табл. 1-1.

Таблица 1-1

**Характеристики поверхностей алюминиевых образцов**

| № образца | Высота неровностей, мм | Отклонение от плоскостности, мм | Вид обработки поверхности  |
|-----------|------------------------|---------------------------------|--|
| 1         | 0,15—0,20              | 114                             | Необработанные   |
| 2         | 1,22—1,65              | 43                              | Строгание  |
| 3         | 0,20—0,46              | 33                              | Фрезерование   |
| 4         | 0,15—0,20              | 114                             | Необработанные, в зоне контакта свинцовая фольга толщиной 0,2 мм |
| 5         | 0,15—0,20              | 114                             | То же, в зоне контакта алюминиевая фольга толщиной 0,05 мм       |

Для постановки опытов применялась установка, несколько отличная от предыдущих. Использовался метод «горячей пластины», при котором толщина образцов значительно меньше других размеров (127×127×3,18 мм). В каждый образец с тыльной стороны закладывалось по четыре термопары, отводы от которых укладывались в специально подготовленные канавки. Потери тепла боковыми поверхностями образцов сводились к минимуму за счет применения охранных нагревателей. Удельный тепловой поток через образцы определялся путем замера мощности основного нагревателя. Общее отклонение от плоскостности контактирующих поверхностей находилось как сумма максимальных расстояний от каждой из них до воображаемой плоскости, проходящей через место касания их. Чистота обработки контактных поверхностей замерялась в нескольких местах при помощи профилметра. Методика опреде-

ления термического сопротивления контакта была аналогична рассмотренным выше. В ряде опытов исследовалось влияние палиция в зоне контакта прокладок из свинца и алюминия, а также капли из тонкой меди на термическое сопротивление такого рода соединений. Результаты экспериментов позволили авторам работы [Л. 28] сделать ряд интересных практических выводов.

1. Наиболее существенное влияние на термическое сопротивление контакта при малых усилиях сжатия и значительных номинальных поверхностях оказывает неплоскостность соприкасающихся поверхностей (рис. 1-12).

2. Применение мягкометаллических прокладок (свинцовых) при малых усилиях сжатия значительно снижает термическое сопротивление контакта (кривая 4, рис. 1-12).

3. Отношение усилия сжатия образцов к пределу текучести более мягкого из соприкасающихся материалов является параметром, позволяющим производить выбор необходимых материалов для контактной пары. Следует, однако, отметить, что как по объему, так и по характеру работа [Л. 28] позволяет судить лишь об узком круге вопросов по теории контактного теплообмена.

Несколько в другом плане выглядит рассмотрение характера теплообмена в зоне контакта при соприкосновении поверхностей с отклонениями от плоскости в интерпретации Клаузинга и Чао [Л. 30]. Авторами этой работы предпринимается попытка проанализировать природу тепловой проводимости контакта в вакууме на

примере собственной модели. Авторы считают далекими от действительности предложенные ранее модели, в которых были сделаны допущения о равномерном расположении микроскопических контактных пятен по номинальной поверхности соприкосновения. В действительности же в реальных контактных соединениях вследствие неплоскостности сопрягаемых поверхностей возникают крупномасштабные области расположения контактных пятен в так называемых контурных областях контакта, которые оказывают существенное влияние на распределение линий теплового потока при подходе к концентрациям этих пятен.

В соответствии с предлагаемой моделью термическое сопротивление контакта в вакууме представляется в виде двух последовательно соединенных сопротивлений: сопротивления, вызванного крупномасштабными, макроскопическими концентрациями  $R_L$ , и сопротивления, вызванного мелкомасштабными, микроскопическими концентрациями  $R_S$  теплового потока, т. е.

$$R_K = R_L + R_S. \quad (1-10)$$

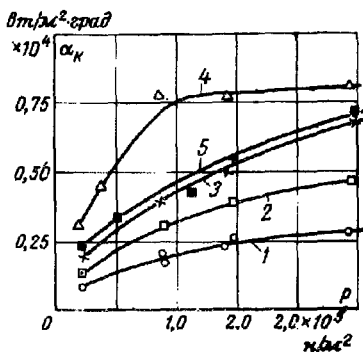


Рис. 1-12. Тепловая проводимость контакта пары из алюминия при малых усилиях сжатия. (Числовые значения на кривых соответствуют порядковому номеру образцов в табл. 1-1.)



Линии теплового потока вначале концентрируются у крупномасштабных областей контакта (контурных), после чего они стягиваются к микроскопическим пятнам касания.

Для аналитического определения теплового сопротивления, возникающего от стягивания линий теплового потока у крупномасштабных областей контакта, авторы работы [Л. 30] вводят следующие допущения:

- 1) длина двух цилиндрических образцов превышает их радиус;
- 2) контактирование по всей макроскопической области контакта идеально, т. е.  $R_S \ll R_L$ ;
- 3) тепловой поток через все внешние поверхности образцов равен нулю;
- 4) образцы изотропны и однородны и коэффициент теплопроводности каждого из них постоянен.

Взяв за основу указанные допущения и применив известное решение Роусса из работы [Л. 31], Клаузинг и Чао находят дополнительное термическое сопротивление за счет сужения проходного сечения теплового потока у макроскопических контактных зон в виде выражения

$$R_L = \frac{\varphi_1}{2a_1\lambda_m}, \quad (1-11)$$

где  $\varphi_1$  — коэффициент, учитывающий сужение проходного сечения для теплового потока у макроконтakta (изменяется в пределах от 1 до 0);

$a_1$  — радиус пятна макроконтakta.

Входящий в выражение (1-11) радиус пятна макроконтakta предлагается определять по известным зависимостям Герца [Л. 32].

По аналогии с выражением (1-11) величину термического сопротивления микроскопических пятен касания с радиусом  $a_2$  рекомендуется находить из уравнения

$$R_S = \frac{\varphi_2}{2a_2\lambda_m n_2}, \quad (1-12)$$

где  $\varphi_2$  — коэффициент, учитывающий сужение проходного сечения для теплового потока у микроконтakta;

$n_2$  — число микроскопических пятен контакта на контурной площадке.

При этом принимаются следующие допущения:

- 1) контактные пятна равномерно распределены по всей поверхности контакта (контурной площадке касания);
- 2) все контактные пятна имеют форму круга с одним и тем же радиусом;
- 3) выступы шероховатости под нагрузкой претерпевают пластическую деформацию;
- 4) тепловое сопротивление поверхностной пленки незначительно.

Известный практический интерес представляет предложенное в работе [Л. 30] выражение в виде отношения  $R_L/R_S$ :

$$R_L/R_S = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{p}{H_M} \cdot \frac{1}{\Phi(g)} \cdot \frac{b}{a_2 \zeta \varphi_1}, \quad (1-13)$$

где  $\zeta$  — коэффициент, учитывающий упругую деформацию выступов шероховатости, предложенный Хольмом [Л. 29] (0—1);

$b$  — радиус схематичного цилиндра (образца);

$g$  — коэффициент соответствия поверхностей при упругом контакте, равный отношению упругого перемещения к неплоскости;

$\Phi(g)$  — функция коэффициента  $g$ .

Коэффициент соответствия поверхностей  $g$  при упругом контакте обозначается в виде комплекса  $(p/E)(b/d_{\text{экв}})$ , где общая эквивалентная неплоскость  $d_{\text{экв}} = d_1 + d_2$  ( $d_1$  и  $d_2$  — отклонения от плоскости контактных поверхностей образцов).

Входящая в выражение (1-13) функция  $\Phi(g)$  представляется в виде

$$\Phi(g) = \frac{2 \cdot 1,285g^{1/3}}{\pi f(1,285g^{1/3})}.$$

Вследствие того, что при заданных свойствах материалов контактной пары, геометрии поверхностей и нагрузки величины  $p$ ,  $H_m$ ,  $\zeta$  и  $b$  известны, можно оценить произведение величин  $a_2 \zeta \Phi_1$  и отсюда определить отношение сопротивлений  $R_L/R_S$ . Приведенное авторами отношение  $R_L/R_S$  показало, что сопротивление макроконтакта на 2 порядка превышает сопротивление микроконтакта.

На основании этого авторы работы [Л. 30] ставят под сомнение пригодность для расчетной практики ранее опубликованных теорий.

Для проверки предлагаемой теоретической модели в работе приводятся результаты серии опытов, поставленных на установке, аналогичной установке на рис. 1-2, по стандартной методике. В опытах применялись образцы с отношением размеров  $l/b = 5,5$

Таблица 1-2

Характеристики образцов, применяемых в работе [л. 30]

| № образца | Материал образца           | Общая эквивалентная неплоскость, мкм | Температура в зоне контакта, °К | Примечание                               |
|-----------|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--|
| 1         | Латунь, сплав Анаконда 271 | 20,8                                 | 444                             | Поверхности смазаны силиконовой замазкой |
| 2         | То же                      | 19,8                                 | 402                             |  |
| 3         | " "                        | 24,1                                 | 344                             |  |
| 4         | " "                        | 20,8                                 | 444                             |  |
| 5         | Магний AZ 31B              | 2,0                                  | 375                             | Образцы заново полировались              |
| 6         | То же                      | 2,0                                  | 372                             |  |
| 7         | " "                        | 5,3                                  | 372                             |  |
| 8         | Нержавеющая сталь 303      | 1,0                                  | 391                             |  |
| 9         | То же                      | 3,8                                  | 391                             |  |
| 10        | Алюминий 2024T4            | 5,8                                  | 377                             |  |
| 11        | То же                      | 0,4                                  | 387                             |  |

из латуни, магния, нержавеющей стали и алюминия с контактными поверхностями, имеющими макроотклонения порядка  $0,03-1,9 \text{ мм/м}$ , с общей эквивалентной неплоскостью  $d_{\text{экр}} = 0,4-24,1 \text{ мкм}$  при температуре в зоне стыка в пределах  $344-444^\circ \text{ К}$  и давлении  $p = 80 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  (табл. 1-2).

Для определения осевых температурных градиентов в каждом образце было заделано по пять медь-константановых термопар. Экспериментальная установка позволяла создавать вакуум от  $1 \cdot 10^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$  Исследуемые поверхности образцов получались путем многократных полировок и притирок. Среднеквадратичная высота микронеровностей контактных поверхностей образцов составляла около  $0,1 \text{ мкм}$ .

Результаты работы [Л. 30] со всей очевидностью показывают, что макроконцентрации теплового потока во многих случаях имеют решающее значение. В то же время для многих поверхностей, встречающихся в широкой инженерной практике, контактное сопротивление микроскопических областей контакта имеет второстепенное значение.

Приведенное на рис. 1-13 сравнение теоретических и экспериментальных данных для латуни в относительных координатах  $b/R_L \lambda_m = f(g)$  указывает на их хорошую сходимость, что позволяет авторам рекомендовать для широкого пользования предложенные расчетные зависимости. Кроме того, результаты теоретических расчетов и экспериментальные данные указывают на определенную зависимость термического сопротивления контакта от величины общей эквивалентной неплоскости и коэффициента упругого соответствия

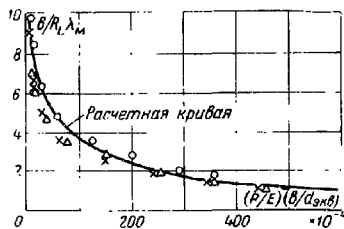


Рис. 1-13. Теоретические и экспериментальные данные для латуни (сплав Анаконда 271).

Опытные данные: X — для  $d_{\text{экр}} = -20,9 \text{ мкм}$ ;  $T_{\text{ж}} = 444^\circ \text{ К}$ ;  $\lambda_m = -119 \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$ ;  $\Delta$  — для  $d_{\text{экр}} = -19,8 \text{ мкм}$ ;  $T_{\text{ж}} = 402^\circ \text{ К}$ ;  $\lambda_m = -115 \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$ ; O — для  $d_{\text{экр}} = -24,1 \text{ мкм}$ ;  $T_{\text{ж}} = 344^\circ \text{ К}$ ;  $\lambda_m = -108 \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$ .

$g$  при малых значениях этого коэффициента. В работе [Л. 30] большое внимание было уделено выявлению влияния окисных пленок на поверхностях контакта на его термическое сопротивление. Установлено, что пленочное сопротивление может иметь большое значение для сильно окисленных поверхностей и играть второстепенную роль для свежеработанных поверхностей.

Несмотря на новизну постановки и решения задачи контактного теплообмена при наличии макроотклонений на соприкасающихся поверхностях, авторы работы [Л. 30] дают в целом лишь некоторые качественные характеристики этого процесса. Помимо этого, невозможно провести какое-либо сопоставление предлагаемой методики с результатами экспериментов других исследователей, так как зачастую нет возможности осуществить выбор общей эквивалентной неплоскости поверхностей, подобной данным работы [Л. 30].

В плане некоторых уточнений результатов работы [Л. 30] было проведено исследование Дженга [Л. 33]. На основе рассмотрива-

мой в данной работе схемы теплового контакта и результатов экспериментов термическое сопротивление в вакууме определяется из выражения вида

$$R_{\text{т}} = \frac{\varphi_2}{2a_2 \lambda_{\text{м}} n^k \eta}, \quad (1-14)$$

где  $k$  — геометрический коэффициент преобразования, показывающий, что член  $n^k$  разняется эффективному числу контактных пятен.

В отличие от авторов работы [Л. 30] автор [Л. 33] не считает  $k$  равным единице. С помощью электролитической ванны на упрощенной модели находится значение коэффициента  $k$ , равное в среднем 0,47.

Для моделирования геометрии контакта применялась полуцилиндрическая трубка из люсата, а в качестве электролита использовалась дистиллированная вода. Electroдами служили две травленные и покрытые графитом латунные пластины. Для моделирования поверхности контакта в центральном пазу электролитической ванны устанавливалась тонкая изоляционная пленка толщиной 0,05 мм. Точки контакта были смонтированы с помощью ряда отверстий, равномерно прорезанных в пласке. Сопротивления между двумя электродами с пленкой между ними и без нее определялись при помощи универсального моста сопротивления. В момент измерения через электроды пропускался переменный ток с частотой 1 кГц. Помимо введения выражения (1-14), в работе [Л. 33] ставится под сомнение утверждение авторов исследования [Л. 30] о наличии на контактных поверхностях лишь одной макроскопической области контакта. Путем подстановки в выражение (1-14) вместо  $a_2$  и  $\varphi_2$  соответственно  $a_1$  и  $\varphi_1$  можно вести расчет термического сопротивления  $R_{\text{т}}$  контактных пар с несколькими макроконтрактами.

Вопросам опытного и расчетного определений термического сопротивления контакта в вакууме между металлическими поверхностями с различной степенью шероховатости посвящено исследование Каганера и Жуковой [Л. 34]. Авторы предпринимают попытку получить расчетную формулу, учитывающую влияние качества фактической поверхности контакта. За основу принимается конусоидальная модель неровностей шероховатых поверхностей. Приняты следующие допущения: 1) высота микронеровностей в поперечном и продольном направлениях одинакова; 2) диаметр пятен касания одинаков. Путем элементарных рассуждений и применения основных положений из теории механического контакта поверхностей твердых тел [Л. 12] и теории контактного теплообмена [Л. 14] авторами работы [Л. 34] получены следующие выражения для расчета удельного термического сопротивления металлического контакта:

для поверхностей с чистотой обработки 5—8-го класса

$$R_{\text{т}} = 1,18 \sqrt{\frac{lL}{\lambda_{\text{м}}}} \left( \frac{a_{\text{н}}}{\rho} \right)^{2/3}; \quad (1-15)$$

для поверхностей с чистотой обработки выше 8-го класса

$$R_{\text{т}} = 0,46 \frac{\sqrt{lL}}{\lambda_{\text{м}}} \cdot \frac{1}{\eta^{2/3}}, \quad (1-16)$$

где  $L$  — продольный шаг микронеровностей;  $l$  — поперечный шаг их.

Выведенные формулы (1-15) и (1-16) справедливы по утверждению авторов для случая контакта между двумя поверхностями

с одинаковой шероховатостью и идентичных материалов. Они не учитывают влияния выпуклости, неплоскостности и изогнутости контактирующих поверхностей тел.

Предложенные расчеты зависимости выведены на основании ряда допущений, справедливость применения которых подвергалась проверке опытным путем на специально сконструированной установке (рис. 1-14). Конструкция установки позволяла проводить эксперименты в условиях глубокого вакуума ( $0,01-0,02 \text{ н/м}^2$ ) и низких температур ( $T_{\text{ж}}=145 \div 200^\circ \text{K}$ ). В качестве образцов применялись цилиндрические блоки диаметром  $14-20 \text{ мм}$ , выполненные для одной серии опытов из монолитного металла, а для другой —

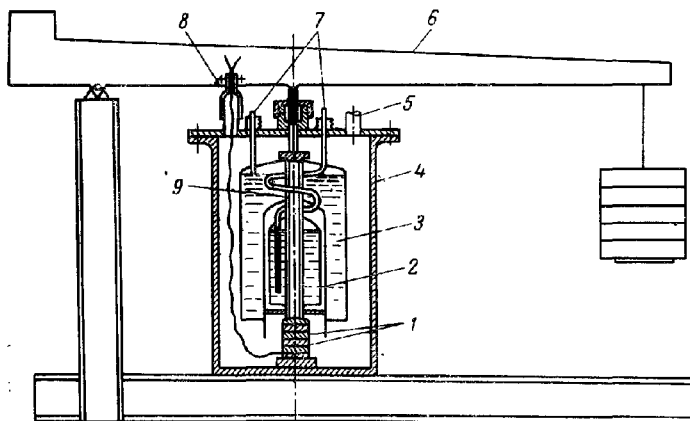


Рис. 1-14. Схема установки для определения термического сопротивления контакта.

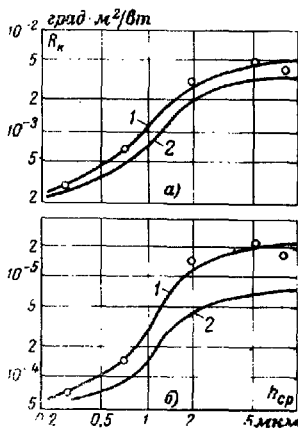
1 — исследуемые образцы; 2 — охранный кожух; 3 — охранный кожух с жидким кислородом; 4 — кожух; 5 — труба для откачки воздуха; 6 — рычаг с грузом; 7 — трубки для заливания жидкости; 8 — уплотнение для вывода термомпар; 9 — труба для передачи нагрузки.

из стопки тонких металлических пластин. Для образцов использовались алюминий, нержавеющая сталь 1Х18Н9Т, титан ВТ1-1, сталь 20 и сталь Х21Г7АН5. Чистота обработки контактирующих поверхностей лежала в пределах 5—11-го классов. Максимальная нагрузка на образцы составляла  $5000 \text{ н}$ . Опытная установка, являясь обычной установкой стержневого типа, имела в то же время ряд конструктивно новых элементов, позволявших вести исследования при низких температурах.

Контактное сопротивление стопки пластин или монолитной пары образцов 1 (рис. 1-14) измеряется по количеству испарившегося жидкого кислорода из внутреннего сосуда 2 и разности температур между нагретым и холодным концами образцов с помощью термопар. В качестве охранных боковых теплоизоляторов используется камера 3 с жидким кислородом. Рабочая камера устанавливается в герметичный кожух 4, который вакуумируется через трубу 5. Сжатие образцов производится с помощью рычага 6 с грузами.

Исследуемые образцы имели контактные поверхности с неплоскостностью порядка 0,04—0,06 мм. Термическое сопротивление контакта определялось путем вычитания сопротивления металла из общего измеренного сопротивления образца.

Опытное определение величины термического сопротивления в вакууме позволило авторам провести сравнительный анализ экспериментальных данных и данных расчетов по формулам (1-15) и (1-16) (рис. 1-15). Опытные значения  $R_m$  в основном лежат в непосредственной близости от значений, полученных по расчетным формулам (до 10%). В то же время для поверхностей с шероховатостью от  $\nabla 5$  до  $\nabla 8$  данные опытов в среднем в 2 раза выше расчетных. Такое расхождение авторы объясняют наличием неплоскостности для цельных образцов и изогнутости тонких пластин для составных образцов.



Результаты работы [Л. 34] в основном дополняют объем накопленного экспериментального материала по контактному теплообмену в вакууме. Что же касается предложенных авторами расчетных зависимостей (1-15) и (1-16), то их применение носит ограниченный характер, так как они не учитывают влияния волнистости макрорельефности, а также коробления контактных поверхностей, что особенно характерно для пакета металлических листов.

Несколько в другом плане ставится задача по определению контактного термического сопротивления в работе Згура и Тайца [Л. 35]. В данной работе рассматриваются кратковременные тепловые контакты, при которых наблюдается нестационарный теплообмен между соприкасающимися телами. Приняв соприкасающиеся тела полубесконечными и применив известное выражение Иванцова [Л. 36] для определения количества тепла  $Q$ , воспринятого менее нагретым телом контакта за время  $t$ , авторы после некоторых преобразований получили следующее выражение для определения условного коэффициента теплообмена:

$$\sigma_{\text{усл}} = \frac{Q}{S_{\text{к}} \tau (t_2 - t_1)} \quad (1-17)$$

Количество тепла, усвоенного менее нагретым телом, вступающим в контакт с более нагретым, определяется методом калориметрирования.

Для определения контактного термического сопротивления калориметрическим способом применялись образцы из стали

IX18H10T и Ст. 3 диаметром 40 и длиной 60 мм с поверхностями контакта, обработанными по 3-му классу точности. Постановка экспериментов осуществлялась путем нагрева одного образца в электрической трубчатой печи; другой образец («холодный») выдерживался при температуре воды в калориметрическом сосуде. Сжатие образцов производилось с помощью испытательной машины типа ИМЧ-30. После соприкосновения и сжатия образцов «холодный» образец помещали в калориметр, температура воды в котором замерялась метастатическим термометром с точностью до 0,001°K. С учетом инерционности машины сжатия продолжительность контакта доходила до 15—18 сек. Потери тепла через боковые поверхности калориметрируемого образца определялись расчетным путем и составляли 1—1,5% количества тепла, воспринятого образцом.

На рис. 1-16 приводятся зависимости  $R_{\text{ж}} = f(p)$  по данным результатов работы [Л. 35] и опубликованной ранее работы [Л. 23], поставленной для стационарного теплового режима. Сравнение кривых показывает аналогичный их характер и близкие значения контактных термических сопротивлений при одном и том же давлении.

В работе [Л. 35] одновременно исследовались вопросы влияния температуры стыка и жидкой смазки с графитом, известью и натровой селитрой на сопротивление в зоне контакта. Экспериментально установлено, что до давлений порядка  $1\,000 \cdot 10^6 \text{ н/м}^2$  повышение температуры способствует уменьшению термического сопротивления. В свою очередь введение жидкой прослойки в зону контакта повсеместно снижает термическое сопротивление (рис. 1-17).

Особый интерес к проблеме контактно-теплообмена проявился в связи с бурным развитием в последнем десятилетии реакторостроения. При эксплуатации гетерогенных ядерных реакторов с плотностью теплового потока в зоне охлаждаемых поверхностей тепловыделяющих элементов порядка  $(1,2 \div 1,7) \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2$  возникает необходимость интенсивного отвода тепла. В данном случае большую роль играет процесс теплообмена в зоне контакта топливные блоки — защитная оболочка тепловыделяющих элементов, на интенсивность которого значительное влияние оказывает термическое сопротивление контакта. В связи с этим данной проблеме посвящено значительное количество работ, выполненных обычно на достаточно высоком теоретическом и экспериментальном уровне.

В работе [Л. 14] приведен довольно тщательный анализ исследований Гусхотена [Л. 37], Скиппера и Уотена [Л. 38]. Результаты этих работ позволяют сделать ряд выводов практического характера, в целом специфичных для теплового контакта пары уран — алюминий или магниевый сплав.

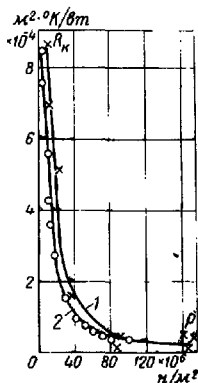


Рис. 1-16. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки.

1 — калориметрический метод; контактная пара из стали IX18H10T — IX18H10T; поверхность  $\nabla 3$  —  $\nabla 3$ ; 2 — стационарный метод по данным [Л. 23]; контактная пара IX13 — IX13; поверхность  $\nabla 3$  —  $\nabla 3$ .

1. При малых усилиях сжатия образцов (до  $1 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>) теплообмен осуществляется в основном через газовую прослойку. Увеличение силы сжатия до  $35 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> ведет к перераспределению теплового потока между фактическим контактом и газовой прослойкой.

2. Термическое сопротивление контакта уменьшается при повышении температуры в контактной зоне за счет роста площади фактического касания при понижении твердости магниевого сплава.

3. Наличие окисной пленки на контактных поверхностях ведет к повышению термического сопротивления контакта.

4. Термическое сопротивление контакта изменяется в зависимости от времени приложения нагрузки.

5. Наибольшего снижения термического сопротивления соединений уран—алюминий можно достичь путем введения в контактную зону жидкого натрия и повышения давления на контактные поверхности.

Результаты работ [Л. 37, 38] в целом дополняют накопленный к этому времени экспериментальный материал по контактному теплообмену.

Несколько отличной в методическом плане от приведенных выше исследований стоит работа [Л. 39], в которой опытным путем определяется термическое сопротивление контакта между цилиндрическими поверхностями для выявления оптимальных условий очехловывания топливных сердечников. Экспериментальная установка имитировала тепловыделяющий элемент и представляла

собой теплообменник типа «труба в трубе». Наружная поверхность внутренней трубки омывалась горячей, а изнутри холодной водой. Эта трубка исполнялась в двух вариантах: полностью из меди и двухслойной—из меди и алюминия. Термическое сопротивление контакта определялось как разность между полными сопротивлениями составной и цельной трубок. По результатам исследований авторы отдают предпочтение при очехловывании топливных сердечников холодной протяжке, когда по всей поверхности соприкосновения имеет место сплошной контакт, подтверждаемый ультразвуковой дефектоскопией.

В более широком плане опытного исследования теплообмена в зоне контакта пары уран—магнокс выгладит работа Сандерсона [Л. 40]. Постановка экспериментов осуществлялась на установке стержневого типа с образцами, имеющими шероховатость высотой порядка 0,12—0,25 мкм при неплоскостности в пределах 2,5—5 мкм. Контактующие поверхности за счет наличия неплоскостности по своей геометрии были достаточно близки к производственным.

На рис. 1-18 приведены результаты опытов в виде зависимости термического сопротивления контакта от относительной площади фактического контакта — отношения давления к твердости по Мейеру  $p/H_M$  в вакууме и различных газовых средах. Из анализа расположения кривых  $R_k = f(p/H_M)$  видно, что при незначительных ве-

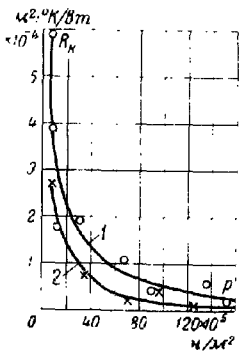


Рис. 1-17. Зависимость термического сопротивления контакта от давления для пары 1X18H10T—1X18H10T при отсутствии (1) и наличии (2) смазки в полости контакта.



личинах давления на контактные поверхности и малых температурах в зоне контакта более 80% тепла проходит через межконтактную газовую среду и, наоборот, при высоких давлениях и температурах более 90% тепла передается через места фактического контакта. Изменение давления межконтактной среды (гелий, аргон) приводит к тому, что при давлении газа менее 5 мм рт. ст. теплопроводность межконтактной среды практически сводится к нулю. Повышение давления газа вплоть до 500 мм рт. ст. ведет к интенсивному возрастанию эффективной теплопроводности межконтактной среды.

Сравнительно сложным теоретическим и экспериментальным исследованиям теплообмена через зону контакта соединений, встречающихся в реакторах, посвящена работа Рейпира, Джанса и Мак-Интоша [Л. 41]. Исследуя теоретически вопрос теплообмена через зону контакта, авторы этой работы останавливают свой выбор на схеме раздельного определения составляющих тепловой проводимости. Приняв исходное выражение для определения термического сопротивления фактического контакта из работы [Л. 6] и считая, что число контактных пятен на единицу площади равно  $n=1/2al$ , где  $l$  — шаг шероховатости, авторы пришли к следующему выражению для определения тепловой проводимости через пятно фактического контакта:

$$\alpha_m = \frac{\bar{\lambda}_m}{l} \sqrt{\frac{p}{H_M}} \quad (1-18)$$

Проводимость межконтактной среды в работе [Л. 41] находится с учетом факторов переменности толщины зазора и влияния аккомодационных эффектов. Аккомодационные эффекты учитывают увеличение локальной толщины межконтактного зазора на величину  $2l_T$ , где  $l_T$  — «длина температурного скачка» на поверхности, способ определения которой известен из молекулярно-кинетической теории газов. Приняв в качестве допущения положения об отсутствии фактического контакта поверхностей и постоянстве температур обеих поверхностей, а также считая, что местная проводимость среды обратно пропорциональна эффективной толщине зазора, авторы получили следующее выражение для определения эквивалентной толщины:

$$\delta_{\text{экв}} = \frac{S_H}{\int_{S_H} \frac{dS_H}{\delta_l + 2l_T}}, \quad (1-19)$$

где  $\delta_l$ ;  $2l_T$  — эффективная толщина зазора в данном месте.

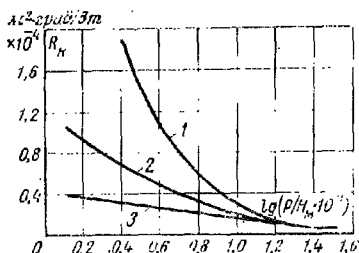


Рис. 1-18. Зависимость термического сопротивления контакта от относительной площади фактического контакта для пары уран-магнокс.

1 — в зоне контакта — вакуум порядка  $10^{-3}$  мм рт. ст.; 2, 3 — в зоне контакта аргон и гелий при атмосферном давлении.

При рассмотрении геометрии контактирующих поверхностей принимаются две модели выступов шероховатости. В первом случае выступы шероховатости моделируются в виде набора конусов с высотой  $2h_{ср}$  и основанием, имеющим диаметр, равный шагу шероховатости  $l_{ш}$ , во втором — перевернутыми параболоидами вращения с высотой  $2h_{ср}$  и диаметром основания  $ml_{ш.в}$ , где  $m \leq 1$ , а  $l_{ш.в}$  — шаг шероховатости.

Вводя относительные величины  $Y = 2h_{ср}/\delta_{эвк}$  и  $X = 2h_{ср}/2l_{т}$ , авторы получили для моделей выступов шероховатости в виде набора конусов и параболоидов вращения соответственно следующие выражения:

$$Y_k = 2 \left[ 1 - \frac{1}{X} \ln(1 + X) \right]; \quad (1-20)$$

$$Y_{п.в} = \frac{1 - m^2}{1 + \frac{1}{X}} + m^2 \ln(1 + X). \quad (1-21)$$

На рис. 1-19 в логарифмических координатах приведена зависимость (1-20) кривой 1, а также зависимость (1-21) кривой 2 при  $m^2=1$  и кривой 3 при  $m^2=0,4$ . Кривая 4 представляет собой зависимость, полученную экспериментальным путем:

$$Y = \frac{0,6}{1 + \frac{1}{2} X} + 0,4 \ln(1 + 2X). \quad (1-22)$$

Из уравнений (1-20) и (1-21) следует, что при  $X < 0,5 Y_k$   $Y_{п.в} \rightarrow X$  или  $\delta_{эвк} \rightarrow 2l_{т}$ . Зависимость между опытными данными

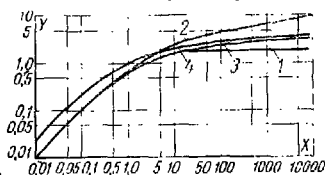


Рис. 1-19. Зависимость между относительными величинами  $X$  и  $Y$ .

1 — расчетная кривая зависимости (1-20) для конусообразного выступа неровности; 2, 3 — расчетные кривые зависимости (1-21) для выступа в виде параболоида вращения соответственно с  $m^2=1$  и  $m^2=0,4$ ; 4 — опытная кривая зависимости (1-22).

величин  $X$  и  $Y$  достаточно хорошо удовлетворяется уравнением для поверхностей с шероховатостью в виде параболоидов вращения при  $m^2=0,4$ .

Теоретические положения, изложенные выше, авторы [Л. 41] стремились дополнить результатами тщательно поставленных опытов на хорошо оборудованной установке дискового типа (рис. 1-20). Рабочая камера 1 установки представляла собой герметический сосуд, позволяющий создать глубокий вакуум. Исследуемый образец 2 с термопарами помещался между так называемыми рабочими стержнями

3 установки с заделанными в них термопарами. Тепловой поток создавался с помощью электронагревателя 4. Кроме основного, применялся компенсационный нагреватель 5, который посылал тепловой поток по полым цилиндрам 7, 8. Защитные цилиндры позволя-

ли свести до минимума тепловые потери образцов в радиальном направлении. Снаружи цилиндры покрывались слоем теплоизоляции 9. Нижний цилиндр 10 являлся корпусом холодильника, через который проходила вода. Образцы нагружались аксиально с помощью грузов, прикрепленных на конце рычага 6. Исследуемые образцы имели форму диска с диаметром 20 и толщиной 2 мм для нержавеющей

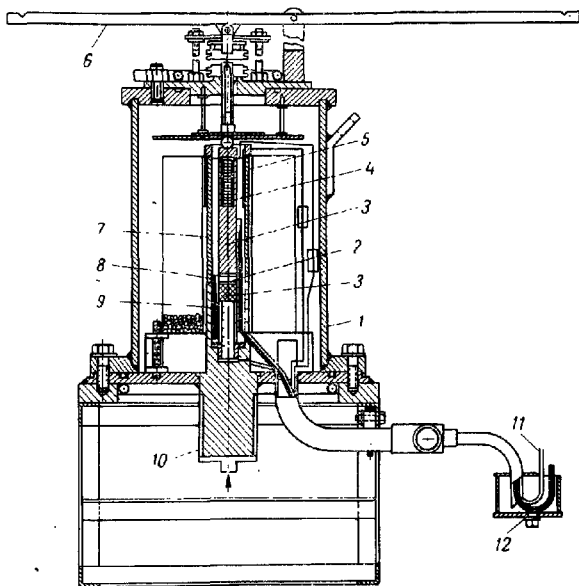


Рис. 1-20. Установка для экспериментального исследования теплообмена в зоне контакта.

1 — герметическая рабочая камера; 2 — исследуемый образец; 3 — рабочие стержни; 4 — основной нагреватель; 5 — компенсационный нагреватель; 6 — нагрузочное устройство; 7 — голые медные цилиндры; 8 — полый цилиндр из нержавеющей стали; 9 — теплоизоляционный экран; 10 — водяной холодильник; 11 — выводы проводов и термопар; 12 — сосуд с воском.

стали и 5 мм для двуокиси урана. Сопрягаемые поверхности образцов имели шероховатость, при которой отсутствовало изменение профиля от направления, что характерно для шлифованных поверхностей. На контактирующих поверхностях исключались различного рода макроотклонения и волнистость путем начальной притирки их до оптической плоскости, после чего наносилась шероховатость определенной геометрии. Поверхности имели высоту шероховатости в пределах 0,11—14,17 мкм. Температура в зоне контакта доводилась до 873° К; контактное давление варьировалось в диапазоне  $(0+40) \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>. Постановка опытов осуществлялась в среде гелия,

псона и аргона при давлениях от 7 до 1226 мм рт. ст., а также в вакууме порядка  $10^{-5}$  мм рт. ст.

Помимо подтверждения ряда положений, полученных предшествующими исследователями, результаты экспериментальной части работы [Л. 41] позволили сделать некоторые выводы практического характера. Так, даже при сравнительно высоких температурах в зоне контакта тепловая проводимость через межконтактную среду за счет лучистого теплообмена незначительна. Полученные опытные данные по проводимости фактического контакта более слабо зависят от нагрузки, чем расчетные из выражения (1-18), что объясняется авторами трудностью точного определения по профилограммам среднего шага шероховатости, а следовательно, и числа пятен фактического контакта. В то же время принятая авторами за исходную схема механического контакта, когда площадь фактического контакта изменяется при увеличении нагрузки за счет повышения размеров контактного пятна, вызывает возражения.

Следует отметить, что работа [Л. 41] представляет большой интерес как в практическом плане, так и в вопросе выбора путей дальнейших исследований контактного теплообмена на моделях, наиболее полно отвечающих факторам, обуславливающим явление теплообмена в зоне контакта.

В последнее время появился ряд экспериментально-теоретических работ, преследующих цель найти решение вопроса о влиянии направления теплового потока при подходе к границе раздела тел из разнородных металлов на термическое сопротивление такого рода контактов.

Барцелсем в работе [Л. 42] было отмечено несколько противоречивое явление зависимости термического сопротивления контактной пары сталь — алюминий от направления теплового потока, когда тепловая проводимость от алюминия к стали выше, чем от стали к алюминию. Каких-либо объяснений этого явления автором не дано.

Специальным исследованием отмеченного выше явления посвящена работа Роджерса [Л. 43]. В целях опытного исследования указанного эффекта была сконструирована установка (рис. 1-21), позволяющая

изменять направление теплового потока при неизменном механическом контакте пары. Исследуемые образцы 3 в форме ци-

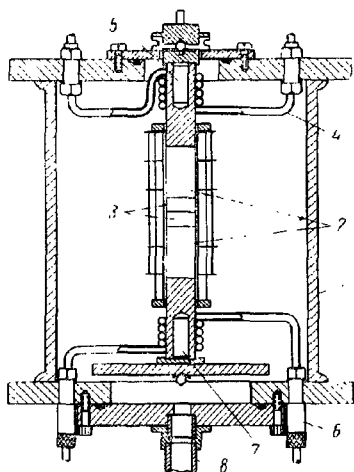


Рис. 1-21. Экспериментальная установка для исследования влияния направления теплового потока на термическое сопротивление контакта.

1 — герметическая рабочая камера; 2 — теплоизоляция; 3 — образцы; 4 — верхний охлаждающий змеевик; 5 — верхний нагреватель; 6 — нижний охлаждающий змеевик; 7 — нижний нагреватель; 8 — труба для отбора воздуха.

цилиндрических блоков помещались в герметическую камеру 1 между тепломерами 2. В верхней и нижней частях установки находилось по одному нагревателю и холодильнику. Такая конструкция установки позволяла, не изменяя положения образцов, в одном случае ориентировать тепловой поток сверху, когда включены нагреватель 5 и холодильник 6, а в другом — снизу, когда работают нагреватель 7 и холодильник 4. Исследованиям подвергался ряд контактных пар: алюминий — сталь, хромель — алюмель и сталь — медь. При тепловом контакте пары алюминий — сталь для температур в зоне контакта порядка 313—413° К и давлении на сопрягаемые поверхности  $8,5 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> разность величин проводимости тепла при изменениях направления теплового потока составляла около 100% для опытов в вакууме и 20% в воздушной среде (рис. 1-22). Указанный эффект исчезал при постановке опытов с парами хромель — алюмель и сталь — медь, а также при внесении в контактную зону пары алюминий — сталь прокладки из слюды. Автор данной работы отмечает, что этот эффект можно ассоциировать с механизмом проводимости в точках соприкосновения металлических поверхностей. При контакте металлов с различными значениями работы выхода создается потенциальный барьер, который ослабляет движение свободных электронов в одном направлении и усиливает его в другом.

Теоретическое подтверждение возможности эффекта влияния направления потока на границе раздела контактирующих тел из разнородных материалов на термическое сопротивление соединения приведено в работе [Л. 44]. Этот эффект рассматривается во взаимосвязи с электронной проводимостью металлических контактов, при которой термическое сопротивление стыка зависит от разности энергий электронов для разнородных металлов. Численные значения величины этого эффекта, полученные теоретически, подтверждают экспериментальные данные работы [Л. 43].

И, наконец, в работе Люиса и Перкинса [Л. 45] вопрос об этом эффекте разрешается с помощью учета зависимости влияния направления теплового потока от геометрических характеристик поверхностей границы раздела. Авторы принимают во внимание наличие на поверхностях, кроме шероховатости, различного рода неплоскостностей. Приводится ряд моделей для объяснения указанных выше явлений, достоверность которых подтверждается экспериментальными данными.

Анализ работ по вопросу о влиянии направления теплового потока на проводимость через зону контакта пары алюминий — сталь, как отмечалось выше, показывает противоречивость в толковании причин данного явления, и, очевидно, этот вопрос требует дальнейших всесторонних исследований.

Полные обширные экспериментальные материалы по теплообмену в зоне контакта твердых тел неоднократно приводило исследова-

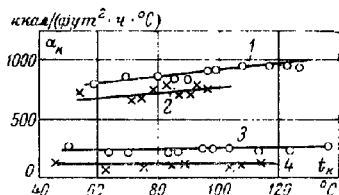


Рис. 1-22. Влияние направления теплового потока на тепловую проводимость контакта пары.

1 — алюминий — сталь; 2 — сталь — алюминий (в воздухе); 3 — алюминий — сталь; 4 — сталь — алюминий (в вакууме).

лователей к необходимости заниматься вопросом вывода обобщенных полуэмпирических зависимостей, позволяющих вести расчет в широком диапазоне геометрических характеристик контактных поверхностей, нагрузок, температур и физико-механических свойств контактирующих материалов. Так, в работе Элкока [Л. 46] впервые предпринимается попытка обработки опытных данных в безразмерной форме:

$$\frac{\alpha_n l}{\lambda_m} = f \left( \frac{p}{H B} \cdot \varphi \right), \quad (1-23)$$

где  $\varphi$  — безразмерный фактор формы микрорельефа поверхности;  $l$  — характерный размер, определяющий рельеф поверхности (принимается равным  $h_{cp}$ ).

Структура выражения (1-23) не позволяет считать его универсальным. Действительно, этим выражением не учитывается теплообмен через межконтактную среду, в результате чего оно применяется лишь при обработке опытных данных по контактному теплообмену в вакууме.

По-другому решает вопрос автор работы [Л. 47]. Им предлагаются безразмерные параметры двух комплексов: в виде  $\alpha_n p / \lambda_m \gamma$  — безразмерная тепловая проводимость ( $\gamma$  — удельный вес контактирующих материалов) и  $p / H B$  — безразмерное давление на контактные поверхности.

Результаты обработки опытных данных в координатах  $\alpha_n p / \lambda_m \gamma$  и  $p / H B$  показывают, что основным параметром, оказывающим влияние на тепловую проводимость контакта, следует считать шероховатость контактирующих поверхностей.

Более приемлемая зависимость для расчетов контактного теплообмена была предложена Швецом и Дыбаном [Л. 48]. Путем ряда преобразований известных зависимостей по контактному теплообмену авторы предложили критериальное уравнение

$$Nu_k = 1 + c (p / \sigma_n)^n, \quad (1-24)$$

где  $Nu_k = \alpha_k h_0 / \lambda_c$  — безразмерный комплекс, аналогичный по структуре критерию Нуссельта ( $h_0$  — высота выступов шероховатости при нулевой нагрузке).

По мнению авторов работы [Л. 48], выражение (1-24) целесообразно использовать при расчете теплообмена через контакт, находящийся в глубоком вакууме. Путем обработки данных по контактному теплообмену работ самих авторов [Л. 7, 8] и работ других исследователей [Л. 9—11, 18, 23] в соответствии с уравнением (1-24) получено следующее критериальное уравнение в безразмерных координатах (рис. 1-23):

$$Nu_k = 1 + 85 \left( \frac{p}{\sigma_n} \right)^{0,8}. \quad (1-25)$$

Как непосредственно следует из анализа рис. 1-23, уравнение (1-25), имеющее постоянные значения величин  $c$  и  $n$ , с погрешностью не более 15% описывает результаты большинства опытов различных исследователей. В то же время в ряде случаев, а именно при контакте смешанных пар (латунь — дюраль, сталь — дюраль), откло-

нения опытных данных от величин, получаемых по уравнению (1-25), доходят до 30%. Авторы работы [Л. 48] объясняют эти отклонения влиянием направления теплового потока на термическое сопротивление при контакте разнородных металлов, ссылаясь на результаты работы [Л. 43].

Следует отметить, что работа [Л. 48] построена на весьма упрощенных теоретических представлениях. Весь вопрос о теплообмене в зоне контакта по сути дела сводится к определению сопротивления двух параллельно включенных линейных проводников, т. е. авторами отбрасывается представление о сопротивлении фактического контакта, как сопротивления стягивания линий теплового потока. Не принимаются также во внимание и аккомодационные эффекты, влияние которых может существенно изменить сопротивление через зону контакта.

Наконец, необходимо остановиться на работах Шлыкова [Л. 49, 50], в которых приводится наиболее полный теоретический анализ моделей явления контактного теплообмена и предлагаются универсальные расчетные зависимости. В этих работах, как и в [Л. 14], термическая проводимость контакта  $\alpha_k$  с учетом ряда допущений представляется суммой двух проводимостей: межконтактной среды  $\alpha_c$  и мест фактического контакта  $\alpha_m$ . Ввиду сложности микрогеометрии контактирующих поверхностей принимается модель, согласно которой пятна фактического контакта принимаются за круги со средним радиусом  $a$  при их равномерном распределении по номинальной поверхности контакта. В этом случае термическая проводимость контакта определяется в виде

$$\alpha_k = \frac{\lambda_c}{\delta_{\text{ока}}} + \frac{2\bar{\lambda}_m \cdot \eta}{\pi a \cdot \varphi}, \quad (1-26)$$

где  $\varphi$  — коэффициент стягивания, учитывающий взаимное влияние проводимости пятен контакта и межконтактной сре-

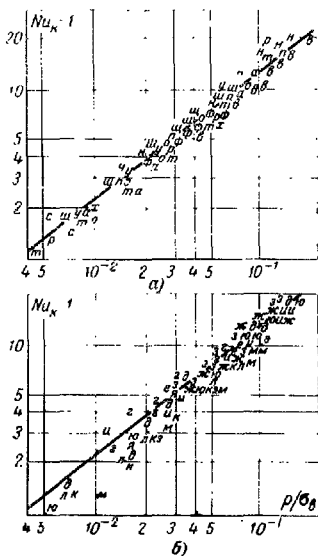


Рис. 1-23. Результаты обработки в безразмерных координатах опытных данных по теплообмену в зоне контакта образцов из стали (а) и цветных металлов (б).

Опытные данные [Л. 7, 8]: а — сталь 30,  $\sqrt{8}$ ; в — сталь ЭИ 211,  $\nabla 7$ ; г — латунь,  $\sqrt{8}$ ; д — дюраль — медь,  $\nabla 7$ ; е — дюраль — медь,  $\nabla 8$ ; ж — латунь — медь,  $\nabla 8$ ; з — дюраль,  $\nabla 8$ ; и — дюраль,  $\sqrt{8}$ , среда — углекислый газ; к — латунь — дюраль,  $\nabla 7$ ; л — латунь — дюраль,  $\nabla 8$ ; м — сталь 30,  $\sqrt{7}$  — дюраль,  $\sqrt{8}$ ; опытные данные [Л. 23, 24]: н — сталь 45,  $\nabla 3$ ; о — сталь 45,  $\nabla 4$ ; п — сталь 45,  $\nabla 8$ ; р — сталь 45,  $\sqrt{5}$ , углекислый газ; с — сталь 15,  $\sqrt{5}$ , водород; т — сталь 15,  $\nabla 5$ , вакуум; опытные данные [Л. 9—11]: у — сталь 45,  $\nabla 8$ ; ф — сталь 45,  $\nabla 7$ ; х — сталь 45,  $\nabla 6$ ; ц — сталь ЭЖ-1,  $\sqrt{4}$ ; ш — сталь ЭИ-60,  $\sqrt{8}$ ; щ — сталь ЭИТ,  $\sqrt{8}$ ; э — дюраль,  $\nabla 7$ ; опытные данные [Л. 18]: ю — дюраль,  $\nabla 5$ ; я — дюраль,  $\nabla 5$ . Кривые построены по уравнению (1-25).

ды и являющийся функцией относительной площади фактического контакта.

Для практического применения выражения (1-26) необходимо найти решения для величин  $a$ ,  $\delta_{\text{экив}}$  и  $\eta$ , связав их предварительно с чистой обработкой поверхностей, контактным давлением и характеристиками межконтактной среды.

Определение эквивалентной толщины прослойки среды  $\delta_{\text{экив}}$  сводится к условию равенства ее термического сопротивления термическому сопротивлению слоя переменной толщины. Кроме того, необходимо учитывать вакуумные явления, когда длина свободного пробега молекул газа в контактной зоне становится соизмеримой с толщиной зазора. Эквивалентная толщина прослойки межконтактной среды с учетом ее дискретности описывается выражением

$$\frac{1}{\delta_{\text{экив}}} = \frac{1}{S_{\text{н}}} \int_{S_{\text{н}}} \frac{dS_{\text{н}}}{\delta(S_{\text{н}}) + 2l_{\text{т}}}, \quad (1-27)$$

где  $l_{\text{т}}$  — «длина температурного скачка»; согласно данным работы [Л. 51] «длина температурного скачка» определяется следующим уравнением:

$$l_{\text{т}} = \frac{2-a}{a} \cdot \frac{2}{Pr} \cdot \frac{c_p/c_v}{c_p/c_v + 1} \Lambda, \quad (1-28)$$

где  $a$  — коэффициент аккомодации;

$\Lambda$  — длина свободного пробега молекул газа;

$c_p$  и  $c_v$  — изобарная и изохорная теплоемкости газа.

Значения величин, входящих в (1-28), для некоторых газов при температуре  $T=288^\circ\text{К}$  и давлении 760 мм рт. ст. приведены в табл. 1-3.

Таблица 1-3

Значения величин, входящих в уравнение (1-28), для некоторых газов

| Газ              | $c_p/c_v$ | $Pr$<br>(при 578°К) | $a$  | $2l_{\text{т}}/\Lambda$ | $\Lambda \cdot 10^{-3}$ ,<br>мм |
|------------------|-----------|---------------------|------|-------------------------|---------------------------------|
| Водород . . . .  | 1,41      | 0,71                | 0,26 | 22,1                    | 16,0                            |
| Гелий . . . . .  | 1,67      | 0,70                | 0,38 | 14,8                    | 28,5                            |
| Аргон . . . . .  | 1,67      | 0,67                | 0,85 | 5,1                     | 10,0                            |
| Воздух . . . . . | 1,40      | 0,71                | 0,83 | 4,6                     | 9,6                             |

После введения относительных величин  $X = \delta_{\text{макс}}/2l_{\text{т}}$  и  $Y = \delta_{\text{экив}}/\delta_{\text{макс}}$  уравнение (1-27) представится в виде

$$Y = \int_0^1 \frac{d\eta}{\varepsilon + 1/X}, \quad (1-29)$$

где  $\varepsilon = \delta(S_{\text{н}})/\delta_{\text{макс}}$  — относительная толщина зазора;

$\delta_{\text{макс}}$  — максимальная величина зазора между контактными поверхностями.



При  $X \rightarrow \infty$ , что соответствует случаю, когда дискретностью среды пренебрегают,  $Y=2$ . Отсюда  $\delta_{эпв} = \delta_{макс}$ , т. е. если форма выступов шероховатости коническая, то  $\delta_{эпв}$  равно половине высоты выступа.

Решение уравнения (1-29) возможно при наличии данных о зависимости между  $\epsilon$  и  $\eta$  для реальных поверхностей. Такая зависимость отражается в так называемой кривой опорной поверхности [Л. 12]. Применяя для выражения опорной кривой аппроксимирующую функцию, предложенную в работе [Л. 40], автор получает следующее выражение для относительной толщины межконтактной среды:

$$Y = \frac{10}{3} + \frac{10}{X} + \frac{4}{X^2} - 4 \left( \frac{1}{X^3} + \frac{3}{X^2} + \frac{2}{X} \right) \ln(1+X). \quad (1-30)$$

Это уравнение позволяет определить среднюю эффективную толщину зазора при различных видах обработки контактных поверхностей, межконтактной среды и условий в зоне контакта.

Определение тепловой проводимости контакта по выражению (1-26) сводится в основном к получению значения относительной фактической площади контакта. Операции по определению относительной площади фактического контакта теоретическим путем из-за сложности получения функциональной связи между площадью фактического касания, давлением, механическими свойствами материалов и геометрией поверхностей чрезвычайно трудоемки, поэтому автор считает целесообразным обобщить большой экспериментальный материал по контактному теплообмену.

Путем ввода ряда допущений выражение (1-26) преобразуется в уравнение вида

$$\alpha_k = \frac{\lambda_c}{\delta_{эпв}} + c \frac{\bar{\lambda}_m}{a} \left( \frac{p}{3\sigma_n} \right)^m \left( \frac{a}{h_{ср}} \right)^n, \quad (1-31)$$

которое затем перемножением обеих его частей на  $\delta_{эпв}/\lambda_c$  приводится к безразмерному виду

$$\frac{\alpha_k \delta_{эпв}}{\lambda_c} = 1 + \left( \frac{\bar{\lambda}_m \delta_{эпв}}{a \lambda_c} \right) c \left( \frac{p}{3\sigma_n} \right)^m \left( \frac{a}{h_{ср}} \right)^n. \quad (1-31a)$$

Комплексы  $\alpha_k \delta_{эпв}/\lambda_c$  и  $\bar{\lambda}_m \delta_{эпв}/a \lambda_c$  по мнению автора по своей структуре соответствуют критериям Нуссельта ( $Nu_k$ ) и Био ( $Bi_k$ ), после чего уравнение (1-31a) принимает вид

$$\frac{Nu_k - 1}{Bi_k} = c \left( \frac{p}{3\sigma_n} \right)^m \left( \frac{a}{h_{ср}} \right)^n. \quad (1-32)$$

Раскрывая левую часть выражения (1-32), автор получает следующее равенство:

$$\frac{Nu_k - 1}{Bi_k} = \frac{(\alpha_k - a_c) a}{\bar{\lambda}_m}. \quad (1-33)$$

Для контакта в условиях вакуума выражение (1-33) представляется в виде

$$\frac{Nu_k - 1}{Bi_k} = \frac{\alpha_m a}{\bar{\lambda}_m} = Nu_m. \quad (1-34)$$

где  $Nu_m$  — критерий Нуссельта для теплового контакта в вакууме, т. е. безразмерная проводимость фактического контакта.

Обработка опытных данных различных авторов, представленная на рис. 1-24 и 1-25, позволила Шлыкову [Л. 49] получить следующие зависимости для теплового контакта:

а) в вакууме

$$Nu_m = 0,32 \left( \frac{p}{3\sigma_a} K \right)^{0,86}; \quad (1-35)$$

б) в условиях газовой среды

$$\alpha_k = \frac{\lambda_c \gamma}{2(h_{cp1} + h_{cp2})} + 8 \cdot 10^3 \bar{\lambda}_m \left( \frac{p}{3\sigma_a} K \right)^{0,86}, \quad (1-36)$$

где коэффициент  $K = 1$  при  $h_{cp1} + h_{cp2} > 30$  мкм;

$$K = \left( \frac{30}{h_{cp1} + h_{cp2}} \right)^{1/3} \text{ при } 10 \text{ мкм} \leq h_{cp1} + h_{cp2} \leq 30 \text{ мкм};$$

$$K = \frac{15}{h_{cp1} + h_{cp2}} \text{ при } h_{cp1} + h_{cp2} < 10 \text{ мкм}.$$

Большинство опытных точек с погрешностью  $\pm 20\%$  обобщается зависимостями (1-35) и (1-36); при этом указывается, что уравнение (1-35) можно использовать и для оценки проводимости фактического контакта поверхностей с волнистостью или макротождлениями, если считать  $K=1$ .

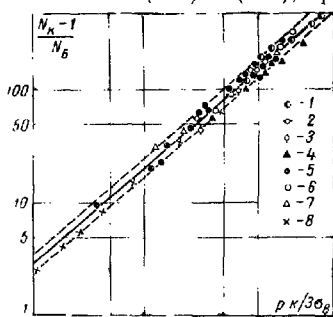


Рис. 1-24. Результаты обработки в безразмерных координатах опытных данных различных авторов по контактному теплообмену в воздушной среде.

1, 2, 3, 4—сталь 45 при  $h_{cp} = 2,63; 19,3; 6,01$  и  $5,01$  мкм [Л. 20—11]; 5, 6—сталь 30Х1СА при  $\sigma_{вн} = 9$  [Л. 26]; 7—Д16Г при  $\sigma_{вн} = 6$  [Л. 26]; 8—латунь при  $h_{cp} = 30$  мкм [Л. 92].

температуры в зоне контакта изменяют площадь фактического контакта, объем межконтактной среды, физико-механические характеристики материалов и физические свойства среды, что приводит к изменению термического сопротивления контакта.

В заключение автор работ [Л. 49, 50] отмечает универсальность предложенных расчетных зависимостей (1-35) и (1-36), что в свою очередь расширяет область их применения и позволяет достаточно точно оценить величину контактного термического сопротивления соединений.

Приведенный выше обзор экспериментальных и теоретических работ по теплообмену в зоне контакта разъемных соединений позволяет выделить следующие основные положения:

1. Изменения величины нагрузки на контактирующие тела, частоты обработки соприкасающихся поверхностей и

2. Анализ контактного теплообмена в большинстве теоретических работ проводится по упрощенной модели, для которой эквивалентная толщина зазора остается постоянной.

3. Рассмотрение схем теплового контакта в большинстве теоретических исследований чрезмерно идеализируется; при этом за основу принимается контактирование исключительно плоских поверхностей.

4. Обоснование физической сущности явлений механического контакта и передачи тепла через соединения двух твердых тел в ряде исследований проводится по-разному.

5. Из большого числа формул по контактному теплообмену, приведенных в рассмотренных работах, для приближенного расчета термического сопротивления или тепловой проводимости контакта могут быть рекомендованы для плоских поверхностей с чистотой обработки 4—9-го класса выражение (1-3), для поверхностей выше 7-го класса чистоты при наличии неплоскостности (1-8), для контакта в вакууме поверхностей с макроотклонениями (1-14), для всех поверхностей в вакууме (1-35) и в газозовых средах (1-36).

Для более точных расчетов может быть использована при контакте плоских поверхностей зависимость (1-6).

Состояние накопленного к настоящему времени экспериментально-теоретического материала по контактному теплообмену указывает на необходимость его дальнейшего увеличения и особенно постановки и разработки следующих практически важных и неисследованных вопросов:

1. Теплообмен через зону контактного соединения с поверхностями, вступающими в первоначальный контакт.
2. Теплообмен через контактные соединения с поверхностями, имеющими волнистость и макроотклонения.
3. Влияние времени выдержки поверхностей под нагрузкой на контактное термическое сопротивление.
4. Влияние окисных пленок на сопротивление в контактной зоне.
5. Формирование термического сопротивления контакта при нестационарном тепловом режиме.
6. Методы искусственного регулирования термического сопротивления в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений.

Перечисленные вопросы в целом составляют мало исследованную область теплообмена.

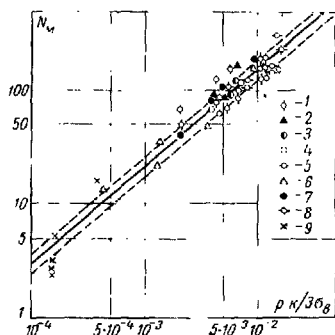


Рис. 1-25. Результаты обработки в безразмерных координатах опытных данных различных авторов по контактному теплообмену в вакууме.

1 — алюминий — уран при  $h_{ср} = 25$  мкм [Л. 93]; 2, 3, 4 — алюминий, алюминий — железо, алюминий — уран при  $h_{ср} = 10$  мкм [Л. 38]; 5 — уран — магнетит при  $h_{ср} = 11,7$  мкм [Л. 40]; 6 — UX1819T при  $h_{ср} = 11,7$  мкм [Л. 14]; 7 — ДТБТ при  $h_{ср} = 23,11$  мкм [Л. 14]; 8 — ниобий при  $h_{ср} = 10$  мкм [Л. 50]; 9 — нержавеющая сталь — двуокись урана [Л. 41].

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИХ ПРИ КОНТАКТИРОВАНИИ

### 2-1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Из анализа работ, приведенных в предыдущей главе, видно, что природа контактного теплообмена при соприкосновении поверхностей твердых тел обуславливается физико-механическими свойствами материалов и геометрическими характеристиками контактирующих поверхностей. В связи с этим определение тепловой проводимости или термического сопротивления контакта может быть успешно решено лишь на основе изучения закономерностей механического контактирования поверхностей твердых тел, чему и посвящена данная глава.

Поверхность твердого тела в общем случае представляет собой довольно сложную систему, структура и состояние которой зависят от физико-механических свойств исходного материала, обработки поверхности, внешних воздействий (приложения нагрузки, наличия трения, влияния окружающей среды и др.) и изменяются во времени в процессе этих воздействий.

На поверхности любого твердого тела всегда имеют место неровности, т. е. отклонения от идеально плоской поверхности. Как бы тщательно ни обрабатывались поверхности деталей машин, они никогда не являются идеально гладкими. Например, наиболее гладкие металлические поверхности по ГОСТ 2789-59 имеют неровности высотой 0,032- 0,05 мкм (14-й класс). Грубо обработанные металлические поверхности имеют выступы высотой 100-200 мкм; при этом выступы могут быть расположены на некоторой волнистой поверхности. Характер неровностей на поверхностях деталей машин обусловлен технологией их обработки. Кроме того, при воздействии нагрузки на поверхности, имеющие неоднородную структуру, могут иметь место неровности (шероховатость) из-за различного деформирования материала.

Крайняя граница поверхностного слоя твердого тела, соприкасаясь с газообразной, жидкой или твердой средой, имеет переходную пограничную зону. В случае если тело находится в атмосфере воздуха, на его поверхности адсорбируются молекулы воздуха и водяных паров, образуя довольно плотный слой, толщина которого имеет обычно порядок  $10^{-7}$ — $10^{-6}$  мм. Помимо этого, большинство металлов и сплавов окисляется в воздухе уже при комнатной температуре и на их поверхности образуется тонкая пленка окисла, толщина которой лежит в пределах 10—20 расстояний между молекулами, увеличиваясь при повышении температуры. И, наконец, на реальных поверхностях твердых тел, как правило, также удерживаются масляные включения с частицами пыли и абразива.

Отклонения плоской поверхности от идеальной делятся на: 1) геометрические; 2) зональные, или макронеровности; 3) малого элемента, или микронеровности; 4) субмикроскопические, или субмикронеровности.

Геометрические отклонения плоской поверхности твердого тела обусловлены геометрической формой и размерами тела, структурой и обработкой поверхности и пр.

В общем случае геометрическая форма детали имеет большое количество размеров, так как через любую ее точку можно провести множество сечений; поэтому понятие размер многозначно. Расчетный размер детали, полученный конструктором после изготовления ее, определяется измерением. Измеренный размер детали включает сумму погрешностей, возникающих в процессе из-

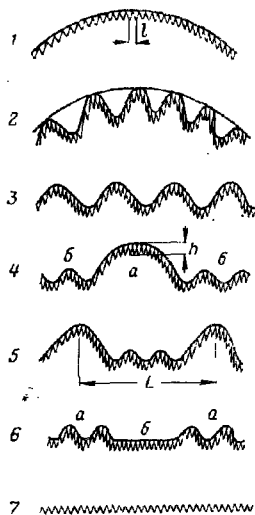


Рис. 2-1. Различные сочетания неровностей, встречающиеся на реальных поверхностях деталей машин [Л. 52].

1 — макронеровности и микронеровности; 2 — макронеровности, волнистость и микронеровности; 3 — волнистость и микронеровности; 4 — макронеровности (участок *a*), волнистость (участок *б*) и микронеровности; 5 — волнистость (с шагом *L*) и микронеровности; 6 — волнистость и микронеровности на участках *a* и только микронеровности на участке *б*; 7 — микронеровности (шероховатость).

мерения и за счет неточности измерительной аппаратуры. Кроме того, размер детали изменяется при работе машины вследствие упругости, остаточных деформаций, истирания и температурного воздействия.

Отклонения формы детали и ее размеров оцениваются текущим размером, т. е. размером, который меняется от точки к точке. Понятие о геометрии поверхности включает в себя очертания всей детали, заданные чертежом, и особенности имеющихся на ней неровностей.

В реальных условиях механического контакта особый интерес представляют макронеровность, микронеровность (шероховатость) и волнистость (рис. 2-1).

Собственно разделение понятий о микро- и макро-неровностях условно. В понятие макронеровность входят свойства, определяющие геометрическую форму детали, а микронеровность включает степень шероховатости или гладкости поверхности. Промежуточное положение между макронеровностями и микронеровностями занимает волнистость поверхности.

К микронеровностям типа шероховатость относятся такие неровности, которые не определяются ни чертежными размерами детали, ни допусками на эти размеры. Шероховатость поверхности характеризуется последовательным чередованием мельчайших выступов и впадин, расположенных на малом участке этой поверхности (0,1—0,25 мм). Высота микронеровностей ( $h$ ) лежит в пределах от тысячных и сотых долей микрона до 200 мкм; шаг  $l$  между микронеровностями в большинстве случаев равен от 5 до 500 мкм. Отношение  $h/l$  находится в пределах от  $1/1$  до  $1/50$ . Шероховатые поверхности считаются идеально плоскими, когда средняя высота неровностей ( $h_{ср}$ ) на большой площади поверхности лежит в одной плоскости. Идеально гладкие поверхности, наиболее далекие от реальных, не имеют шероховатости; все точки такой поверхности лежат в одной плоскости.

Волнистость поверхности представляет собой периодически повторяющиеся, близкие по размерам неровности. Расстояние между неровностями типа волнистость значительно меньше, чем у макронеровностей, и больше, чем у микронеровностей (шероховатости).

Исследование поверхностей с волнистостью и шероховатостью при различных видах механической обработки [Л. 52] позволило выделить зоны распространения этих

неровностей в зависимости от их шага и высоты. Из рис. 2-2 видно, что к микронеровностям (шероховатостям) относятся неровности с шагом вплоть до нескольких миллиметров. Такие шероховатости образуются на поверхностях деталей машин при точении с подачей

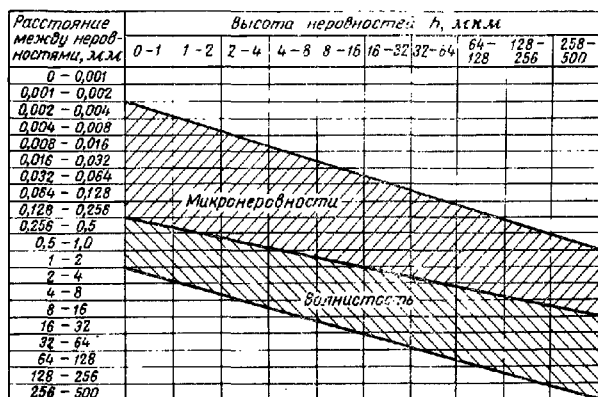


Рис. 2-2. Пределы распространения волнистости и шероховатости.

в несколько миллиметров и отделочном строгании широкими резцами.

Поверхности, подвергающиеся механической обработке, обычно имеют высоту неровностей по направлению подачи режущего инструмента, значительно превышающую величину неровностей поперек подачи. Лишь при шевинговании, доводке пастой и некоторых других видах обработки поперечная шероховатость превышает продольную.

Измерениям обычно подвергается поперечная шероховатость, по которой и классифицируют шероховатость поверхности. Так, по применяемому в настоящее время ГОСТ 2789-59 (см. приложение III, табл. III-1) измерение шероховатости поверхности предусматривается в направлении, которое даст наибольшие значения неровностей.

Геометрия поверхностей твердых тел характеризуется параметрами шероховатости, т. е. параметрами про-

филя поверхности, полученной сечением ее плоскостью, перпендикулярной геометрической поверхности.

Основными параметрами шероховатых поверхностей являются:

1) средняя высота неровностей  $h_{\text{ср}}$  — среднее расстояние между находящимися в пределах базовой длины пятью высшими точками выступов и пятью низшими точками впадин, измеренное от линии, параллельной средней линии;

2) наибольшая высота неровностей  $h_{\text{макс}}$  — расстояние между линией впадин и линией выступов;

3) коэффициент заполнения профиля  $m = h_{\text{ср}}/h_{\text{макс}}$  — отношение площади в плоскости профиля, занимаемой металлом, к площади, заключенной между линиями выступов и впадин;

4) несущая длина профиля  $b = b_1 + b_2 + \dots + b_n$  — сумма отрезков, отсекаемых линией параллельной средней линии профиля на участках профилограммы, заполненных материалом (рис. 2-3);

5) процент несущей длины профиля  $b/l \times 100\%$  — несущая длина профиля, выраженная в процентах по отношению

к базовой длине  $l_0$ ; изменение несущей поверхности может быть представлено кривой, которая изображает изменение несущей длины профиля по максимальной высоте неровностей и которая строится таким образом, что абсциссы точек этой кривой соответствуют подобным отрезкам несущей длины профиля (рис. 2-4);

6) шаг неровностей  $l$  — расстояние между вершинами характерных неровностей профиля (см. рис. 2-1).

Исследования, проведенные в работе [Л. 53], показали, что численное значение шероховатости зависит от величины базовой длины, на которой оно определено. С увеличением базовой длины величина  $h_{\text{ср}}$  повышается. Так, при измерении шероховатости поверхности 6—8-го класса чистоты на базовой длине 0,25 мм вместо 0,8 мм значение  $h_{\text{ср}}$  уменьшается на порядок.

Известное влияние на характер механического контакта оказывает расположение следов обработки поверхностей деталей, которые может быть различным в за-



висимости от кинематических схем механической обработки. В случае когда режущий инструмент совершает прямолинейное движение при статическом положении детали или деталь совершает прямолинейное движение при статическом положении инструмента, следы обработки имеют параллельное расположение. Такое расположение следов наблюдается при долблении, строгании и протягивании.

При условии когда деталь совершает вращательное движение, а инструмент — прямолинейное, следы обработки имеют вид винтовой линии. Такого рода траектория следов обработки наблюдается при точении, растачивании и шлифовании с продольной подачей.

При точении тангенциальными фасонными резцами следы обработки располагаются по окружности, а при отрезке, обточке фасонными резцами и подрезке торцов подрезными резцами — по спирали. Торцовое фрезерование, как правило, приводит к трохойдному расположению следов обработки.

Волнистость обычно имеет синусоидальный характер, причем волны бывают цилиндрической, эллиптической или сферической формы. Волна обычно превышает величину подачи режущего инструмента. Высота волны  $H_B$  может изменяться от 0,5 до 500 мкм, а шаг волны  $L_B$  — от 1 до 15 мм. Отношение  $H_B/L_B$  обычно лежит в пределах между  $1/50$  и  $1/1000$ .

Различие между волнистостью и шероховатостью часто выявляется на поверхности, обработанной, например, цилиндрической фрезой. При резании за оборот фрезы выступающий или заниженный зуб ее оставляет на поверхности наиболее заметные следы. Такие периодические неровности могут быть микронеровностями с большими шагами при подаче фрезы на оборот, а также образовывать волнистость. При врезании каждого из зубьев фрезы образуются микронеровности с более мелкими шагами.

В зависимости от режима обработки могут образовываться продольные и поперечные волны. Продольные волны располагаются параллельно, а поперечные —

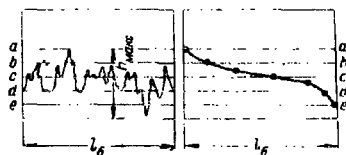


Рис. 2-4. Профилограмма и кривая несущей поверхности.

перпендикулярно направлению движения инструмента. Возникновение поперечной волнистости обуславливается вибрацией системы станок — деталь — инструмент, неравномерностью подачи инструмента, отклонением от прямолинейности направляющих. Продольная волнистость вызывается неравномерным изнашиванием шлифовального круга, овальностью и биением шпинделя станка. Волнистость различают регулярную, когда шаг волны и ее высота периодически повторяются, и нерегулярную, когда указанная периодичность нарушается.

Проктом ГОСТ по предложению Института машиноведения предусмотрены 9 классов волнистости в зависимости от высоты волн при максимальном шаге 10 мм. В случае когда шаг волны больше 10 мм, класс волнистости повышается на номер (см. приложение III, табл. III-2).

Максимальный шаг или длина волн неровностей определяется величиной подачи режущего инструмента при механической обработке. В ряде случаев волнистость может представлять собой следы предыдущих операций механической обработки деталей, не удаленных при окончательной обработке. Наиболее часто волнистость имеет место при отделочных операциях типа шлифования и доводки, так как шероховатость в этих случаях удаляется лишь на выпуклых частях поверхности и остается на вогнутых. Волнистость возникает также в ряде случаев при точении, растачивании, фрезеровании, строгании, протягивании и сверлении.

Когда известен источник возникновения волнистости, можно подсчитать длину волны. Так, например, длина волны, возникающей при колебании бабки шлифовального станка, определяется из выражения

$$L_{\text{в}} = \frac{v_{\text{дет}}}{n_{\text{к}}},$$

где  $v_{\text{дет}}$  — окружная скорость детали, м/сек;

$n_{\text{к}}$  — число оборотов круга в секунду.

При возникновении волнистости в результате вибраций шаг волны определяется в зависимости от частоты колебаний.

Для деталей машин и аппаратов взаимное расположение контактирующих поверхностей, их геометрическая форма и размеры устанавливаются чертежом и техническими условиями. Как правило, действительные разме-

ры отличаются от номинальных, что в свою очередь исключает возможность получения правильных геометрических форм деталей. Допуски на геометрическую точность формы детали обычно не регламентированы. В то же время предельно допустимые отклонения от правильной геометрической формы деталей предусмотрены рядом соответствующих технических условий ГОСТов. Обычно они выражены в процентах от допуска на изготовление детали по данному классу точности.

В настоящее время нет единой системы для всех видов отклонений геометрической формы, которая удовлетворяла бы всем требованиям, предъявляемым к соединениям деталей машин. Лишь для цилиндрических поверхностей опубликован проект стандарта на предельные отклонения формы [Л. 54] (см. приложение III, табл. III-3).

Проектом стандарта отклонения формы цилиндрических поверхностей представлены в двух видах: элементарные и комплексные. В состав элементарных отклонений в поперечном сечении входят овальность и огранка, а в продольном — конусность, корсетность, бочкообразность и изогнутость (рис. 2-5).

Овальность характеризуется отклонением, при котором контур поперечного сечения имеет форму овала. Величина отклонения определяется разностью наибольшего и наименьшего диаметров во взаимно перпендикулярных направлениях в одном сечении.

Огранка характеризуется отклонением, при котором контур поперечного сечения имеет форму многогранной фигуры. Величина огранки для вала определяется как разность между диаметром окружности, описанной вокруг контура поперечного сечения, и наименьшим диаметром того же сечения.

Конусность представляет собой непараллельность прямолинейных образующих цилиндра.

Корсетность имеет место при непрямолинейности образующих, когда диаметры уменьшаются от краев к середине сечения.

Бочкообразность характеризуется непрямолинейностью образующих, при которой диаметры увеличиваются от краев к середине сечения. Величины отклонений при конусности, корсетности и бочкообразности определяются разностью между наибольшим и наименьшим диаметрами одного и того же продольного сечения.

Изогнутость обусловлена непрямолинейностью образующих, когда ось поверхности также непрямолинейна. Величина отклонения при изогнутости определяется стрелой прогиба оси  $a$  (рис. 2-5, ж).

Комплексным отклонением формы считается совокупность всех отклонений формы поверхности поперечного (некруглость) или продольного (нецилиндричность) сечения (рис. 2-5, з, и, к).

Некруглость — комплекс всех отклонений формы в поперечном сечении цилиндрической поверхности. Ве-

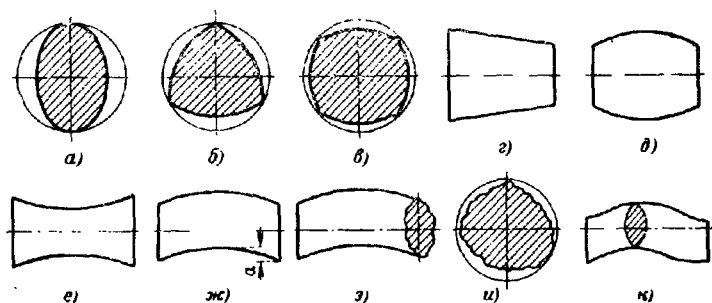


Рис. 2-5. Эскизы отклонений формы цилиндрических поверхностей.

$a$  — овальность;  $б, в$  — огранка;  $г$  — конусность;  $д$  — бочкообразность;  $е$  — корсетность;  $ж$  — изогнутость;  $з$  — нецилиндричность;  $и$  — некруглость;  $к$  — комплексное отклонение формы.

Величина отклонения для вала находится как разность между диаметром окружности, описанной вокруг контура поперечного сечения, и наименьшим диаметром в том же сечении.

Нецилиндричность описывается совокупностью всех отклонений формы цилиндрической поверхности. Величина отклонения для стержня определяется разностью между диаметром цилиндра, описанного вокруг поверхности и наименьшим диаметром той же поверхности.

Отклонением формы плоской поверхности считается несоответствие реальной плоской поверхности ее геометрической форме и оценивается непрямолинейностью и неплоскостностью (рис. 2-6).

Непрямолинейность представляет собой отклонения профиля реальной поверхности от прямой в продольном и поперечном направлениях (рис. 2-6, а). Величина не-

прямолинейности  $d$  определяется наибольшим расстоянием вершин микронеровностей профиля реальной поверхности от прилегающей прямой.

Неплоскостность — отклонение реальной плоской поверхности от геометрической плоскости в сечениях, перпендикулярных плоскости (рис. 2-6, б). Величина неплоскостности определяется наибольшим расстоянием вершин микронеровностей реальной поверхности от прилегающей плоскости.

Частными случаями отклонений от прямолинейности и плоскостности в продольном и поперечном направлениях являются выпуклость и изогнутость (рис. 2-6, в, г). Форма плоской поверхности считается выпуклой, если отклонение от плоскостности уменьшается от краев к середине, и изогнутой, если отклонение увеличивается от краев к середине.

По данным работы [Л. 55] допустимые отклонения формы плоских поверхностей восьми классов точности соответствуют классам чистоты обработки от 10-го до 3-го (см. приложение III, табл. III-4).

Приведенные выше качественные характеристики поверхностей, обработанных резанием, достаточно полно отражены в табл. 2-1, рекомендованной в работе [Л. 56].

При обработке поверхностей и их контактировании происходит пластическая деформация поверхностного слоя материала, распространяющаяся на некоторую зону, расположенную под обработанной поверхностью. Физическое состояние этого слоя материала характеризуется поверхностной твердостью деформированного слоя, величиной, знаком и характером распределения остаточных напряжений, а также микроструктурой этого слоя. Процессы пластической деформации, имеющие место при механической обработке поверхностей, раз-

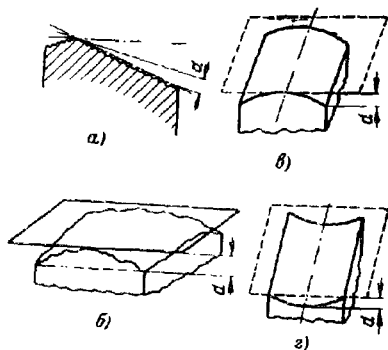


Рис. 2-6. Эскизы отклонений формы плоских поверхностей.

$a$  — непрямолинейность;  $б$  — неплоскостность;  $в$  — выпуклость;  $г$  — изогнутость.

Изогнутость обусловлена непрямолинейностью образующих, когда ось поверхности также непрямолинейна. Величина отклонения при изогнутости определяется стрелой прогиба оси  $a$  (рис. 2-5,  $ж$ ).

Комплексным отклонением формы считается совокупность всех отклонений формы поверхности поперечного (некруглость) или продольного (нецилиндричность) ее сечения (рис. 2-5,  $и, к$ ).

Некруглость — комплекс всех отклонений формы в поперечном сечении цилиндрической поверхности. Ве-

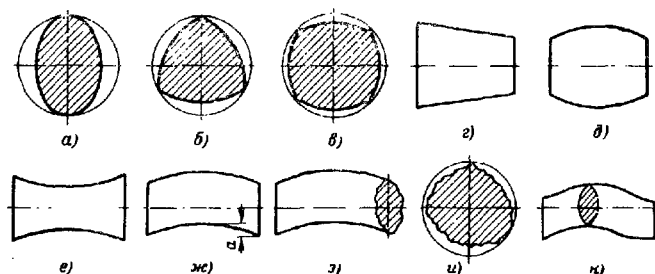


Рис. 2-5. Эскизы отклонений формы цилиндрических поверхностей.

$a$  — овальности;  $б, в$  — огранка;  $г$  — конусность;  $д$  — бочкообразность;  $е$  — корсетность;  $ж$  — изогнутость;  $з$  — нецилиндричность;  $и$  — некруглость;  $к$  — комплексное отклонение формы

личина отклонения для вала находится как разность между диаметром окружности, описанной вокруг контура поперечного сечения, и наименьшим диаметром в том же сечении.

Нецилиндричность описывается совокупностью всех отклонений формы цилиндрической поверхности. Величина отклонения для стержня определяется разностью между диаметром цилиндра, описанного вокруг поверхности и наименьшим диаметром той же поверхности.

Отклонением формы плоской поверхности считается несоответствие реальной плоской поверхности ее геометрической форме и оценивается непрямолинейностью и неплоскостью (рис. 2-6).

Непрямолинейность представляет собой отклонения профиля реальной поверхности от прямой в продольном и поперечном направлениях (рис. 2-6,  $а$ ). Величина не-

прямолинейности  $d$  определяется наибольшим расстоянием вершин микронеровностей профиля реальной поверхности от прилегающей прямой.

Неплоскостность — отклонение реальной плоской поверхности от геометрической плоскости в сечениях, перпендикулярных плоскости (рис. 2-6, б). Величина неплоскостности определяется наибольшим расстоянием вершин микронеровностей реальной поверхности от прилегающей плоскости.

Частными случаями отклонений от прямолинейности и плоскостности в продольном и поперечном направлениях являются выпуклость и изогнутость (рис. 2-6, в, г). Форма плоской поверхности считается выпуклой, если отклонение от плоскостности уменьшается от краев к середине, и изогнутой, если отклонение увеличивается от краев к середине.

По данным работы [Л. 55] допустимые отклонения формы плоских поверхностей восьми классов точности соответствуют классам чистоты обработки от 10-го до 3-го (см. приложение III, табл. III-4).

Приведенные выше качественные характеристики поверхностей, обработанных резанием, достаточно полно отражены в табл. 2-1, рекомендованной в работе [Л. 56].

При обработке поверхностей и их контактировании происходит пластическая деформация поверхностного слоя материала, распространяющаяся на некоторую зону, расположенную под обработанной поверхностью. Физическое состояние этого слоя материала характеризуется поверхностной твердостью деформированного слоя, величиной, знаком и характером распределения остаточных напряжений, а также микроструктурой этого слоя. Процессы пластической деформации, имеющие место при механической обработке поверхностей, раз-

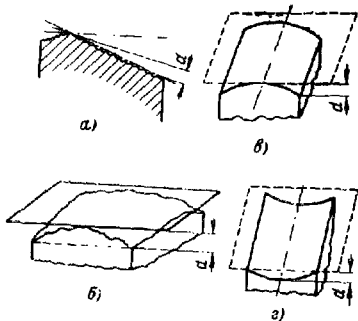


Рис. 2-6. Эскизы отклонений формы плоских поверхностей.

а — непрямолинейность; б — неплоскостность; в — выпуклость; г — изогнутость.

деляются на деформации с неполным и полным упрочнением. Процесс пластической деформации с неполным упрочнением сопровождается одновременно упрочнением и разупрочнением. Пластические деформации, протекающие при температурах ниже абсолютной температуры плавления на величину  $T_{пл}/T = 1,25 \div 1,3$ , наряду с наклепом сопровождаются разупрочнением, которое в определенной степени снимает наклеп. Процесс пла-

Таблица 2-1

**Основные характеристики качества поверхности [Л. 56]**

| Наименование показателя поверхности   | Источники появления отклонений формы поверхности от геометрически заданной и отклонений свойств поверхностного слоя металла от его исходного состояния  |
|---|---|
| <b>Геометрические показатели поверхности</b>                                |   |
| Макронееровность  | Деформация системы станок—приспособление—деталь—инструмент и погрешности элементов этой системы   |
| Волнистость   | Колебания элементов системы станок—приспособление—деталь—инструмент и погрешности отдельных деталей и механизмов станка   |
| Шероховатость   | Воздействие режущего инструмента на обрабатываемую поверхность, определяющего условия отделения срезаемого слоя   |
| Нерегулярное расположение микропоровностей на обрабатываемой поверхности    | Неоднородность свойств обрабатываемого материала, неодинаковый припуск на обработку поверхности, динамические явления при резании, суперпозиция, макроотклонения, шероховатость и волнистость, изменения формы режущей кромки и инструмента в процессе обработки  |
| Направление микропоровностей на обрабатываемой поверхности                  | Движение режущего инструмента и обрабатываемой детали. Следы обработки—траектория относительного движения режущего инструмента  |
| <b>Физико-механические показатели свойств поверхностного слоя</b>           |   |
| Интенсивность наклепа поверхности и толщина наклепанного слоя               | Уруго-пластические деформации при резании   |
| Структура поверхностного слоя<br>Остаточные напряжения в поверхностном слое | Фазовые и структурные превращения, обусловленные тепловыми явлениями при резании. Неоднородная пластическая деформация, неодинаковые во всем объеме тела или значительной его части внутренние превращения, уравновешиваемые в объеме тела, объемах, соизмеримых с размерами зерен, и объемах кристаллических ячеек зерна |



стической деформации с полным упрочнением протекает при сравнительно невысоких температурах и ведет к искажению кристаллической решетки, появлению текстуры и изменениям физико-механических свойств поверхностного слоя материала. Критерием качественной оценки пластической деформации, происходящей особенно часто при обработке металлов резанием, является наклеп поверхностного слоя. Твердость наклепанной поверхности для металлов повышается иногда до 2 раз, а глубина наклепанного слоя лежит в пределах от нескольких микрон до 1 мм и выше.

В зависимости от вида механического воздействия глубина упрочнения слоя бывает различной. По данным Дьяченко [Л. 57] глубина наклепа в миллиметрах достигает при точении 0,5—1,0, при трении 0,03—0,1, при протягивании 0,01—0,05 и при запрессовке 3,0—4,0.

Для оценки распределения микротвердости по глубине поверхности в зависимости от вида обработки были поставлены эксперименты на образцах из стали 45 для поверхностей 3-го, 5-го и 9а классов чистоты. Для определения толщины наклепанного слоя, образовавшегося при механической обработке, были изготовлены косые шлифы под углом  $2^\circ$  к поверхности. На графиках на рис. 2-7 приведены данные экспериментов, полученные методом косых срезов путем замера микротвердости  $H_d$  на приборе ПМТ-3 под нагрузкой 100 г. Анализ расположения кривых зависимости микротвердости от высоты микронеровностей  $H_d = f(h)$ , а также данные авторов [Л. 58] показывают, что микротвердость наклепанного слоя уменьшается при повышении чистоты обработки поверхностей. Для того чтобы иметь ясное представление о микротвердости исследуемой поверхности, целесообразно определять ее в каждом частном случае.

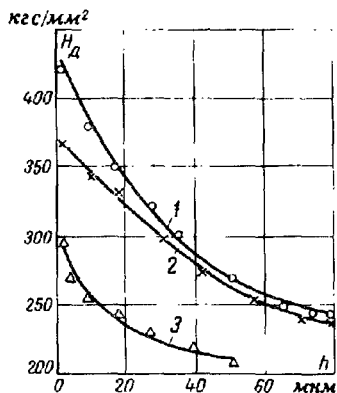


Рис. 2-7. Распределение микротвердости по глубине для стали 45 в зависимости от вида обработки.

1 - чистота обработки поверхностей  $\sqrt{8}$ ;  
2 - тоже  $\sqrt{5}$ ; 3 - тоже  $\sqrt{9a}$ .

Приведенные выше физико-механические и геометрические особенности поверхностного слоя твердого тела наиболее существенно могут оказать влияние на формирование фактической площади контакта при контактировании поверхностей.

## 2-2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ

Соприкосновение двух поверхностей твердых тел ввиду наличия на них шероховатостей всегда дискретно, т. е. происходит на отдельных малых площадках, кото-

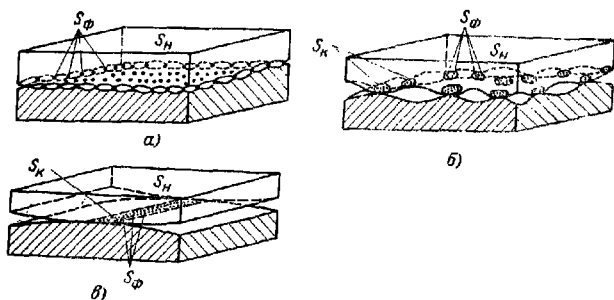


Рис. 2-8. Контактное взаимодействие поверхностей.

*а* — поверхности плоско-волнистые; *б* — волнистые; *в* — с макрорезонансами.

рые при наличии волнистости или макронеровностей концентрируются в определенных областях, носящих название контурных.

Дискретный характер соприкосновения имеет место при любом механическом контакте [Л. 59]. Различают три площади контакта (рис. 2-8):

1) номинальную площадь  $S_H$ , очерченную размерами соприкасающихся тел;

2) контурную площадь  $S_K$ , образовавшуюся при смятии отдельных волн и макронеровностей;

3) фактическую площадь  $S_\phi$ , образованную в результате смятия выступов шероховатости.

Для выражения площади контакта и сближения соприкасающихся поверхностей более удобным являются

безразмерные величины, а именно:

$$\eta_1 = \frac{S_{\Phi}}{S_{\kappa}}; \quad \eta_{12} = \frac{S_{\kappa}}{S_{\Pi}}; \quad \eta_3 = \frac{S_{\Phi}}{S_{\Pi}}; \quad \varepsilon = \frac{a}{h_{\max}},$$

где  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  — относительные площади контакта;  
 $a$  — сближение соприкасающихся поверхностей при приложении нагрузки.

При отсутствии макронеровностей и волнистости, когда  $S_{\Pi} = S_{\kappa}$ ,  $\eta_1 = \eta_2$  и  $\eta_3 = \eta_1 \eta_2$ .

При соприкосновении шероховатой поверхности с гладкой вначале в контакт вступают наиболее высокие выступы поверхности, а затем в результате дальнейшего сближения поверхностей — основная масса выступов микронеровностей. Возрастание нагрузки, воспринимаемой микронеровностями, ведет к упругой деформации волн, на которых они располагаются. Это приводит к увеличению числа микронеровностей, воспринимающих нагрузку, росту фактической площади контакта и сближению.

Наибольшую деформацию претерпевают самые высокие микронеровности. При контакте менее твердой шероховатой поверхности с более твердой гладкой наблюдается расплющивание выступов шероховатой поверхности. В случае, если гладкая поверхность менее тверда, чем шероховатая, выступы шероховатой поверхности внедряются в гладкую поверхность.

При контакте двух шероховатых поверхностей вначале взаимно соприкасаются те из выступов, сумма высот которых окажется наибольшей. Увеличение нагрузки ведет к вступлению в контакт новых пар противоположащих выступов с меньшей суммой высот. Площадки касания будут располагаться на разных высотах и под разными углами, что, однако, за счет малых углов наклона площадок (до 3—10°) не ведет к сколько-нибудь заметному увеличению самих площадок касания.

Площадь фактического контакта в основном не зависит от размеров соприкасающихся поверхностей; кроме того, на нее также мало влияют форма и величина шероховатости поверхности. Это приводит к тому, что даже при небольшой нагрузке местные давления на площадках фактического контакта достигают высоких значений и могут оказаться достаточными для пластического течения в области контакта даже у металлов со значительной твердостью.

Принципиально возможны четыре вида деформации выступов неровностей (табл. 2-2).

Таблица 2-2

**Разновидности деформаций контактирующих поверхностей**

| Вид деформации             | Условия, определяющие данный вид деформации  |
|----------------------------|--|
| Упругая                    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Поверхности высокой чистоты обработки (11—14-й классы)</li> <li>2. Поверхности материалов с высоким пределом упругости (<math>E &gt; 18 \cdot 10^{10}</math> н/м<sup>2</sup>)</li> <li>3. Высокоэластичные полимеры и резины</li> <li>4. Поверхности, испытывающие многократные приложения нагрузки</li> </ol> |
| Пластическая               | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Первоначальное контактирование грубо обработанных поверхностей (1—5-й классы) при небольших контурных нагрузках <math>p = (100 \div 200) \times 10^6</math> н/м</li> <li>2. Материалы с низким пределом текучести</li> </ol>   |
| Упруго-пластическая        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Поверхности средней чистоты обработки (5—9-й классы) при первоначальном нагружении</li> </ol>  |
| Пластическая с упрочнением | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сильно упрочняющиеся материалы</li> <li>2. Первоначальное нагружение металлических поверхностей при значительном контурном давлении (<math>q_k &gt; 200 \cdot 10^6</math> н/м<sup>2</sup>)</li> </ol>  |

Примечание. Эти положения справедливы при условии, если температура контакта  $T_k$  ниже температуры рекристаллизации  $T_p$  ( $T_p = (0,25 \div 0,3) T_{пл}$ , где  $T_{пл}$  — температура плавления металла или сплава).

Большинство исследователей теплообмена в зоне контакта [Л. 8, 14, 23, 26] вводит допущения о преобладающей роли пластической деформации неровностей в процессе сближения и формирования фактической площади контакта.

В принципе нельзя отрицать того, что при первоначальном сопряжении поверхностей (не выше 5-го класса чистоты обработки) выступы неровностей деформируются пластически. В то же время последующие взаимные перемещения поверхностей, вызываемые либо термическим расширением, либо циклическим приложением нагрузки, не превышающей первоначально приложенную, приведут к тому, что нагрузка будет восприниматься выступами неровностей упруго.

Фактическая площадь контакта, образованная при повторных нагружениях, превышает площади, сформировавшуюся при начальном приложении нагрузки для аналогичных усилий сжатия (рис. 2-9).

Сближение по данным [Л. 12] при повторном нагружении значительно меньше, чем при начальном приложении нагрузки, как это видно из табл. 2-3. Кроме того, при повторном нагружении различие в сближениях для различных материалов меньше, чем при первоначальном. Если первоначальное сближение определяется в основном исходной шероховатостью поверхности, пределом текучести или твердостью, то при повторных нагружениях сближение зависит от модуля упругости

и геометрии поверхности после первоначальной деформации. Экспериментальные данные табл. 2-3 показывают, что при первоначальном нагружении необходимо учитывать изменения величины сближения в зависимости от нагрузки. При повторных же нагружениях целесообразно пренебрегать величиной сближения.

Задача как теоретического, так и экспериментального определения фактической площади контакта была и остается достаточно трудоемкой и мало изученной. Наиболее широкое распространение получила упрощенная зависимость, предложенная Боуденом и Тейбором [Л. 13]:

$$S_{\phi} = \frac{N}{HB}, \quad \text{или} \quad \tau_{\phi} = \frac{P}{HB}. \quad (2-1)$$

Авторы считают ее универсальной для всех без исключения поверхностей. Однако следует отметить существенные недостатки формулы (2-1), так как она не учитывает зависимости площади контакта от высоты

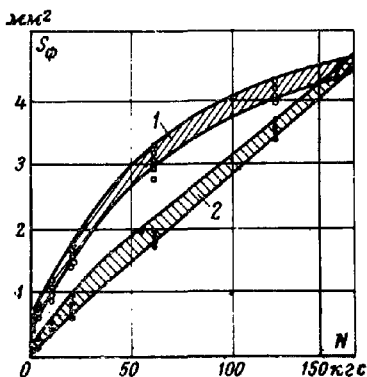


Рис. 2-9. Зависимость фактической площади контакта алюминиевого образца от нагрузки (точение, 4-й класс).

1 — область первоначального приложения нагрузки; 2 — область повторных приложений нагрузки.

неровностей, их формы и распределения по высоте. Деформация неровностей в каждом частном случае контактов для различных материалов принимается пластической. Утверждения же авторов относительно возмож-

Таблица 2-3  
Средние значения деформации выступов при первоначальном и повторном нагружениях [Л. 12]

| Материал образца<br>( $\nabla^4$ ) контактирует<br>с пилкой<br>Иогансона | Среднее значение сближения<br>при $q=0,5$ кгс/мм <sup>2</sup> |      |                             |     |
|--|---|------|-----------------------------|-----|
|  | при первом<br>нагружении                                      |      | при повторном<br>нагружении |     |
|  | мм  | %    | мм                          | %   |
| Сталь 10 . . . .   | 2,8   | 9,3  | 0,3                         | 1,3 |
| Медь . . . . .   | 3,6   | 9    | 0,38                        | 1,5 |
| Алюминий . . .   | 5,4   | 15,4 | 0,6                         | —   |
| Свинец . . . . .   | 20  | 57,1 | 0,1                         | —   |

ности применения зависимости (2-1) для поверхностей с волнистостью и макронеровностями не подтверждаются опытными данными.

Несколько иная зависимость была предложена Хольмом [Л. 29]:

$$S_{\Phi} = \frac{N}{\xi HVB} \quad (2-2)$$

Коэффициент  $\xi$  изменяется от 1 до 0,02, при этом большие значения относятся к случаю формирования пятен контакта в результате чисто пластической деформации, а меньшие — к полированным поверхностям, когда имеют место упругие деформации неровностей.

Однако выражение (2-2) далеко не полностью учитывает все особенности механического контакта, так как неопределенность величины  $\xi$  для каждого частного случая вполне очевидна.

Более универсальная зависимость для расчета фактической площади контакта при упругом взаимодействии выступов неровностей была предложена Крательским [Л. 60], когда поверхность представляется набором сфер с распределением по высоте, описываемым нор-

малым законом Гаусса:

$$S_{\Phi} = \frac{\pi r n}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_a^{\infty} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} (x-a) dx, \quad (2-3)$$

где  $x$  — исходная высота выступа неровностей;

$\bar{x}$  — наиболее вероятная высота выступа;

$\sigma$  — среднее квадратическое отклонение высоты неровностей;

$a$  — величина сближения соприкасающихся поверхностей;

$r$  — радиус сферы;

$n$  — число выступов.

Расчет по формуле (2-3) предусматривает применение метода численного интегрирования, что в какой-то мере сужает границы ее использования.

Несколько в другом плане построена работа Лоджа и Хоуэлла [Л. 61], в которой за основу принимается упруго-пластический характер контакта. Исследуемая поверхность моделируется набором одинаковых сферических выступов, и площадь единичного контакта рекомендуется определять по выражению

$$\Delta S_{\Phi} = k q^m, \quad (2-4)$$

где  $q$  — удельная нагрузка;

$k, m$  — константы.

Авторы работы [Л. 61] принимают при пластическом контакте  $m=1$  и при упругом  $2/3 < m < 1$ .

Модель Лоджа и Хоуэлла явно идеализирована, так как она предполагает постоянным число пятен контакта и высоту выступов при деформации. В то же время результаты дальнейших исследований проблемы механического контакта указывают на постоянное изменение указанных величин с изменением нагрузки.

В основе исследования, проведенного Ильченко [Л. 62], заложена модель выступов неровностей поверхности в виде пирамид со сферической вершиной. Деформация выступа описывается на первой стадии расчета формулой Герца для деформации сферы, а затем законом Гука для одноосного напряженного состояния, в результате предлагается полуэмпирическая формула для расчета фактической площади контакта двух шерохо-

ватых поверхностей

$$S_{\phi} = (12,54 + 3,08h_{\text{ср}}) \delta \left( \frac{1 - \mu^2}{10^4 E} \right) N^m, \quad (2-5)$$

где  $N$  — нагрузка;

$\delta$  — относительное удлинение материала, %;

$m$  — переменный показатель, зависящий от нагрузки и учитывающий распределение выступов поверхности по высоте.

В целом результаты работы [Л. 62] представляют определенный интерес, хотя и дают ряд противоречащих действительности положений. Так, в приведенной формуле (2-5) фактическая площадь контакта при повышении средней высоты неровностей  $h_{\text{ср}}$  увеличивается, в то время как имеется большое количество экспериментальных данных, указывающих на возрастание фактической площади контакта при повышении чистоты обработки поверхностей.

В работе Дьяченко, Толкачевой, Андреева и Карповой [Л. 58] рассматривается фактическая площадь контакта на основе конусоидальной модели выступов микронеровностей. При этом предполагается равновероятное распределение выступов по всем направлениям, параллельным поверхности тела, которое характерно для ненаправленных способов обработки (плоское шлифование торцом круга на станках с вращающимся столом, электрополировка, анодирование, доводка пастой, точное литье и др.).

Фактическая площадь контакта при конусоидальной модели выступов неровностей определяется из выражения

$$S_{\phi} = 0,2 \left( \frac{p}{H_{\text{д}}} \right)^{0,7} S_{\text{н}}^{0,3} \left[ \frac{E}{\pi H_{\text{д}} \text{tg} \gamma (1 - \mu^2)} \right]^{0,7(1-\alpha)}, \quad (2-6)$$

где  $\alpha = 1,99 h_{\text{ср}} m$  — параметр состояния поверхности;

$m$  — коэффициент заполнения профиля;

$H_{\text{д}}$  — твердость материала при вдавливании пирамиды;

$\gamma$  — угол при вершине выступа микронеровности.

По данным, полученным экспериментальным путем в Институте машиноведения АН СССР [Л. 58], видно, что величина угла при вершине выступа микронеровности зависит от чистоты обработки поверхности. Так, при высоте неровностей  $h_{\text{ср}} > 100$  мкм  $\gamma = 80^\circ$ ; при  $h_{\text{ср}} = 30$  мкм  $\gamma = 83^\circ$  и при  $h_{\text{ср}} = 0,8$  мкм  $\gamma = 87^\circ$ .



Предлагаемая авторами работы [Л. 58] зависимость (2-6) для определения фактической площади контакта в основном носит ограниченный характер, соответствуя контактированию поверхностей, обработанных ненаправленными способами.

Особое место в вопросе исследования площади контакта занимают работы Крагельского [Л. 60, 63], основывающиеся на предложенной им стержневой модели поверхности. Согласно этой модели поверхность представляется в виде набора стержней, независимо деформирующихся при приложении нагрузки. Исходя из такой модели поверхности, были исследованы площади фактического контакта при упругом и упруго-пластическом контакте.

Так, для упругого контакта гладкой твердой поверхности и шероховатой поверхности при равномерном распределении неровностей предлагается довольно простая формула в виде

$$S_{\Phi} = \sqrt{\frac{2N \operatorname{tg} \beta}{K}}, \quad (2-7)$$

где  $K$  — коэффициент жесткости;

$\operatorname{tg} \beta$  — коэффициент гладкости, характеризующий шероховатость поверхности.

Кроме того, в работе [Л. 64] рассматривается упругое контактирование двух шероховатых поверхностей с учетом вероятности встречи отдельных стержней различной длины. Путем достаточно сложных преобразований автор этой работы получает следующую формулу для определения фактической площади контакта двух шероховатых поверхностей, учитывающую зависимость от механических свойств контактирующих материалов и геометрических характеристик поверхностей:

$$S_{\Phi} = 1,65 \frac{S_K^{1/3} \gamma_1^{1/3} \gamma_2^{1/3} (E_1 + E_2)^{2/3} [2a(1 - \mu^2)]^{2/3}}{(E_1 E_2)^{2/3}} N^{2/3}, \quad (2-8)$$

где  $\gamma_1 = \varphi_1(x)$  и  $\gamma_2 = \varphi_2(y)$ ;

$x$  и  $y$  — расстояния от вершин стержней до средней линии до сближения;

$E_1, E_2$  — соответственно модули упругости материалов контактирующих поверхностей;

$a$  — радиус единичного пятна контакта.

Предлагаемые зависимости (2-7) и (2-8) дают при расчетах качественно правильные результаты и могут

быть применены при соблюдении условий, заложенных в основу моделей выступов неровностей.

Наиболее обширные экспериментально-теоретические исследования вопроса определения фактической площади касания и сближения поверхностей при деформации неровностей были проведены И. Б. Демкиным [Л. 12, 68].

Приняв за основу сферическую модель выступов неровностей, автор работ [Л. 12, 68] предлагает следующие выражения для определения относительной площади фактического контакта и относительного сближения при контактировании шероховатой и гладкой поверхностей (с учетом возможных отклонений от плоскости):

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= \left( \frac{\alpha^{\omega/\nu} \bar{\delta}^{\omega/\nu} r^{\omega} q_k}{h_{\max}^{\omega} K_1 B} \right)^{\frac{\nu}{\nu+\omega}}; \\ \epsilon &= \left( \frac{r^{\omega} q_k}{\alpha b K_1 B h_{\max}^{\omega}} \right)^{\frac{1}{\nu+\omega}}, \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

где  $q_k = N/S_k$  — контурное давление;

$\omega$  — коэффициент, зависящий от характера деформации;

$B$  — коэффициент, характеризующий свойства материалов;

$K_1$  — коэффициент, зависящий от  $\nu$  и  $\omega$ ;

$r$  — радиус вершин неровностей;

Таблица 2-4

Значения коэффициентов  $\omega$ ,  $B$  и  $\alpha$  в уравнениях (2-9) при различных видах деформации [Л. 68]

| Вид деформации             | $\omega$          | $B$                       | $\alpha$      |
|----------------------------|-------------------|---------------------------|---------------|
| Упругая                    | $\frac{1}{2}$     | $\frac{E}{2,35(1-\nu^2)}$ | $\frac{1}{2}$ |
| Пластическая               | 0                 | $c\sigma_S = HB$          | 1             |
| Пластическая с упрочнением | $\frac{n}{2} - 1$ | $2^{\omega} H_m$          | 1             |

Примечание. При некоторых промежуточных значениях коэффициентов  $\omega$  и  $B$  формулы табл. 2-4 будут соответствовать и упруго-пластическому контакту.

$b$  и  $\nu$  — параметры опорной кривой поверхности;  
 $\alpha$  — коэффициент отношения площадей при сближении.

Значения коэффициентов и параметров, входящих в выражения (2-9), приведены в табл. 2-4-2-7.

Таблица 2-5  
 Значения коэффициента  $K_1$  в уравнениях (2-9) при различных величинах  $\nu$  и  $\omega$  [Л. 12]

| $\omega$ | $\nu=1$ | $\nu=2$ | $\nu=3$ | $\nu=4$ | $\nu=5$ |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0        | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       |
| 0,3      | 1       | 0,86    | 0,73    | 0,71    | 0,7     |
| 0,4      | 1       | 0,83    | 0,7     | 0,66    | 0,61    |
| 0,5      | 1       | 0,8     | 0,67    | 0,62    | 0,58    |

Таблица 2-6  
 Значения параметров  $b$  и  $\nu$  в уравнениях (2-9) при различных видах обработки поверхностей [Л. 67]

| Вид обработки                              | $b$          |                | $\nu$        |                |
|--|--------------|----------------|--------------|----------------|
|  | для металлов | для неметаллов | для металлов | для неметаллов |
| Строганье, точение, фрезерование . . . . . | 1,6          | 3              | 2,8          | 2              |
| Шлифование . . . . .                       | 4            | 6              | 5,9          | 3              |
| Полірование . . . . .                      | 5            | 10             | 14           | 3,6            |

Таблица 2-7  
 Средние значения радиуса  $r$  кривизны вершин неровностей в уравнениях (2-9) при различных видах обработки поверхностей [Л. 67]

| Вид обработки        | Класс точности | Радиус кривизны, $\mu\text{м}$ |                    |
|----------------------|----------------|--------------------------------|--------------------|
|                      |                | $r_{\text{попер.}}$            | $r_{\text{прод.}}$ |
| Точение . . . . .    | 5-8            | 20-120                         | 10-25              |
| Шлифование . . . . . | 5-9            | 5-20                           | 250-15 000         |
| Доводка . . . . .    | 10-15          | 15-250                         | 7000-35 000        |

Параметры  $b$  и  $v$  определяются для одной из сопряженных поверхностей, если шероховатость другой значительно меньше. В случае контакта двух близких по чистоте поверхностей параметры находятся по формулам

$$b' = \frac{b_1 b_2 (h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2})^{v_1 + v_2} K_2}{h_{\text{макс}1}^{v_1} h_{\text{макс}2}^{v_2}}; \quad (2-10)$$

$$v = 0,9(v_1 + v_2),$$

где  $K_2$  — коэффициент, зависящий от  $v_1$  и  $v_2$ ; значения коэффициента  $K_2$  приведены в табл. 2-8.

Таблица 2-8  
Значения коэффициента  $K_2$  в уравнении (2-10) при различных параметрах  $v_1$  и  $v_2$  двух соприкасающихся поверхностей [Л. 12]

| $v_2$ | $v_1$ |      |      |
|-------|-------|------|------|
|       | 1     | 2    | 3    |
| 1     | 0,5   | 0,33 | 0,25 |
| 2     | 0,33  | 0,16 | 0,1  |
| 3     | 0,25  | 0,1  | 0,05 |

Значения параметров  $b$  и  $v$ , приведенные в табл. 2-6, являются усредненными и в ряде случаев могут существенно изменяться. Для более точных расчетов относительных величин площади фактического контакта и сближения необходимо в каждом конкретном случае определять параметры  $b$  и  $v$  путем обработки кривых опорной поверхности по поперечным и продольным профилограммам [Л. 65].

На рис. 2-10 приведен пример определения параметров  $b$  и  $v$  для шлифованной поверхности образца из сплава Д16. С поверхности образца на профилометре-профилографе снимаются продольная и поперечная профилограммы, по которым строятся кривые опорной поверхности в относительных координатах. Начальная часть кривой опорной поверхности выражается формулой [Л. 12].

$$\eta_1 = -be^v. \quad (2-11)$$

Прологарифмировав выражение (2-11), получим  $\lg \eta_1 = \lg b + v \lg e$ , т. е. уравнение прямой, в котором  $v \lg e$  — тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, а  $\lg b$  — отрезок, отсекаемый данной прямой на оси ординат.

Наибольшую трудность представляет расчет площади контакта при упрочнении материала, так как в этом случае необходимо располагать значением константы, характеризующей упрочнение  $\omega$  и максимальной твердостью

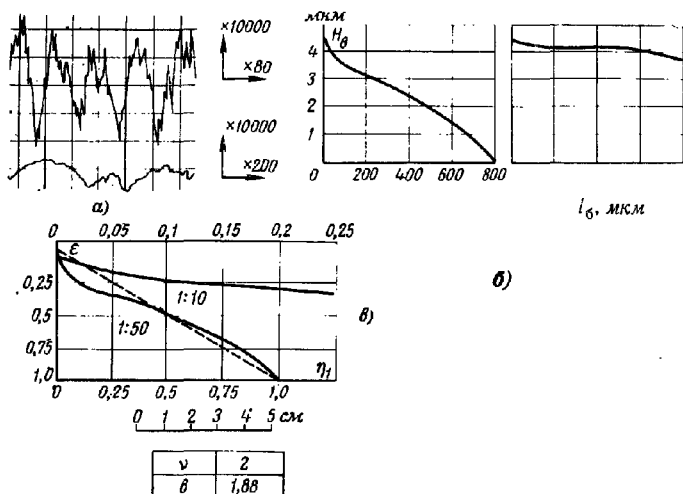


Рис. 2-10. Кривая опорной поверхности и определение ее параметров для шлифованной поверхности образца из сплава Д16 по данным профилограмм.

*a* — поперечная и продольная профилограммы шлифованной поверхности сплава; *б* — поперечная и продольная кривые опорных поверхностей; *в* — кривая опорной поверхности в относительных координатах.

по Мейсеру  $II_M$ . В первом приближении константу  $\omega$  можно связать с показателем степени  $n$  уравнения Мейера

$$p = ad^n \quad (2-12)$$

соотношением вида

$$\omega = \frac{n}{2} - 1, \quad (2-13)$$

где  $a$  — коэффициент;  
 $d$  — диаметр отпечатка.

**Значения показателя степени  $n$  в уравнении (2-12) для некоторых распространенных материалов [Л. 66]**

| Материал                 |      |
|--------------------------|------|
| Свинец . . . . .         | 2,35 |
| Дуралюмин . . . . .      | 2,24 |
| Латунь . . . . .         | 2,58 |
| Сталь (C=0,3%) . . . . . | 2,30 |
| Медь . . . . .           | 2,52 |

Реальные поверхности деталей, как правило, имеют волнистость, возникающую при колебаниях станка, изделия, режущего инструмента, засаливании шлифовального круга и т. п. Основными параметрами, определяющими волнистость, считаются высота и шаг волны.

Высота волны с точки зрения процента опорной поверхности и объема пустот профиля является определяющим параметром. На рис. 2-11,а приведены снятые с образцов профилограммы волнистых поверхностей с различными высотой волн  $H_B$  и длиной шага их  $L$ . На кривых опорной поверхности (рис. 2-11,б) показано сравнение волнистостей с профилями А и В, имеющими

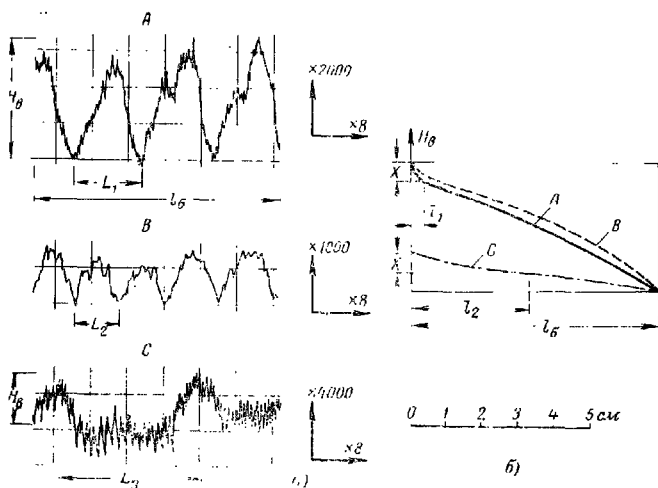


Рис. 2-11. Влияние формы волнистости на кривую опорной поверхности.

а - профилограммы волнистых поверхностей с профилями А, В, С; б - кривые опорной поверхности волнистостей с профилями А, В, С.

различные шаги  $L_1$  и  $L_2$  и почти одинаковую высоту волны  $H_B$ , и волнистостей с профилями А и С, имеющими различные высоты волн  $H_{B1}$  и  $H_{B2}$ . Сравнение кривых опорной поверхности показывает, что при меньшей высоте волны после удаления (деформирования) вершины волн на одинаковую величину ( $x$ ) опорная (несущая)

плоскость (фактический контакт) оказывается большей, чем при более высокой волне ( $l_1 > l_2$ ). В то же время при различии в размерах шага волны форма кривой опорной поверхности почти не изменяется.

При контактировании волнистых поверхностей образуются контурные площадки контакта, отстоящие одна от другой на расстоянии шага волны. Такие крупномасштабные (контурные) концентрации пятен фактического контакта могут иметь самый разнообразный характер и места расположения, поэтому при наличии ярко выраженной нерегулярной волнистости наиболее достоверными следует считать методы опытного определения контурных площадок контакта. В то же время по данным Рыжова [Л. 67] в большинстве случаев высоты отдельных волн различаются незначительно. Анализ профилограмм из сводного альбома авторов [Л. 52] и большого числа снятых волнограмм показывает, что отклонения по высоте не превышают 15—20% высоты максимальных волн.

При наличии регулярных сферических, эллипсоидных или цилиндрических волн контурная площадь контакта определяется по формулам Герца.

Принимая во внимание выдвинутое в работе [Л. 68] положение о том, что площадь контакта сферических волн принципиально не отличается от площади при контакте эллипсоидных волн, и считая, что  $1 - \mu^2 = 0,9$ , из формул Герца могут быть получены следующие выражения для случая контакта двух волнистых поверхностей:

$$S_{\text{к.сф-сф}} = 2,38 \left[ \frac{R_1 R_2 N n^{1/2}}{(R_1 + R_2) E} \right]^{2/3}; \quad (2-14)$$

при контакте плоскостно-шероховатой и волнистой поверхностей

$$S_{\text{к.сф-пл}} = 2,38 \left( \frac{R n^{1/2} N}{E} \right)^{2/3}, \quad (2-15)$$

где  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  — радиусы волн;  
 $n$  — число волн.

При расчетах можно ограничиться приближенными значениями числа волн, исходя из того, что при малых нагрузках  $n = 3$ , а при больших  $n = S_{\text{пл}}/L_1 L_2$ , где  $L_1$  — продольный, а  $L_2$  — поперечный шаг волны.

При аналогичных допущениях площадь контакта поверхностей с цилиндрическими волнами имеет вид

$$S_{K_{ц-пл}} = 1,52 \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{Nl}{E} \right)^{1/2}, \quad (2-16)$$

а площадь контакта поверхностей с цилиндрическими волнами и плоско-шероховатых поверхностей

$$S_{K_{ц-пл}} = 1,52 \left( \frac{RNl}{E} \right)^{1/2}, \quad (2-17)$$

где  $l = S_{ф}/L$ ;  $L$  — шаг цилиндрических волн.

Для контакта поверхностей с макроотклонениями типа неплоскостности схема контакта представлена на рис. 2-12. Основными параметрами неплоскостности считаются «эквивалентная неплоскостность»  $d_{экив} = d_1 + d_2$  и относительная эквивалентная неплоскостность  $d_{экив}/b$ , где  $b$  — радиус схематичного цилиндра.

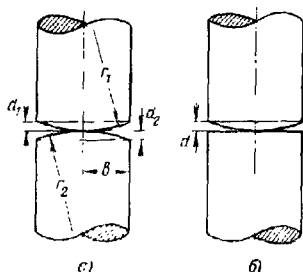


Рис. 2-12. Схемы контакта поверхностей с макроотклонениями типа неплоскостности.

а — контакт двух выпуклых поверхностей; б — контакт выпуклой и плоской поверхностей.

акта двух поверхностей с неплоскостностью на каждой в форме сферы следующую формулу:

$$S_{K_{сф-сф}} = 2,4 \left( \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \cdot \frac{N}{E} \right)^{2/3}; \quad (2-18)$$

при контакте плоско-шероховатой поверхности с поверхностью, имеющей неплоскостность сферической формы,

$$S_{K_{сф-пл}} = 2,4 \left( \frac{rN}{E} \right)^{2/3}. \quad (2-19)$$

Площадь контакта при соприкосновении двух поверхностей с отклонениями от плоскости типа выпуклость (в форме единичной цилиндрической волны) определяет-



ся из выражения

$$S_{K_{н-н}} = 1,52 \left( \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \cdot \frac{Nl}{E} \right)^{1/2}, \quad (2-20)$$

а площадь контакта плоско-шероховатой поверхности с поверхностью, имеющей отклонения от плоскости типа выпуклость,

$$S_{K_{н-пл}} = 1,52 \left( \frac{r_1 Nl}{E} \right)^{1/2}, \quad (2-21)$$

где  $r_1, r_2, r$  — радиусы поверхностей с неплоскостностью;  $l$  — длина цилиндра.

В случае когда для определения фактической площади контакта нет возможности применить указанные зависимости (2-14) — (2-21) (при нестандартных формах отклонений поверхностей от плоскости), целесообразно воспользоваться методом определения площади контакта с помощью люминесцентной краски. Люминесцентную краску разводят в растворителе и покрывают тонким слоем одну из контактирующих поверхностей. Высушенную поверхность контактируют с неокрашенной, в результате чего в местах контакта краска переносится на другую поверхность. Облучая последнюю ультрафиолетовыми лучами, получаем излучение световых лучей видимой части спектра, что позволяет фотографировать площадки фактического контакта. Площадки фактического контакта на фотографии представляются в виде белых пятен на черном фоне и могут быть измерены при помощи фотометрических устройств.

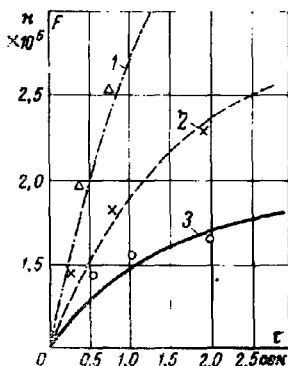


Рис. 2-13. Изменение силы трения покоя в зависимости от времени при различных нормальных нагрузках для пары плексиглас — сталь 45 (каленая).

1 — для  $N=10$  кгс; 2 — для  $N=5$  кгс; 3 — для  $N=3$  кгс.

Деформационные процессы в зоне контакта в условиях длительного приложения нагрузки не являются чисто пластическими, так как при пластическом характере процесса происходили бы бесконечно длительное увеличение площади контакта и бесконечный рост сближения,

чего в действительности нет. В то же время процессы деформации неровностей не являются чисто упругими, так как с увеличением времени  $\tau$  действия нагрузки наблюдается увеличение площади контакта или силы трения покоя (рис. 2-13) [Л. 69].

Наиболее точно описывает процесс изменения сближения поверхностей в зависимости от времени  $\tau$  действия нагрузки уравнение Ишлинского, которое решено Крагельским [Л. 69]:

$$\varepsilon_{\tau} = \left[ \varepsilon_{\infty}^{\nu+1} - (\varepsilon_{\infty}^{\nu+1} - \varepsilon_0^{\nu+1}) e^{-\tau \frac{u_2(\nu+1)}{u_1 + \nu}} \right]^{\frac{1}{\nu+1}}, \quad (2-22)$$

где  $\varepsilon_{\tau}$  — относительное сближение, определяемое временем действия нормальной нагрузки;

$\varepsilon_{\infty}$  — сближение, устанавливающееся по окончании этапа взаимодействия;

$\varepsilon_0$  — сближение при нулевом времени контакта (практически упругая часть сближения);

$u_1$  — скорость последования;

$u_2$  — скорость релаксации;

$\nu$  — параметр опорной кривой поверхности (см. табл. 2-6).

Учитывая, что относительная площадь фактического контакта может быть выражена в соответствии с (2-11) через относительное сближение, т. е.

$$\eta_{\tau} = b \varepsilon_{\tau}^{\nu}, \quad (2-22a)$$

при подстановке в это выражение (2-22) находится зависимость относительной площади контакта во времени:

$$\eta_{\tau} = b \left[ \varepsilon_{\infty}^{\nu+1} - (\varepsilon_{\infty}^{\nu+1} - \varepsilon_0^{\nu+1}) e^{-\tau \frac{u_2(\nu+1)}{u_1 + \nu}} \right]^{\frac{\nu}{\nu+1}}, \quad (2-23)$$

где  $b$  — параметр опорной кривой поверхности (табл. 2-6).

Величина конечного сближения  $\varepsilon_{\infty}$  определяется по зависимости, предложенной в работе [Л. 68] для расчета трещинообразований:

$$\varepsilon_{\infty} = \left[ \frac{N(\nu + \omega)}{S_{\parallel} b H_M} \right]^{\frac{1}{\nu + \omega}}, \quad (2-24)$$

где  $\omega$  — коэффициент, зависящий от характера деформации (см. табл. 2-4).

Зависимости (2-22) и (2-23) позволяют судить о влиянии времени  $\tau$  действия нагрузки и отдельных физико-механических и геометрических параметров на формирование фактической площади контакта и сближения.

Анализ формул (2-22) и (2-23) показывает, что зависимость фактической площади контакта и сближения от времени действия нагрузки определяется четырьмя параметрами: скоростью последствия  $u_1$ , скоростью релаксации  $u_2$  и геометрическими параметрами  $b$  и  $\nu$ . В первый момент приложения нагрузки площадь контакта и сближение растут достаточно интенсивно, затем рост их снижается и стремится к постоянному значению.

Предложенные зависимости (2-22) и (2-23) не во всех случаях могут быть применены в расчетной практике, так как входящие в них параметры определены экспериментально для частных случаев контакта.

Имеется ряд других формул, описывающих связь между напряжением и деформацией выступов неровностей поверхностей во времени. Зависимость сближения поверхностей контакта от времени  $\tau$  действия нагрузки представляется сравнительно несложной эмпирической формулой из работы [Л. 70], выведенной на основании зависимостей Люнца [Л. 71] и Ровинского [Л. 72]:

$$\epsilon_{\tau} = \epsilon_{\infty} (1 - e^{-\delta \tau^{\rho}}), \quad (2-25)$$

где  $\delta$  и  $\rho$  — константы материала, характеризующие его способность к пластической деформации.

Относительное сближение в зависимости от времени приложения нагрузки после подстановки выражения (2-24) в (2-25) имеет вид

$$\epsilon_{\tau} = \left[ \frac{p(\nu + \omega)}{bH_M} \right]^{\frac{1}{\nu + \omega}} (1 - e^{-\delta \tau^{\rho}}). \quad (2-26)$$

Относительная площадь фактического контакта в зависимости от времени действия нагрузки определяется по формуле (2-22, а), где  $\eta_{\tau}$  выражается в соответствии с (2-11) через относительное сближение  $\epsilon_{\tau}$ , вместо которого затем подставляется (2-26), и формула окончательно принимает вид

$$\eta_{\tau} = b \left[ \frac{p(\nu + \omega)}{bH_M} \right]^{\frac{\nu}{\nu + \omega}} (1 - e^{-\delta \tau^{\rho}})^{\nu}. \quad (2-27)$$

Использование формул (2-26) и (2-27) затрудняется отсутствием значений констант  $\rho$  и  $\delta$  для широкого диапазона используемых в практике материалов.

В табл. 2-9 приведены результаты опытного определения констант  $\rho$  и  $\delta$  при различных температурах в зоне контактов из материалов: ФК-16Л (ретинакс), сплава Д16Т и меди М2.

Таблица 2-9

Значения констант  $\delta$  и  $\rho$  в уравнениях (2-26), (2-27)  
для некоторых материалов при различных  
температурах (по данным автора)

| Материал | $\rho$              |       |       | $\delta$           |      |      |
|----------|---------------------|-------|-------|--------------------|------|------|
|          | при температуре, °К |       |       | при температуре °К |      |      |
|          | 293                 | 373   | 473   | 293                | 373  | 473  |
| ФК-16Л   | 0,212               | 0,24  | 0,27  | 3,1                | 2,32 | 1,78 |
| Д16Т     | 0,46                | 0,478 | 0,49  | 2,12               | 2,01 | 1,87 |
| М2       | 0,32                | 0,36  | 0,384 | 2,5                | 2,36 | 2,14 |

Опытное определение реологических констант, приведенных в табл. 2-9, осуществлялось на прессе Бринелля с нагревательным устройством стальным индентором сферической формы, хорошо моделирующим конфигурацию неровностей поверхности. Индентор погружался под нагрузкой в исследуемый материал и выдерживался в течение всего процесса. Глубина погружения индентора замеряется микрометром. По кривым погружения по методике, описанной в работе [Л. 72], определяются значения констант  $\rho$  и  $\delta$  при различных температурах в зоне контакта.

Следует отметить, что на формирование фактической площади контакта и сближение определенное влияние оказывают окисные пленки на поверхностях контакта. Как известно, на поверхности металла практически мгновенно образуется тонкий слой окисла толщиной 10—15 Å. Первая фаза окисления металла связана с образованием на металлической поверхности окисла за счет хемосорбции атомов кислорода металлической поверхности. Вторая фаза окисления сопровождается образованием вполне определенных, имеющих кристаллическое строение окислов. Окисление идет за счет внедрения атомов кислорода в решетку металла.

Различают два вида окисных пленок. Первый вид окисной пленки образуется на поверхности металла в обычных атмосферных условиях при комнатных темпе-

ратурах, при этом толщина пленки порядка нескольких ангстрем (табл. 2-10) [Л. 73].

Таблица 2-10

**Толщина окисной пленки на поверхности образца при комнатной температуре [Л. 73]**

| Подготовка образца       | Толщина, Å | Время выдержки образца, ч |
|--------------------------|------------|---------------------------|
| Отжиг . . . . .          | 10—15      | 0,1                       |
| Механическая полировка   | 15—20      | 1                         |
| Светлый отжиг в водороде | 30         | 300                       |
| Холодная прокатка . . .  | 15—20      | 0,1                       |
| Механическая полировка   | 15—25      | 2,5                       |
| То же . . . . .          | 25—35      | 264                       |

Второй тип окисных пленок возникает при повышенных температурах, а толщина пленок в этом случае не ограничена.

Например, на алюминии первичная пленка достигает толщины 50—100 Å и состоит из  $Al_2O_3$ , а при нагревании алюминия до 573—673°К толщина пленки достигает 2 000—3 000 Å.

В табл. 2-11 приведены толщины пленки из куприта  $Cu_2O$  на меди при различных температурах нагрева по данным [Л. 73].

При медленном окислении металла образующиеся пленки копируют первоначальный топографический рельеф лежащего под ними металла, в то время как при быстром окислении образуются пирамиды окислов, лежащие выше общего уровня.

Рост пленки уменьшается со временем, а затем совсем прекращается. Тонкие пленки обычно связаны с основным металлом, по мере же их утолщения прочность их крепления уменьшается. В ряде случаев небольшое

Таблица 2-11  
**Толщина окисной пленки на меди при различных температурах нагрева (Л. 73)**

| Цвета побежалости    | Толщина, Å (определена электрометрически) |
|----------------------|---|
| Темный . . . . .     | 190                                       |
| Светло-розовый . . . | 260                                       |
| Ярко-розовый . . .   | 330                                       |
| Светло-синий . . .   | 410                                       |
| Желтый II . . . . .  | 760                                       |
| Оранжевый II . . .   | 980                                       |

механическое воздействие приводит к отслоению утолщенной окисной пленки от металла.

Обычно поверхности пленки представляют собой соединения, обладающие малой пластичностью и большей твердостью, чем основной металл. Исследования Семснова [Л. 74] дают следующую относительную твердость окислов:

|   |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|
| Материал образца . . . . .                | Al  | Cd  | Pb  | Sn  |
| Относительная твердость окислов . . . . . | 4,5 | 1,5 | 1,3 | 1,2 |

Работа Айбиндера и Клоковой [Л. 75] по исследованию поведения гальванически нанесенных пленок, имитирующих окисные, при значительных нагрузках (обеспечивающих сцепление) позволила установить ряд особенностей. Так, например, когда поверхностный слой тверже и менее пластичен (как и окислы), чем лигележащий металл, при некоторых усилиях и степени деформации этот слой начинает растрескиваться и разрушаться, причем симметрично на обеих поверхностях, после чего куски пленки движутся вместе с растекающимися вследствие деформации поверхностями. Освобожденный от загрязнений металл на обеих поверхностях после соответствующего сближения сцепляется.

В заключение обзора основных положений механического контактирования твердых поверхностей следует отметить, что к настоящему времени имеется большое количество расчетных зависимостей по определению фактической площади контакта и сближения соприкасающихся поверхностей как плоских (2-9), так и с определенными отклонениями (2-14) (2-21). Имеются зависимости для определения площади контакта и сближения в зависимости от времени приложения сжимающего усилия (2-26) и (2-27). Многие из приведенных зависимостей, учитывающих особенности механического контакта, дают качественно правильные результаты, если принимаются при соблюдении условий, заложенных в основу их вывода. Однако в ряде случаев эти формулы не могут обеспечить при расчетах правильные результаты из-за неучета всех особенностей рассчитываемого контакта (например, нерегулярная волнистость и неплоскостность неправильной геометрической формы) или недостатка данных по изменению различных входящих в них параметров. Тогда следует отдать предпочтение опытному определению указанных параметров.

## ТЕПЛООБМЕН В ЗОНЕ КОНТАКТА ТВЕРДЫХ ТЕЛ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

### 3-1. ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНТАКТИРОВАНИИ ПЛОСКОСТНО-ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

При рассмотрении процесса передачи тепла через зону контакта обычно принимают следующие допущения [Л. 6, 14, 22]:

- 1) пятна фактического контакта равномерно распределены по всей поверхности сопряжения;
- 2) все пятна фактического контакта имеют форму круга с одним и тем же радиусом  $a$ , практически остающимся неизменным при приложении нагрузки;
- 3) выступы микронеровностей претерпевают чисто пластическую деформацию;
- 4) тепловое сопротивление окисной пленки пренебрежимо мало.

Первые два допущения не вызывают особых возражений, так как они в основном не противоречат положениям теории механического контактирования [Л. 12, 69], чего нельзя сказать о третьем и четвертом допущениях.

Действительно из гл. 2 видно что в большинстве случаев поверхности контактируют как упруго, так и пластически. Пренебрежение же термическим сопротивлением окисной пленки не всегда оправдано.

Исходя из первых двух допущений, авторы работы [Л. 78] предлагают для определения первой составляющей в правой части уравнения (1-1), т. е. тепловой проводимости через места фактического контакта (в условиях глубокого вакуума), следующее выражение:

$$\alpha_m = \frac{2a\bar{\lambda}_m n}{\varphi S_{II}}, \quad (3-1)$$

- где  $a$  — радиус единичного пятна контакта;  
 $\varphi$  — коэффициент стягивания линий теплового потока к пятнам фактического контакта;  
 $n$  — число единичных пятен контакта на номинальной площади.

Количество единичных пятен на номинальной поверхности контакта определяется из выражения

$$n = \frac{S_{\phi}}{\pi a^2}. \quad (3-2)$$

Средний радиус единичного пятна контакта соприкасающихся поверхностей с неровностями согласно опытным данным работы [Л. 98] равен  $3 \cdot 10^{-5}$  м.

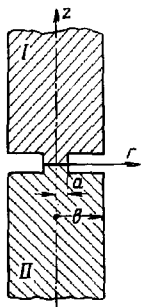


Рис. 3-1. Схема элементарного цилиндра с одним круглым пятном контакта.

Входящий в формулу (3-1) коэффициент стягивания линий теплового потока к пятнам фактического контакта  $\varphi$  определен в работе Роусса [Л. 31]. Автор работы [Л. 31], исследуя термическое сопротивление при передаче тепла прямому круглому цилиндру радиусом  $b$  через изотермическое круговое пятно радиусом  $a$ , расположенное на торце цилиндра, получил

$$\varphi = 1 - 1,41x + 0,3x^3 + 0,053x^5 + \dots, \quad (3-3)$$

где  $x = a/b$  — коэффициент сужения, равный отношению радиуса пятна касания к радиусу схематического цилиндра (рис. 3-1).

Выразив коэффициент сужения через относительную площадь фактического контакта, получим следующее решение для  $\varphi$ :

$$\varphi = 1 - 1,41\eta_3^{1/2} + 0,3\eta_3^{3/2}. \quad (3-4)$$

Кривая зависимости  $\varphi = f(\eta_3)$  представлена на графике (рис. 3-2).

После подстановки (3-2) в (3-1) с учетом приведенного выше значения среднего радиуса единичного пятна контакта получим выражение для определения термического сопротивления фактического контакта:

$$R_m = \frac{\varphi}{2,12\lambda_m \eta_3} \cdot 10^{-4}. \quad (3-5)$$

Наличие в формуле (3-5) относительной площади фактического контакта  $\eta_3$  позволяет выразить термическое сопротивление  $R_m$  в зависимости от давления, механических свойств материалов, геометрических характе-



ристик контактных поверхностей отдельно для первоначального и последующих приложений нагрузки. Так, подставив в (3-5) выражения (2-1) и (2-9), получим соответственно формулы для определения термических сопротивлений фактического контакта для плоских поверхностей при начальном нагружении

$$R_m = \frac{\varphi \left( \frac{HB}{p} \right)}{2,12\bar{\lambda}_m} \cdot 10^{-4} \quad (3-6)$$

и при последующих приложениях нагрузки

$$R_m = \frac{\varphi}{2,12\bar{\lambda}_m \left( \frac{\alpha^{\omega/v} \delta^{v/v} r^{\omega} p}{h_{cp}^{\omega} K, B} \right)^{\frac{v}{v+\omega}}} \cdot 10^{-4}. \quad (3-7)$$

Расчетная формула (3-7) применима для теплового контакта плоских поверхностей, поэтому при подстановке (2-9) в (3-5) контурное давление  $q_k$  было заменено контактным давлением  $p$ . Кроме того, как следует из теории механического контактирования, при неоднократных нагружениях поверхностей максимальные выступы неровностей  $h_{max}$  сминаются до размера средних выступов; отсюда в формуле (3-7)  $h_{max}$  заменено  $h_{cp}$ .

При пользовании формулой (3-7) в широкой расчетной практике необходимо либо применять данные табл. 2-3—2-7, либо определять параметры поверхностей опытным путем.

Определенный интерес представляет упрощенная зависимость для определения относительной площади фактического контакта  $\eta'_3$  с учетом коэффициента стягивания линий теплового потока к пятнам контакта  $\eta$  в функции  $\eta_3$ , имеющая вид

$$\eta'_3 = \frac{\eta_3}{\varphi} = \left( \frac{p}{E} B_n \right)^{0,8}. \quad (3-8)$$

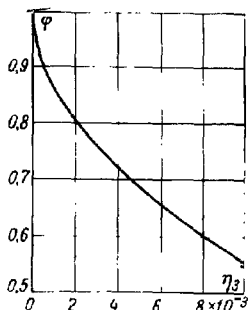


Рис. 3-2. Зависимость коэффициента стягивания линий теплового потока от относительной площади фактического контакта.

Эта зависимость выведена путем усреднения значений параметров в выражении (2-9), полученных при обработке поперечных и продольных профилограмм с поверхностей с чистотой обработки от 3-го до 10-го класса, для материалов с  $E > 7 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup>, относительных нагрузок на контактных поверхностях  $p/E = 5 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-4}$ , а также значений параметров, взятых из табл. 2-4. Входящий в (3-8) коэффициент  $B_{\Pi}$ , характеризующий геометрические свойства поверхностей, представлен на графике на рис. 3-3 в зависимости от суммы средних высот микронеровностей контактирующих поверхностей  $h_{ср1} + h_{ср2}$ .

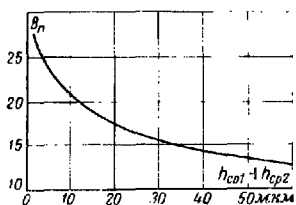


Рис. 3-3. Зависимость коэффициента  $B_{\Pi}$ , характеризующего геометрические свойства контактирующих поверхностей, от суммы средних высот выступов микронеровностей.

Таким образом, для приближенного расчета термического сопротивления фактического контакта  $R_{\text{м}}$  при повторных приложениях нагрузки (на поверхностях различных классов обработки и различных материалов) из (3-5) с учетом (3-8) имеем следующую зависимость:

Зависимость (3-9) пригодна также для расчета  $R_{\text{м}}$  при первоначальном контакте плоских поверхностей с чистотой обработки выше 11-го класса и материалов с  $E > 18 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup>, когда наблюдается упругий контакт (см. табл. 2-2).

$$R_{\text{м}} = \frac{1}{2,12\bar{\lambda}_{\text{м}} \left( \frac{p}{E} B_{\Pi} \right)^{0,8}} \cdot 10^{-4}. \quad (3-9)$$

При тепловом контакте поверхностей с чистотой обработки выше 5-го класса при первоначальном нагружении, когда имеет место упруго-пластическая деформация микронеровностей, для приближенного расчета термического сопротивления фактического контакта можно применять выражение (3-9) в следующем виде:

$$R_{\text{м}} = \frac{1}{2,12\bar{\lambda}_{\text{м}} \left( \frac{p}{E} B_{\Pi} \right)^{0,8} g} \cdot 10^{-4}, \quad (3-10)$$

где  $g$  — коэффициент, учитывающий разность между фактическими площадями контакта при начальном и последующих приложениях нагрузки (рис. 3-4).

Введение коэффициента  $g$  объясняется весьма ограниченными сведениями о формировании фактической площади контакта при начальном нагружении в зависимости от высоты неровностей и механических свойств материалов. За основу принят метод обработки экспериментальных данных в работе [11, 12], представленных в виде зависимости  $S_{\text{ф}} = f(N)$  для различных материалов при начальном и последующих приложениях нагрузки.

Значение коэффициента  $B_{\text{ш}}$ , характеризующего геометрические свойства поверхностей, для формулы (3-10)

находится по тому же графику на рис. 3-3, но с учетом его зависимости от суммы максимальных высот микронеровностей контактирующих поверхностей ( $h_{\text{макс1}} + h_{\text{макс2}}$ ).

Функциональная зависимость относительной площади фактического контакта с учетом коэффициента стягивания  $\eta'_3$  от силы сжатия, механических свойств материала образцов и качества их поверхности теоретически получена при условии ввода ряда допущений, достоверность которых целесообразно подвергнуть проверке.

Приведя выражение (3-1) с учетом (3-2) и (3-8) к безразмерному виду путем умножения обеих его частей на  $a/\bar{\lambda}_m$ :

$$\frac{\alpha_m a}{\bar{\lambda}_m} - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\eta_3}{\varphi} = \frac{2}{\pi} \cdot \left( \frac{p}{E} B_{\text{ш}} \right)^{3,8}$$

и, обозначив комплекс  $\alpha_m a / \bar{\lambda}_m$  через  $\text{Nu}_m$ , получим уравнение вида

$$\text{Nu}_m = \frac{2}{\pi} \left( \frac{p}{E} B_{\text{ш}} \right)^{0,6} \quad (3-11)$$

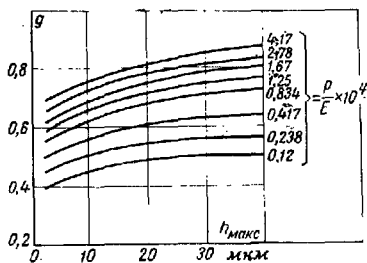


Рис. 3-4. Зависимость коэффициента  $g$ , учитывающего разность фактических площадей контакта при начальном и последующих приложениях нагрузки, от максимальной высоты выступов микронеровностей  $h_{\text{макс}}$  при различных относительных давлениях.

## Характеристики образцов и условия опытов

| № п/п. | Материал образцов | Класс чистоты обработки | Температура в зоне контакта, °К | Давление $p \cdot 10^{-3}$ , н/м <sup>2</sup> |
|--------|-------------------|-------------------------|---------------------------------|---|
| 1      | 1X18H9T           | 5                       | 473                             | 98  |
| 2      | Д16               | 5                       | 398                             | 98  |
| 3      | Д16               | 5                       | 398                             | 49  |
| 4      | 1X18H9T           | 5                       | 473                             | 19,6  |
| 5      | Сталь 45          | 8                       | 370                             | 98  |
| 6      | Сталь 45          | 6а                      | 371                             | 24,5  |
| 7      | Сталь 45          | 6а                      | 371                             | 196   |
| 8      | Сталь 45          | 6а                      | 371                             | 294   |
| 9      | М2                | 8в                      | 393                             | 9,8   |
| 10     | М2                | 8в                      | 393                             | 98  |
| 11     | Д16Т              | 8в                      | 390                             | 24,5  |
| 12     | Д16Т              | 8в                      | 390                             | 98  |

Такая форма уравнения дает возможность найти по экспериментальным данным зависимость комплекса  $Nu_M$  от контактного давления, чистоты обработки поверхностей и физико-механических свойств поверхностного слоя контактирующего материала и позволяет произвести обработку экспериментальных

данных ряда исследований контактного теплообмена при глубоком вакууме (табл. 3-1).

Результаты обработки опытных данных различных авторов, сравнение которых представлено на рис. 3-5, показывают, что большинство опытных точек с погрешностью  $\pm (10 \div 20) \%$  обобщается зависимостью (3-11).

Определение характера влияния поверхностных пленок на термическое сопротивление контакта теоретическим путем затрудняется из-за отсутствия расчетных

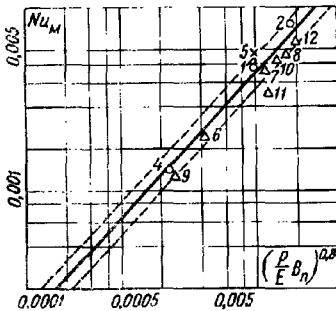


Рис. 3-5. Результаты обработки опытных данных по контактному теплообмену в вакууме.

По данным: О — [Л. 14]; × [Л. 8]; Δ — автора. Цифры соответствуют порядковым номерам образцов (см. табл. 3-1).

зависимостей по динамике процесса роста пленок, их сопротивлению усилиям сжатия и т. п. На данном этапе, очевидно, следует отдать предпочтение накоплению экспериментальных данных по вопросу теплообмена в зоне контакта при наличии поверхностных пленок.

Вторая составляющая в правой части уравнения (1-1), т. е. тепловая проводимость прослойки межконтактной среды может быть представлена выражением

$$\alpha_c = \frac{\lambda_c}{\delta_{\text{эКВ}}} \quad (3-12)$$

Выражение для эквивалентной толщины прослойки  $\delta_{\text{эКВ}}$  (рис. 3-6) с учетом дискретного характера расположения полостей среды при нулевой нагрузке имеет вид

$$\delta_{\text{эКВ}} = \frac{1}{S_{\text{П}}} (h_{\text{макс1}} + h_{\text{макс2}}) (S_{\text{н}} \cdot S_{\text{ф}}) (1 - m), \quad (3-13)$$

или, выразив площади через их относительные значения, получим:

$$\delta_{\text{эКВ}} = (h_{\text{макс1}} + h_{\text{макс2}}) (1 - \eta_3) (1 - m). \quad (3-14)$$

Значения коэффициента  $m$  заполнения профиля неровностей при различных видах механической обработки представлены на рис. 3-7.

При первоначальном приложении контактной нагрузки деформация вершин микронеровностей влечет за собой сближение поверхностей. В этом случае эквивалентная толщина прослойки определяется выражением

$$\delta_{\text{эКВ}} = (h_{\text{макс1}} + h_{\text{макс2}}) (1 - m) (1 - \varepsilon) (1 - \eta_3). \quad (3-15)$$

Решив совместно (3-15) и (3-12) и перейдя к термическому сопротивлению межконтактной среды, получим расчетную зависимость для первоначального нагружения плоскодно-шероховатых поверхностей:

$$R_c = \frac{(h_{\text{макс1}} + h_{\text{макс2}}) (1 - m) (1 - \varepsilon) (1 - \eta_3)}{\lambda_c}. \quad (3-16)$$

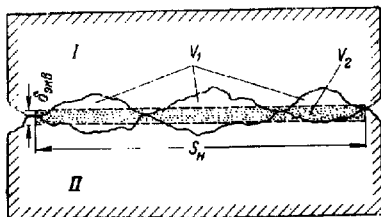


Рис. 3-6. К определению эквивалентной толщины прослойки. I и II—контактирующие тела;  $V_1=V_2=V$ ;  $\delta_{\text{экив}} = \frac{V}{S_H}$

( $V_1$ —объем пространства между выступами контактирующих поверхностей;  $V_2$ —объем слоя постоянной толщины  $\delta_{\text{экив}}$ ).

| Вид механической обработки | Коэффициент заполнения профиля $m$ | Поперечная профилограмма |
|----------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| Точение                    | $\sim 0,33$                        |                          |
| Шлифование                 | $\sim 0,5$                         |                          |
| Полірование                | $\sim 0,66$                        |                          |

Рис. 3-7. Значения коэффициента заполнения профиля неровностей и поперечная профилограмма их при различных видах механической обработки.

поверхностей до 7-го класса чистоты термическое сопротивление среды при неоднократных нагружениях определяется из выражения

$$R_c = \frac{(h_{cp1} + h_{cp2}) (1 - m) (1 - \epsilon) (1 - \eta_3)}{\lambda_c} \quad (3-17)$$

Расчет по формуле (3-17) облегчается при использовании приведенной на рис. 3-8 графической зависимости  $1 - m = f(h_{cp})$ , полученной путем обработки продольных и поперечных профилограмм поверхностей образцов

Входящие в выражение (3-16) относительные величины  $\eta_3$  и  $\epsilon$  определяются по формулам (2-9) для контакта плоских поверхностей.

Суммарная величина максимальных высот сопряженных поверхностей обычно ограничивается областью первоначальных нагружений, когда исходные микронеровности обработанной поверхности имеют случайные микровыступы, значительно превосходящие средние высоты. В дальнейшем по мере приложения последующих нагрузок, когда превалирующую роль начинает играть чисто упругая деформация микронеровностей, для формулы (3-16) за расчетный размер необходимо принимать суммарную величину средних высот микровыступов.

В этом случае для по-

с чистотой обработки от 3-го до 10-го класса из материалов с  $E > 7 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup>.

Для поверхностей, вступающих в первоначальный контакт, в первом приближении можно пользоваться зависимостью  $1 - m = f(h_{\text{макс}})$  (рис. 3-8).

Анализ профилограмм с поверхностей, имеющих обработку выше 7-го класса чистоты, при неоднократных нагружениях показывает, что, как правило наблюдается наличие отдельных максимальных выступов, превосходящих в 1,5 - 1,8 раза среднюю высоту неровностей (рис. 3-9). Очевидно, что вследствие значительного количества таких неровностей прилагаемая повторная нагрузка деформирует их упруго или имеет место прогиб основания полупространства [Л. 79]. Вступление же в контакт основной массы выступов с высотой  $h_{\text{ср}}$  обычно наступает после приложения относительной нагрузки порядка  $p/E = (5 \div 5,2) \cdot 10^{-5}$ .

С учетом особенностей контакта поверхностей с чистотой обработки выше 7-го класса формула (3-17) принимает вид

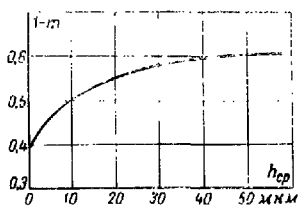


Рис. 3-8. Зависимость  $1 - m = f(h_{\text{ср}})$  для поверхностей с чистотой обработки от  $\nabla 3$  до  $\nabla 10$  из материалов с  $E > 7 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup>.

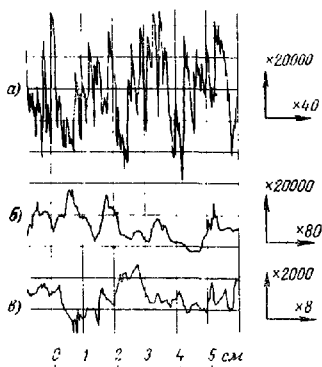


Рис. 3-9. Поперечные профилограммы поверхностей образцов (сталь 45), обработанных выше 7-го класса чистоты (поверхности обжаты до  $p/E = 0,4 \cdot 10^{-5}$ ).

а — чистота поверхности класса 8в; б — класса 10в; в — класса 8а.

$$R_c = \frac{(h_{\text{ср1}} + h_{\text{ср2}}) (1 - m) (1 - \epsilon) (1 - \eta_3) d}{\lambda_c}, \quad (3-18)$$

где  $d$  — коэффициент, характеризующий влияние максимальных выступов микронеровностей при контакте поверхностей выше 7-го класса чистоты и зависящий от относительной нагрузки  $p/E$  (рис. 3-10).

Расчет термического сопротивления межконтактной среды при первоначальном нагружении несколько облегчается применением усредненных значений относительного сближения для характерных видов механической обработки:

1) строгание, точение, фрезерование

$$\varepsilon = \left( \frac{0,1p}{HB} \right)^{0,28}; \quad (3-19)$$

2) шлифование

$$\varepsilon = \left( \frac{0,0125p}{HB} \right)^{0,185}; \quad (3-20)$$

3) полировка и доводка

$$\varepsilon = \left( \frac{0,0064p}{HB} \right)^{0,185}. \quad (3-21)$$

Для приближенного расчета термического сопротивления межконтактной среды при первоначальном нагружении используется выражение (3-16) без составляющей  $1 - \eta_3$ , влияние которой на конечный результат незначительно, т. е.

$$R_c = \frac{(h_{\text{МВРЭ1}} + h_{\text{МАКЭ2}})(1 - m)(1 - \varepsilon)}{\lambda_c}. \quad (3-22)$$

Приближенный расчет сопротивления межконтактной среды при повторных нагружениях для поверхностей до 7-го класса чистоты осуществляется по формуле вида

$$R_c = \frac{(h_{\text{СР1}} + h_{\text{СР2}})(1 - m)}{\lambda_c}, \quad (3-23a)$$

а для поверхностей выше 7-го класса чистоты—по формуле

$$R_c = \frac{(h_{\text{СР1}} + h_{\text{СР2}})(1 - m)d}{\lambda_c}. \quad (3-23б)$$

Выражения (3-23a) и (3-23б) получены соответственно из (3-17) и (3-18) путем исключения составляющих  $1 - \varepsilon$  и  $1 - \eta_3$ . Такое допущение вытекает из положения



в механическом контактировании твердых поверхностей (см. гл. 2) при многократных нагружениях, когда деформация неровностей протекает упруго и незначительна по величине в сравнении с эквивалентной толщиной зазора.

Приведенные выше выражения для определения термических сопротивлений мест фактического контакта и межконтактной среды позволяют получить для приближенного расчета формулы полного термического сопротивления контакта, плоскошероватых поверхностей (при отсутствии окисных пленок).

Подставив (3-6) и (3-22) в (1-1), получим выражение для определения тепловой проводимости контакта при первоначальном нагружении поверхностей с чистотой обработки до 5-го класса из высокопластичных материалов при  $p < 200 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>:

$$\frac{1}{R_k} = 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_m \frac{p}{HB} \cdot \frac{1}{\varphi} + \frac{\lambda_c}{(h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2}) (1-m) (1-\epsilon)}. \quad (3-24)$$

Выражение для тепловой проводимости контакта при повторных приложениях нагрузки для всех классов чистоты обработки поверхностей, а также при первоначальных нагружениях для поверхностей с чистотой обработки выше 11-го класса получим путем подстановки (3-9) и (3-23б) в (1-1):

$$\frac{1}{R_k} = 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_m \left( \frac{p}{E} B_{II} \right)^{0,8} + \frac{\lambda_c}{(h_{cp1} + h_{cp2}) (1-m) d}. \quad (3-25)$$

При первоначальных приложениях нагрузки на контактные поверхности 5—11-го классов чистоты обработки формулу тепловой проводимости найдем подстановкой (3-10) и (3-22) в (1-1):

$$\frac{1}{R_k} = 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_m \left( \frac{p}{E} B_{II} \right)^{0,8} g + \frac{\lambda_c}{(h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2}) (1-m) (1-\epsilon)}. \quad (3-26)$$

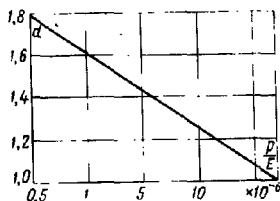


Рис. 3-10. Зависимость коэффициента  $d$ , характеризующего влияние максимальных выступов микронеровностей при контакте поверхностей выше 7-го класса чистоты, от относительной нагрузки  $p/E$ .

Следует учесть, что при тепловом контакте разнородных материалов твердость по Бринеллю НВ принимается для материала с меньшей твердостью.

Теплопроводность и предел упругости для случая контакта разнородных материалов принимаются как приведенные и определяются из выражений

$$\lambda_m = \frac{2\lambda_{m1}\lambda_{m2}}{\lambda_{m1} + \lambda_{m2}} \quad \text{и} \quad E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}.$$

Вследствие того, что в деталях машин и механизмов чаще всего встречается тепловой контакт поверхностей, испытывающих неоднократные приложения нагрузки, наибольший интерес для расчетов представляет зависимость (3-25). Вывод этой зависимости выполнен с рядом допущений. В этой связи определенный интерес представляет сравнение экспериментальных данных ряда авторов с результатами расчета по формуле (3-25).

Приведя зависимость (3-25) к безразмерному виду путем умножения обеих частей ее на  $\frac{(h_{cp1} + h_{cp2})(1-m)d}{\lambda_c}$ , получим,

$$\frac{\alpha_n (h_{cp1} + h_{cp2})(1-m)d}{\lambda_c} = \\ = 2,12 \cdot 10^4 \frac{\bar{\lambda}_m \left(\frac{p}{E} B_{II}\right)^{0,8} (h_{cp1} + h_{cp2})(1-m)d}{\lambda_c} + 1.$$

Обозначив комплексы

$$\frac{\alpha_n (h_{cp1} + h_{cp2})(1-m)d}{\lambda_c} \quad \text{и} \quad \frac{\bar{\lambda}_m (h_{cp1} + h_{cp2})d}{\lambda_c}$$

соответственно через  $Nu_n$  и  $Nu_m$ , получим:

$$Nu_n = c Nu_m \left(\frac{p}{E} B_{II}\right)^{0,8} + 1,$$

или

$$\frac{Nu_n - 1}{Nu_m} = c \left(\frac{p}{E} B_{II}\right)^{0,8}, \quad (3-27)$$

где  $c = 2,12 \cdot 10^4$ .

Такая форма уравнения позволяет провести совместную обработку имеющихся экспериментальных данных в широком диапазоне классов чистоты обработки кон-

Характеристики образцов и условия опытов  
по контактному теплообмену в среде воздуха

| № п/п. | Материал образцов | Класс чистоты обработки | Температура в зоне контакта, °К | Давление $P \cdot 10^{-3}$ , $\text{н/м}^2$ |
|--------|-------------------|-------------------------|---------------------------------|---|
| 1      | Д16               | 4                       | 473                             | 98  |
| 2      | Д16               | 5                       | 393                             | 196   |
| 3      | 1X18H9T           | 3                       | 383                             | 98  |
| 4      | Ст. 3             | 8                       | 423                             | 196   |
| 5      | Д16Т              | 9                       | 420                             | 196   |
| 6      | Сталь 45          | 8                       | 346                             | 98  |
| 7      | Сталь 45          | 7                       | 346                             | 196   |
| 8      | Сталь 45          | 6                       | 346                             | 49  |
| 9      | Сталь 45          | 5                       | 346                             | 147   |
| 10     | ЭЖ-1              | 6                       | 377                             | 196   |
| 11     | Д16Т—сталь 45     | 5                       | 327                             | 157   |
| 12     | Д16Т              | 5                       | 310                             | 78,5  |
| 13     | Д16Т              | 6                       | 371                             | 50  |
| 14     | 30ХГСА            | 7                       | 371                             | 100   |
| 15     | Сталь 45—ЭЖ-1     | 8                       | 297                             | 196   |
| 16     | 1X13              | 5                       | 473                             | 196   |
| 17     | 1X13              | 8                       | 473                             | 196   |
| 18     | 1X13              | 3                       | 473                             | 98  |
| 19     | А1                | 8                       | 423                             | 41,1  |
| 20     | Сталь             | 8—11                    | 423                             | 685   |
| 21     | 1X13 -1X18H9T     | 8                       | 351,5                           | 117,5                                       |
| 22     | 1X13              | 8                       | 346                             | 78,5  |
| 23     | Сталь 45—1X18H9T  | 8                       | 303                             | 235   |
| 24     | 1X18H9T           | 5—6                     | 423                             | 147   |
| 25     | Д16               | 4                       | 473                             | 98  |
| 26     | Д16               | 4                       | 473                             | 9,8   |
| 27     | 30ХГСА            | 7                       | 371                             | 300   |
| 28     | 30ХГСА            | 7                       | 473                             | 200   |
| 29     | Д16Т              | 9                       | 420                             | 150   |
| 30     | 1X13              | 8                       | 473                             | 294   |
| 31     | 1X13              | 6                       | 453                             | 147   |
| 32     | Д16               | 5                       | 393                             | 9,8   |
| 33     | 30ХГСА            | 7                       | 371                             | 250   |
| 34     | Сталь 45 -1X18H9T | 8                       | 303                             | 117,5                                       |
| 35     | Сталь 45          | 4                       | 513                             | 98  |
| 36     | Сталь 45          | 4                       | 375                             | 196   |
| 37     | Д1Т—сталь 45      | 8а—9н                   | 420                             | 98  |
| 38     | Д1Т               | 4—7а                    | 417                             | 49  |
| 39     | Сталь 45          | 4—7б                    | 420                             | 98  |

тактных поверхностей, физико-механических свойств контактирующих материалов и воздействующих нагрузок для межконтактной среды — воздух.

Как следует из анализа рис. 3-11, уравнение (3-27) с отклонением не более  $\pm 20\%$  описывает результаты большинства опытов, проведенных в широком диапазоне нагрузок, термических условий контакта, чистоты обработки поверхностей для различных материалов (табл. 3-2).

Достаточно удовлетворительная сходимость экспериментальных данных с результатами приближенного расчета подтверждает достоверность принятых допущений.

В этом плане представляет интерес сравнительный анализ расчетных данных по уточненным (3-7) и (3-17) и приближенной (3-25) формулам с экспериментом, представленных в табл. 3-3 и на рис. 3-12. Из анализа табл. 3-3 видно, что расхождения между результатами расчета по уточненным и приближенной формулам незначительны.

Таким образом, предлагаемая зависимость (3-25) для многократных приложений нагрузки может применяться при определении термического сопротивления контактных соединений.

Для облегчения инженерных расчетов и выбора оптимальных значений параметров, определяющих термическое сопротивление соединений, формула (3-25) представлена в виде номограммы (рис. 3-13), построенной по методике, приведенной в работе [Л. 99]. При пользовании номограммой можно, зная  $E$  и  $\lambda_M$  материала контактной пары, а также  $\lambda_c$  среды,  $p$ ,  $h_{ср1} + h_{ср2}$  и  $l - m$ , определить действительное термическое сопротивление контакта  $R_K$  или составляющие  $\alpha_M$  и  $\alpha_c$  общей

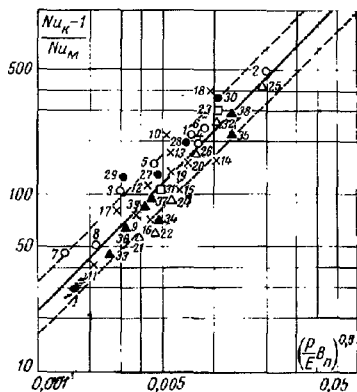


Рис. 3-11. Результаты обработки опытных данных по контактиному теплообмену в среде воздуха.

× — по данным [Л. 9]; ○ — по [Л. 14];  
 △ — по [Л. 26]; ● — по [Л. 23]; □ — по  
 [Л. 5]; ▲ — по данным автора (цифры  
 соответствуют порядковым номерам  
 образцов табл. 3-2).

тепловой проводимости соединения  $\alpha_{\text{к}}$ . В то же время, задаваясь допустимой величиной  $R_{\text{к}}$ , можно произвести подбор материала контактной пары, среды, усилия сжатия и качества сопряженных поверхностей.

Методика определения термического сопротивления контакта или его составляющих по номограмме (рис. 3-13) сводится к следующему. Из координатных осей  $\rho$ ,  $B$  и  $E$  по их значениям проводятся соответственно линии 1, 2 и 3, которые соединяются линией 4, проведенной под углом  $45^\circ$ . Из точки пересечения линий 3 и 4 вертикально направляется линия 5 до пересечения с контрольной линией номограммы. Из координатной оси  $\lambda_{\text{м}}$  по ее значению проводится линия 6 до пересечения с линией 7, направленной по горизонтали из точки пересечения линии 5 и контрольной линии. Под углом  $45^\circ$  из точки пересечения линий 6 и 7 идет линия 8, которая пересекается с вертикальной осью  $\alpha_{\text{м}}$ . Точка пересечения дает значение тепловой проводимости фактического контакта.

Из координатных осей  $\lambda_{\text{с}}$ ,  $1-m$ ,  $h_{\text{ср1}} + h_{\text{ср2}}$  по их значениям направляются линии 9, 10 и 11. Из точки пересечения линий 9 и 10 под углом  $45^\circ$  проводится линия 12 до пересечения с линией 11. Из оси  $\alpha_{\text{м}}$  по ее значению проводится горизонтальная линия 13 до пересечения с вертикальной линией 14. Точка пересечения линий 13 и 14 дает искомую величину термического сопротивления контакта, которая находится по кривым линиям, имеющим градуировку. Точка пересечения линии 14 с горизонтальной осью  $\alpha_{\text{с}}$  дает значение тепловой проводимости межконтактной среды.

Пример. Требуется определить термическое сопротивление соединения из стали 45 [ $\lambda_{\text{м}} = 47,3 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ ];  $E = 20 \cdot 10^{10} \text{ н}/\text{м}^2$ ] с поверхностями, обработанными по 5-му классу чистоты ( $h_{\text{ср}} =$

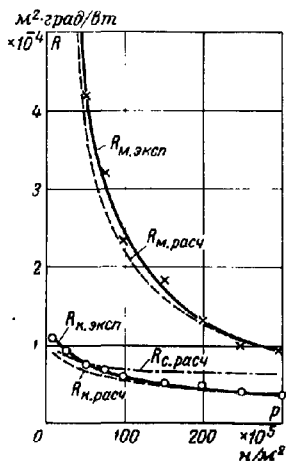


Рис. 3-12. Зависимость термического сопротивления контакта и его составляющих от нагрузки для материала пары сталь 45—сталь 45; чистота обработки  $\nabla 86$ ;  $T_{\text{к}} = 383^\circ \text{ К}$ .

| $p \cdot 10^{-5}, \text{ кг/м}^2$ | Результаты уточненного теоретического расчета (среда — воздух) |          |  |   |  |   |  |   | Результаты (среда —)  |  |
|-----------------------------------|--|----------|--|---|--|---|--|---|-----------------------|--|
|                                   | $\gamma_0 \cdot 10^3$  | $\alpha$ | $\alpha_m \cdot 10^{-2}, \text{ м}^2/\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{град}$ | $R_c \cdot 10^4, \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}$ | $\alpha_c \cdot 10^{-2}, \text{ м}^2/\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{град}$ | $R_c \cdot 10^4, \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}$ | $\alpha_c \cdot 10^{-2}, \text{ м}^2/\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{град}$ | $R_c \cdot 10^4, \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}$ | $\gamma_0 \cdot 10^3$ | $\alpha_m \cdot 10^{-2}, \text{ м}^2/\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{град}$ |
| 9,8                               | 47,8   | 0,099    | 4,98   | 20,1  | 127  | 0,79  | 131,98   | 0,76  | 71,7                  | 7,28   |
| 24,5                              | 111  | 0,115    | 11,9   | 8,42  | 129  | 0,776   | 140,9  | 0,71  | 144                   | 15,15  |
| 49                                | 209  | 0,13     | 22,7   | 4,41  | 131,5  | 0,761   | 154,2  | 0,65  | 260                   | 26,4   |
| 73,5                              | 302  | 0,139    | 33,3   | 3   | 132,6  | 0,754   | 165,9  | 0,603   | 353                   | 36,5   |
| 98                                | 398  | 0,147    | 44,5   | 2,25  | 134,5  | 0,745   | 179  | 0,56  | 452                   | 46,1   |
| 147                               | 575  | 0,158    | 65,4   | 1,53  | 136  | 0,737   | 201,4  | 0,487   | 630                   | 64,2   |
| 196                               | 741  | 0,165    | 86   | 1,165   | 137,2  | 0,73  | 223,2  | 0,448   | 795                   | 80,8   |
| 245                               | 910  | 0,17     | 107  | 0,934   | 138  | 0,725   | 245  | 0,408   | 940                   | 96   |
| 294                               | 1060   | 0,176    | 125,6  | 0,797   | 139  | 0,72  | 264,6  | 0,379   | 1090                  | 111  |

$= 12,5 \cdot 10^{-6}$  м) при температуре в зоне контакта  $T_c = 420^\circ \text{К}$  и давлении  $p = 100 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> в среде воздуха  $\lambda_c = 35,5 \cdot 10^{-3}$  вт/(м · град). Из графика на рис. 3-8 для поверхностей с  $h_{ср1} = 12,5 \cdot 10^{-6}$  м и  $m = 0,51$  и для  $h_{ср1} + h_{ср2} = 25 \cdot 10^{-6}$  м из рис. 3-3  $B_{II} = 16$ . По номограмме находим:  $R_c = 1,64 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> · град/вт.

Как уже отмечалось выше, при температурах в зоне контакта выше  $700\text{--}750^\circ \text{К}$  необходимо учитывать термическое сопротивление лучистого теплообмена  $R_{л}$  в межконтактной зоне [Л. 76, 77]:

$$R_{л} = \frac{T_1 - T_2}{\epsilon_{1-2} c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}, \quad (3-28)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — соответственно средние температуры соприкасающихся поверхностей, отдающих и получающих тепло;

$\epsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$  — приведенная степень черноты поверхностей контактной зоны;  $c_0 = 5,67$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Входящая в выражение (3-28) приведенная степень черноты контактных поверхностей  $\epsilon_{1-2}$  зависит от температуры в зоне контакта, чистоты обработки поверхностей, физических свойств материалов контактной пары и пр., что необходимо учитывать при определении этой величины по табличным данным.

среда—воздух или вакуум;  $T_{\text{н}} = -383^{\circ}\text{K}$ ;  $r_{\text{рач}} = 0,185 \cdot 10^{-3}\text{м}$ ;  $b' = 205$ ;  $\nu' = 5,4$

даты приближенного теоретического расчета  
(воздух)

Результаты эксперимента (вакуум)

| $R_{\text{ж}} \cdot 10^4$ ,<br>$\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{К} / \text{см}$ | $\alpha_{\text{с}} \cdot 10^{-3}$ ,<br>$\text{см} / (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{K})$ | $R_{\text{с}} \cdot 10^4$ ,<br>$\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{К} / \text{см}$ | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-3}$ ,<br>$\text{см} / (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{K})$ | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4$ ,<br>$\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{К} / \text{см}$ | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>$\text{вт} / \text{м}^2$ | $\Delta T$ ,<br>$^{\circ}\text{K}$ | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-3}$ ,<br>$\text{см} / (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{K})$ | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4$ ,<br>$\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{К} / \text{см}$ | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4$ ,<br>$\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{К} / \text{см}$ |
|---|---|---|---|---|---|------------------------------------|---|---|---|
| 13,71   | 106   | 0,945   | 113,3   | 0,883   | 61,8  | 6,8                                | 91  | 1,1   | 15,1  |
| 6,62  | 124,5   | 0,805   | 139,6   | 0,717   | 62,8  | 5,9                                | 106,4   | 0,94  | 7,18  |
| 3,79  | 131,5   | 0,762   | 157,9   | 0,635   | 72,5  | 5,5                                | 131,6   | 0,76  | 4,2   |
| 2,71  | 136   | 0,735   | 172,5   | 0,58  | 76,5  | 5,2                                | 147   | 0,68  | 3,2   |
| 2,17  | 141   | 0,71  | 187,1   | 0,535   | 82,8  | 4,8                                | 172,5   | 0,58  | 2,3   |
| 1,56  | 152,5   | 0,657   | 216,7   | 0,462   | 84,7  | 4,4                                | 192,5   | 0,52  | 1,82  |
| 1,24  | 152,5   | 0,657   | 233,3   | 0,429   | 85,5  | 4,1                                | 209   | 0,48  | 1,32  |
| 1,045   | 152,5   | 0,657   | 248,5   | 0,403   | 100   | 4                                  | 250   | 0,4   | 1,0   |
| 0,902   | 152,5   | 0,657   | 263,5   | 0,38  | 105   | 4                                  | 263   | 0,38  | 0,92  |

Наибольшую трудность представляют операции по определению температур  $T_1$  и  $T_2$ . Вначале расчетным путем находится суммарное значение термического сопротивления фактического контакта и межконтактной среды. Затем определяется температурный перепад в контактной зоне  $\Delta T = T_1 - T_2 \cdot R_{\text{ж}q_{\text{ср}}}$ . Средняя температура поверхности, которая отдает тепло, т. е.  $T_1$ , определяется стандартным методом по перепаду температур в первом образце. После определения значения температуры  $T_2$  можно найти термическое сопротивление лучистого теплообмена в межконтактной прозрачной среде.

Тепловая проводимость лучистого теплообмена включена параллельно тепловым проводимостям фактического контакта и межконтактной среды, т. е.  $\frac{1}{R_{\text{ж}}} = \frac{1}{R_{\text{м}}} + \frac{1}{R_{\text{с}}} + \frac{1}{R_{\text{л}}}$ .

### 3-2. ТЕПЛОБМЕН ПРИ КОНТАКТИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ВОЛНИСТОСТЬЮ И МАКРОНЕРОВНОСТЯМИ

Как отмечалось выше, в реальных условиях часто встречаются соединения, где контактируются поверхности с волнистостью или макронеровностями. Течение теплового процесса при таком контакте в случае наличия теплопроводной межконтактной среды (газы, жидкости

и т. п.) на первый взгляд кажется, что процесс усложняется. Очевидно, имеет место некоторое перераспределение линий теплового тока и более сильное стягивание их к крупномасштабным областям контакта (к контурным площадкам контакта). Однако ввиду того, что шаг волны

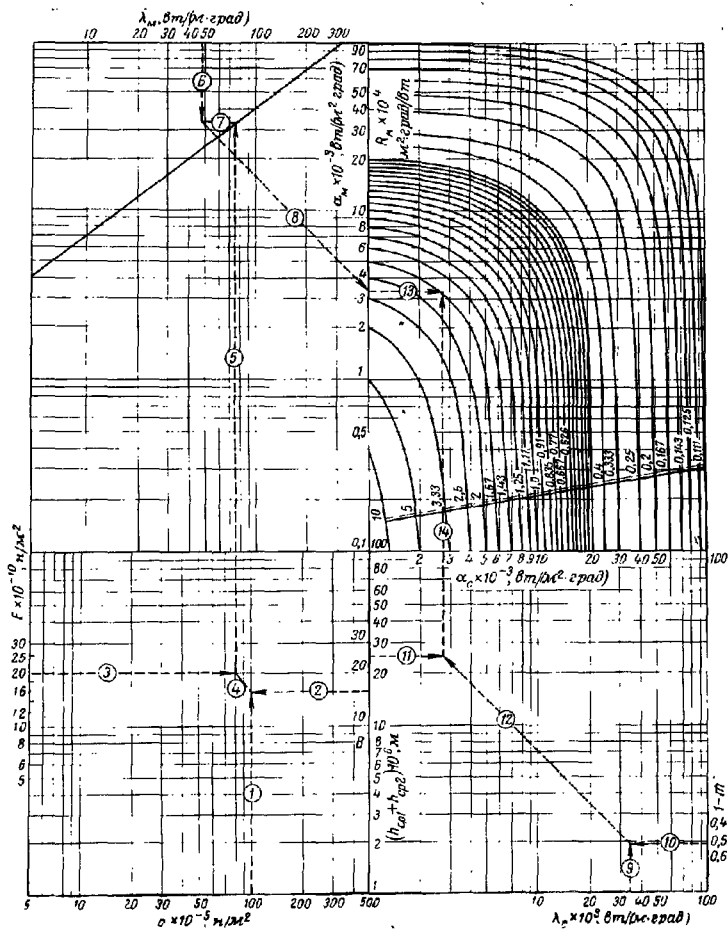


Рис. 3-13. Помограмма для определения общего термического сопротивления и его составляющих при контакте плоскостно-шероховатых поверхностей,



или макронеровности. Коэффициент  $\eta_2$  существенно превышает величину зазора (табл. 3-4). Величина искажений направления линий теплового контакта незначительна. Это в первую очередь характерно для диэлектрических теплопроводных материалов.

Таблица 3-4

**Характеристики образцов с волнистыми поверхностями**

| № п.п.                       | Вид обработки | Высота волны $H$ , мм | Шаг волны $L$ , мм | Коэффициент заполнения профиля $K$ | Примечание                                    |
|------------------------------|---------------|-----------------------|--------------------|------------------------------------|---|
| I. По данным [Л. 52]         |               |                       |                    |                                    |   |
| 1                            | Строгание     | 25                    | 3 250              | 0,452                              | Ярко выраженная нерегулярность по высоте волн |
| 2                            | "             | 24                    | 3 200              | 0,45                               |   |
| 3                            | "             | 24                    | 3 400              | 0,5                                |   |
| 4                            | "             | 20                    | 3 400              | 0,457                              |   |
| 5                            | "             | 19                    | 2 750              | 0,412                              |   |
| 6                            | "             | 19                    | 3 500              | 0,482                              |   |
| 7                            | "             | 13                    | 3 200              | 0,5                                |   |
| 8                            | Шлифование    | 5                     | 3 000              | 0,5                                |   |
| 9                            | "             | 5                     | 3 500              | 0,46                               |   |
| 10                           | "             | 4                     | 3 000              | 0,463                              |   |
| 11                           | "             | 3                     | 4 500              | 0,537                              |   |
| 12                           | "             | 25                    | 1 600              | 0,483                              |   |
| II. Экспериментальные данные |               |                       |                    |                                    |   |
| 13                           | Шлифование    | 3,2                   | 5 000              | 0,44                               | Нерегулярная вознистость                      |
| 14                           | "             | 8                     | 5 500              | 0,5                                |   |
| 15                           | "             | 6                     | 4 800              | 0,48                               |   |
| 16                           | Фрезерование  | 43                    | 4 500              | 0,49                               |   |
| 17                           | "             | 15                    | 2 500              | 0,5                                |   |

Исходя из выражений, определяющих тепловую проводимость контакта плоскостно-шероховатых поверхностей, зависимости для теплового контакта волнистых поверхностей имеют следующий вид:

при начальном нагружении

$$\frac{1}{R_{KB}} = 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_M \eta_1 \eta_2 + \frac{\lambda_c}{(H_{\text{макс. в1}} + H_{\text{макс. в2}}) (1 - K) (1 - \epsilon)}; \quad (3-29)$$

при повторных приложениях нагрузки

$$\frac{1}{R_{KB}} = 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_M \eta_1 \eta_2 + \frac{\lambda_c}{(H_{\text{ср. в1}} + H_{\text{ср. в2}}) (1 - K)}, \quad (3-30)$$

где в случае контакта волнистой и плоскостно-шероховатой поверхностями имеем:  $H_{\text{макс.в}} + h_{\text{макс}}$  или  $H_{\text{ср.в}} + h_{\text{ср.}}$ .

В этом случае вторая составляющая общей тепловой проводимости контакта при начальном нагружении имеет вид

$$\frac{\lambda_c}{[H_{\text{макс.в}}(1-K) + h_{\text{макс}}(1-m)](1-\varepsilon)},$$

а при последующих нагружениях

$$\frac{\lambda_c}{H_{\text{ср.в}}(1-K) + h_{\text{ср.}}(1-m)}.$$

Наиболее достоверное значение коэффициента  $K$  получается при обработке волнограмм, снятых с исследуемой поверхности, что сопряжено с известными трудностями.

В случае приближенных расчетов можно ограничиться значениями  $K$  в пределах 0,45—0,5, что подтверждается обработкой большого количества волнограмм для поверхностей с различными параметрами  $H_n$  и  $L$  и способами обработки (табл. 3-4).

Расчет относительной площади фактического контакта из формул (3-29) и (3-30) производится следующим образом. По одному из уравнений (2-14)—(2-17) определяется контурная площадь контакта  $S_k$  для данной нагрузки  $N$ , затем по уравнению  $q_k = N/S_k$  находится контурная нагрузка. Относительные величины  $\eta_1$  и  $\eta_2$  определяются из выражений  $\eta_1 = \left(\frac{q_k}{E} B_{11}\right)^{0,8}$  при начальном нагружении,  $\eta_1 = \left(\frac{q_k}{E} B_{11}\right)^{0,8}$  при последующих нагружениях и  $\eta_2 = S_k/S_n$  для обоих случаев нагружения.

Относительное сближение определяется по приближенным формулам (3-19) —(3-21) для характерных видов механической обработки, заменяя  $p$  на  $q_k$ .

Для расчета контактных соединений с макропоровостями могут быть использованы следующие уравнения: при начальном нагружении

$$\frac{1}{R_{\text{нм}}} = 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_m \eta_1 \eta_2 + \frac{\lambda_c}{\frac{d_{\text{пкв}}}{2} + (h_{\text{макс.1}} + h_{\text{макс.2}})(1-m)}, \quad (3-31)$$

при повторных нагружениях

$$\frac{1}{R_{км}} = 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_m \gamma_1 \gamma_2 + \frac{\lambda_c}{\frac{d_{экив}}{2} + (h_{ср1} + h_{ср2}) (1 - m)}. \quad (3-32)$$

Порядок расчета относительной площади контакта поверхностей с макронеровностями проводится аналогично изложенному в § 3-2 для волнистых поверхностей. Введение величины  $d_{экив}/2$  во вторую составляющую общей тепловой проводимости вызывается следующими соображениями. В работе [Л. 80] приводятся величины допустимых отклонений формы плоских поверхностей с чистотой обработки от 3-го до 10-го класса, из которых видно, что эквивалентная неплоскость  $d_{экив}$  редко превышает величину порядка 0,3—0,7 мм/м. Отрезок образующей как для сферической, так и для цилиндрической неплоскости (см. рис. 2-12) можно в первом приближении считать прямой линией. Такое условие в первую очередь приемлемо для материалов с  $E > 18 \times 10^{10}$  н/м<sup>2</sup> и малых усилий сжатия  $p < 50 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>.

### 3-3. ТЕПЛОБМЕН ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ СТАТИЧЕСКОМ ПРИЛОЖЕНИИ НАГРУЗКИ

Рассмотренное выше влияние продолжительности контакта на формирование величины площади фактического контакта и сближение показывает, что в каждом частном случае в той или иной мере имеет место рост тепловой проводимости контакта.

Так как при длительном нагружении изменяются лишь относительная площадь контакта и сближение, то, взяв за основу выражение (3-24), можно получить формулу для определения тепловой проводимости или термического сопротивления контакта по истечении  $\tau$  и приложения нагрузки:

$$\frac{1}{R_{к\tau}} = 2,12 \cdot 10^4 \frac{\bar{\lambda}_m \gamma_{3\tau}}{\varphi} + \frac{\lambda_c}{(h_{мак1} + h_{мак2}) (1 - m) (1 - \epsilon_\tau) (1 - \gamma_{3\tau})}. \quad (3-33)$$

После подстановки значений относительной площади касания  $\gamma_{3\tau}$  и сближения  $\epsilon_\tau$  получим развернутую формулу конечной тепловой проводимости (или термического сопротивления) контакта, сформировавшегося [после выдержки под

нагрузкой:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{R_{\text{кт}}} = & 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_m b \left[ \frac{p(\nu + \omega)}{bH_m} \right]^{\frac{\nu}{\nu + \omega}} (1 - e^{-\delta \tau p}) \frac{1}{\varphi} + \\
 & + \frac{\lambda_c}{(h_{\text{сп1}} + h_{\text{сп2}})(1 - m) \left\{ 1 - \left[ \frac{p(\nu + \omega)}{bH_m} \right]^{\frac{1}{\nu + \omega}} (1 - e^{-\delta \tau p}) \right\}} \\
 & \cdot \frac{\lambda_c}{\left\{ 1 - b \left[ \frac{p(\nu + \omega)}{bH_m} \right]^{\frac{\nu}{\nu + \omega}} (1 - e^{-\delta \tau p})^\nu \right\}}. \quad (3-34)
 \end{aligned}$$

Из уравнения (3-34) видно, что в начальный период тепловая проводимость контакта растет достаточно интенсивно, затем рост ее постепенно снижается и стремится к постоянной величине.

Наибольшей способностью к росту тепловой проводимости контакта обладают материалы с малым пределом текучести и, наоборот, наименьший рост проводимости тепла в зоне контакта будет наблюдаться при высоком модуле упругости материала.

## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА ПРИ СТАЦИОНАРНОМ И НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМАХ

#### 4-1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Рассмотренные в предыдущей главе зависимости для определения термического сопротивления контакта расчетным путем получены на основе ряда допущений, справедливость которых может быть проверена лишь опытным путем. Проводимые с этой целью исследования включают определение термического сопротивления контакта в зависимости от условий сопряжения поверхностей (величины давления и стадии его приложения, наличия микронеровностей, волнистости, макроотклонений), рода материала (металлы и неметаллы), состава газа межконтактной среды или вакуума, температуры в контактной зоне, наличия окисных пленок, времени вы-

держки под нагрузкой, характера процесса при нестационарном тепловом режиме и искусственного изменения теплообмена в контактной зоне.

Один из методов опытного определения термического сопротивления контакта при стационарном тепловом режиме заключается в следующем. Тепловой поток с по-

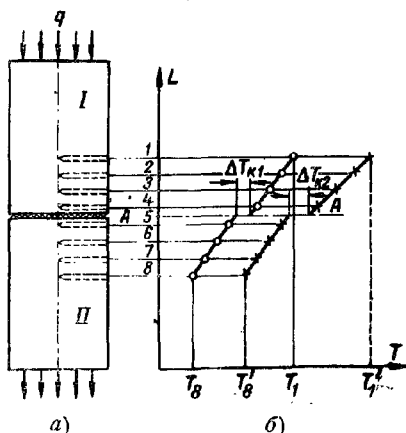


Рис. 4-1. К экспериментальному определению термического сопротивления в зоне контакта при стационарном тепловом режиме.

*a* — схема контакта двух цилиндрических образцов с термопарами при постоянном тепловом потоке; *б* — распределение температур по длине образцов, т. е.  $T=f(L)$  (цифры соответствуют номерам термопар;  $A-A$  — плоскость контакта);  $\circ$  — при  $\lambda_{M1}=\lambda_{M2}$ ;  $\times$  — при  $\lambda_{M1}<\lambda_{M2}$ .

стоянной для данного опыта плотностью пропускается через два контактирующих по торцам цилиндрических образца с адиабатическими боковыми поверхностями в аксиальном направлении (рис. 4-1, *a*). При установлении стационарного теплового режима производится замер температур в характерных точках по длине образцов. По замеренным в образцах температурам и координатам точек расположения спаев термопар строится графическая зависимость изменения температуры по их длине (рис. 4-1, *б*). Температурный перепад, имеющий место в зоне контакта и характеризующий его термическое сопротивление, определяется по полученной графической зависимости  $T=f(L)$  экстраполяцией распределения тем-

ператур в направлении теплового потока от области вне пределов возмущения к поверхности контакта. На рис. 4-1,б показано распределение температур для двух контактов — из однородного и разнородного материалов (при  $\lambda_{M1} = \lambda_{M2}$  и  $\lambda_{M1} < \lambda_{M2}$ ).

Метод определения термического сопротивления контакта при нестационарном тепловом режиме сводится

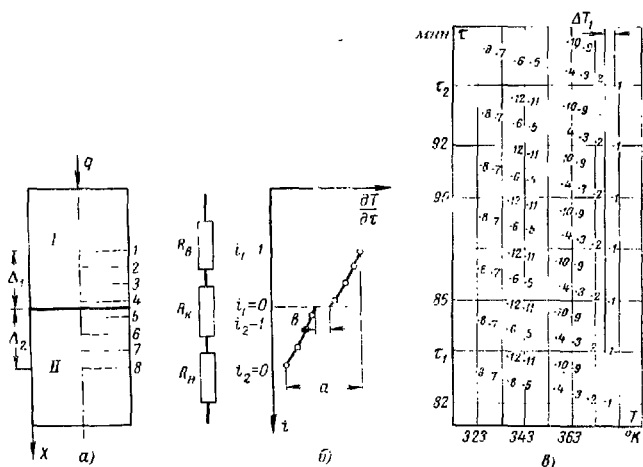


Рис. 4-2. К экспериментальному определению термического сопротивления в зоне контакта при нестационарном тепловом режиме.

*a* — схема контакта из двух цилиндрических образцов с термопарами и составляющие термического сопротивления контакта; *б* — зависимость скорости изменения температуры в контактной зоне от нагрузки  $dT/d\tau = f(t)$ , построенная по показаниям потенциометра; *в* — показания температуры 12-точечного потенциометра во времени.

к измерению скорости изменения температуры  $dT/d\tau$  в нескольких точках первого и второго образцов, а затем путем экстраполяции находится величина изменения этой скорости в контактной зоне в зависимости от нагрузки (рис. 4-2).

Более подробно о практическом воспроизведении этих методов будет сказано ниже, после ознакомления с экспериментальной установкой.

Из установок, предназначенных для опытного определения термического сопротивления контакта при стационарном и нестационарном тепловых режимах, оста-

новимся на применяемой в данной работе установке, принципиальная схема и общий вид которой приведены на рис. 4-3 и 4-4. Установка имеет ряд характерных особенностей: 1) позволяет фиксировать течение нестационарных тепловых процессов в зоне контакта твердых тел; 2) имеет повышенные точность и надежность в постановке опытов за счет значительной автоматизации большинства процессов регулировки компенсационных нагревателей; 3) предоставляет возможность проведения опытов с материалами, теплопроводность которых значительно ниже, чем у металлов.

Установка (см. рис. 4-3) в основном состоит из герметически плотной рабочей камеры 1, емкости 2 с постоянным уровнем воды (до 150 л), форвакуумного насоса РВН-2 с электромотором 9, диффузионного масляного насоса 10, баллонов с газами 12 для заполнения камеры, а также электропитательной и контрольно-измерительной аппаратуры.

Рабочая камера установки (рис. 4-5) представляет собой составной металлический цилиндр 1 и 3, заделанный наглухо с двух сторон и имеющий фланцевое соединение с прокладками из вакуумной резины. Внутри цилиндра с теплоизолированными стенками между электронагревателем 6 мощностью до 1,5 кВт и водяным холодильником 10 спирального типа помещаются два образца 7 с заделанными в каждый из них по четыре хромель-алюмелевые термопары. В целях обеспечения ми-

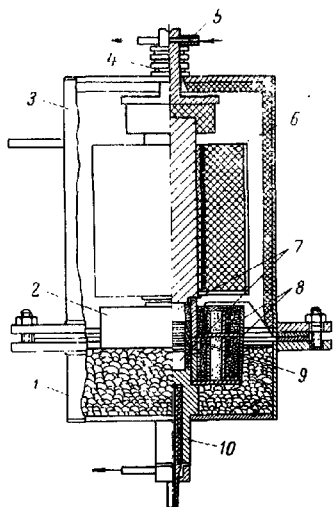


Рис. 4-5. Рабочая камера установки.

1 — нижняя часть камеры; 2 — компенсационная камера; 3 — верхняя часть камеры; 4 — сильфон; 5 — охлаждаемый шток; 6 — основной электронагреватель; 7 — исследуемые образцы; 8 — компенсационные электронагреватели; 9 — сменный боковой экран; 10 — водяной холодильник.

нимальных тепловых потерь боковой поверхностью образцов последние монтируются внутри компенсационной камеры 2 с двумя электронагревателями 3 и сменным боковым экраном 9, который представляет собой составной цилиндр из материалов, идентичных материалам образцов, и имеет на уровне контактной зоны разъем. Своими концами боковой экран прилегает к нагревателю и холодильнику, что обеспечивает аналогичность структур температурных полей образцов и бокового экрана (рис. 4-6).

Питание компенсационных электронагревателей от сети осуществляется через два контактных гальваноме-

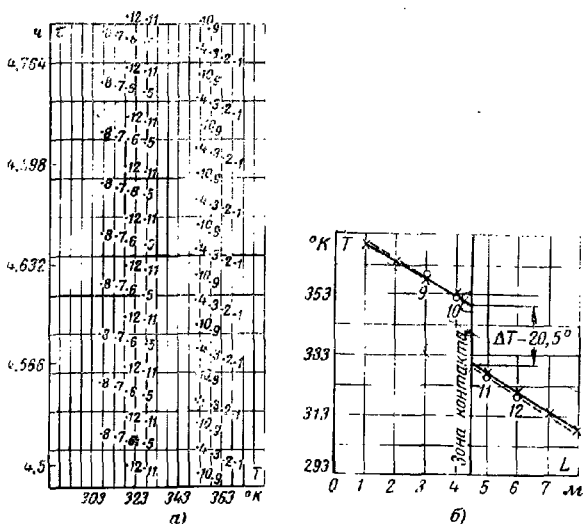


Рис. 4-6. Температурные поля образцов и бокового экрана. Материал пары сталь 45—сталь 15; чистота обработки поверхностей  $\nabla 5$ — $\nabla 5$ ;  $h_{\text{ср}} = 12,5$  мкм;  $T_{\text{н}} = 339^\circ \text{K}$ .

а — показания потенциометра в интервалы времени нагрева; б — распределение температур по длине образцов (x) и сменного экрана (o).

тра 14 (см. рис. 4-3), четыре контрольные термопары которых имеют спай у нагревателей и боковых поверхностей образцов. Все это обеспечивает минимальные тепловые потери с боковых поверхностей образцов. Визуальный контроль за работой контактных гальванометров осуществляется при помощи зеркального гальванометра



16 марки М-25, спаи дифференциальных термопар которого помещаются в местах расположения спаев термопар контактных гальванометров.

Нагрузка на исследуемые образцы производится с помощью рычажного винтового пресса, создающего стабильные нагрузки и замеряется динамометрической скобой, рассчитанной на усилие до 50 000 н. Усилие на образцы передается через шаровую опору, исключаящую возникновение изгибающего момента, и охлаждаемый шток 5 с сильфоном 4 (см. рис. 4-5), которые не допускают искажений внешней нагрузки и обеспечивают герметичность камеры в местах подвижного соединения.

Электродвижущая сила термопары измеряется по компенсационному методу потенциометром 4 типа ПМС-48 с установочным и измерительным гальванометрами 6 типа М-25 (см. рис. 4-3). Нестационарное течение теплового процесса фиксируется 12-точечным самопишущим потенциометром 3 типа ЭПП-09М-1.

Питание основного нагревателя осуществляется от сети переменного тока 220 в через стабилизатор 18 марки ИНН-1. Остаточное давление, создаваемое в рабочей камере [до  $(1:2)10^{-4}$  мм рт. ст.], замеряется термопарным вакуумметром 11 марки ВИТ-1А с манометрической лампой ЛТ-2 в роли датчика. Предварительное разрежение фиксируется самопишущим мановакуумметром 13.

Стационарный тепловой режим в большинстве случаев устанавливается через 4—5 ч после включения электронагревателя и холодильника; при этом установившимся обычно считается режим, когда три последовательных замера показаний термопар, следующие с 10-минутным интервалом, различаются не более чем на 0,08—0,1°С. Предварительное наступление стационарного теплового процесса достаточно точно фиксируется самопишущим потенциометром 3 (см. рис. 4-3).

После смены нагрузки установление стационарного режима наступает через 1—1,5 ч. Изменение величины нагрузки из-за недостаточно плотного прилегания посадочных мест образцов к нагревателю и холодильнику ведет к колебаниям в значениях теплового потока. В этом случае, помимо тщательной притирки торцовых поверхностей образцов, монолитность соединений создается в результате введения в зоны посадки образцов индий-галлиевой композиции (эвтектический сплав).

Во время опытов измерению подвергаются следующие величины: температура по длине образцов ( $T_1 - T_8$ ), сила сжатия образцов ( $p$ ), остаточное давление газа в рабочей камере.

При испытаниях используются опытные образцы двух видов. Металлические образцы с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_m > 15 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$  выполняются в виде цилиндрических блоков диаметров  $d = 30 \text{ мм}$  и длиной  $l = 58 \text{ мм}$  (рис. 4-7). Образцы же из неметаллических материалов с малой теплопроводностью [ $\lambda_m < 1 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ ] в

целях уменьшения радиальных потерь тепла изготавливаются, исходя из соотношения  $d/l \approx 10 \div 12$  (рис. 4-7). Для образцов из неметаллических материалов применяются сменные приспособления с посадочными местами под образцы и нагреватель с холодильником.

Под спай термопар в образцах первого вида в специальном кондукторе выполнены по четыре радиальных сверления диаметром 1,4–1,6 мм на глу-

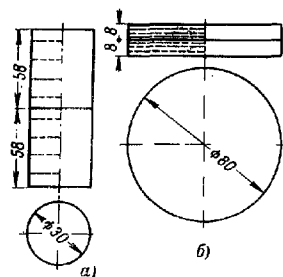


Рис. 4-7. Опытные образцы. а — металлические в виде цилиндров; б — неметаллические в виде шайб.

бину, равную величине радиуса. Расстояние между отверстиями составляет 6 мм, а от места контакта образцов 3 мм. Для неметаллических образцов нанесено по три сверления, расстояние между которыми составляет 1,5–2 мм, а от места контакта 1,5 мм.

При подготовке образцов к постановке опытов особое внимание уделяется созданию заданной геометрии поверхностей образцов (плоскостно-шероховатых поверхностей, поверхностей с регулярной и нерегулярной волнистостью, макроотклонениями типа неплоскостности).

Как показывает практика формирования заданной геометрии поверхности, получение плоскостно-шероховатых поверхностей, в первую очередь при чистовых операциях (шлифование, притирка, доводка), для ограниченных площадей (около 700 мм<sup>2</sup>) трудно выполнимо. В местах захода и выхода режущего инструмента на плоскости детали образуются завалы.

Для создания чисто плоских поверхностей применяются приспособления для обработки (рис. 4-8), изготов-

ленные из материалов, аналогичных материалам образцов. Операция обработки поверхностей состоит в следующем. Между блоками 1 и 2 в посадочные гнезда 3 устанавливаются образцы с необработанными контактными поверхностями. Крепление образцов осуществляется двумя стяжными болтами 4.

После установки приспособления с образцами на станок производится обработка всей плоскости. Режущий инструмент, как правило, в этом случае на входе и выходе с поверхности образца не создает завалов.

Не менее трудоским представляется процесс получения поверхностей с регулярной волнистостью. Попытка получения поверхностей с регулярной волнистостью выборочным путем из большого числа образцов себя не оправдывает. Решение вопроса достигается

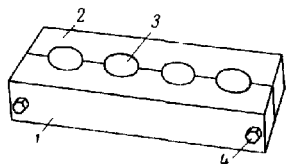


Рис. 4-8. Приспособление для получения плоско-шероховатых поверхностей образцов.

1, 2 — блоки с посадочными местами для образцов; 3 — гнезда для образцов; 4 — стяжные болты.

применением устройства для горизонтального перемещения образца. Образец, закрепленный в приспособлении для получения плоской поверхности, помещается на стол станка и с помощью второго приспособления сдвигается на величину шага волны  $L$  после каждого врезания инструмента. Так, при шлифовании даже появляется возможность заранее подсчитать высоту волны по формуле  $H_n = L^2/8R$ , где  $R$  — радиус шлифовального круга.

Для получения нерегулярной волнистости образцы обрабатывают на станках с засаленным шлифовальным кругом, неисправной гидравлической подачей.

Цилиндрическая неплоскость поверхности образца образуется при обработке ее без приспособления для получения плоских поверхностей, описанного выше. Сферическая неплоскость достигается при ручной шлифовке или притирке.

Микронеровность поверхностей образцов выявляется по профилограммам, получаемым контактным методом на профилометре-профилографе «Калибр ВЭИ» с пределами измерений  $V5 - \nabla 14$  и погрешностью показаний  $\pm 10\%$ . Средняя высота микронеровностей  $h_{ср}$  определяется в пределах базовой длины как среднее расстояние

Между пятью высшими точками выступов и пятью низшими точками впадин, измеренное от линии, параллельной средней линии, т. е.

$$h_{\text{ср}} = \frac{(h_1 + h_2 + \dots + h_5) - (h_2 + h_4 + \dots + h_{10})}{5}.$$

Шероховатость поверхности регламентируется ГОСТ 2789-59. Микронеровности поверхностей ниже V $\bar{5}$  класса измеряются на двойном микроскопе Линника.

Волнистость поверхности оценивается по волнограммам, снятым на том же профилометре-профилографе «Калибр ВЭИ» с плоской опорой на головке прибора. По верхнему пределу высоты волны ( $H_B$ ) по ГОСТ 2789-59 определяется класс волнистости.

Отклонения формы плоской поверхности, которые оцениваются неплоскостностью, замеряются на оптиметре ИКВ с ценой деления шкалы 0,001 мм и погрешностью показаний  $\pm 0,0003$  мм.

В целях избежания влияния на результаты опыта случайного наклепа образцы с микротвердостью, превышающей среднюю в 1,5 раза, выбраковываются. Микротвердость поверхности образцов определяется на приборе ПМТ-3 с приспособлением для измерений при повышенных температурах (до 700° К).

Кроме образцов, на которых исследуется влияние на тепловой контакт первоначального приложения нагрузки, образцы подвергаются предварительному обжатию по 3 раза до относительных давлений порядка  $p/E = (0,5 \div 6,5) \cdot 10^{-2}$  и выдерживаются каждый раз по 20 мин. Этим достигается при проведении опытов чисто упругая деформация неровностей.

Вернемся к порядку проведения экспериментов. По установлении стационарного теплового режима, когда тепловая защита и компенсационные обогреватели позволяют добиться линейного закона изменения температуры вдоль образцов, тепловая проводимость контакта определяется следующим выражением:

$$\alpha_{\text{к.ст}} = \frac{1}{R_{\text{к.ст}}} = \frac{q}{\Delta T_{\text{к}}} = \frac{q_{\text{в}} + q_{\text{н}}}{2\Delta T_{\text{к}}}, \quad (4-1)$$

где  $q_{\text{в}}$  и  $q_{\text{н}}$  — удельные тепловые потоки через верхний и нижний образцы;

$\Delta T_{\text{к}}$  — температурный перепад, определяемый графически методом линейной экстраполяции (см. рис. 4-1).

Тепловой поток находится из одномерного уравнения Фурье по известным теплопроводности образца и градиенту температуры:

для верхнего образца

$$q_{\text{в}} = \frac{\bar{\lambda}_{\text{в}} (T_4 - T_3)}{l_{3-4}}; \quad (4-2)$$

для нижнего образца

$$q_{\text{н}} = \frac{\bar{\lambda}_{\text{н}} (T_5 - T_6)}{l_{5-6}},$$

где  $\bar{\lambda}_{\text{в}} = \frac{2\lambda_{(T_3)}^{\text{н}} \lambda_{(T_4)}^{\text{н}}}{\lambda_{(T_3)}^{\text{в}} + \lambda_{(T_4)}^{\text{в}}}$  и  $\bar{\lambda}_{\text{н}} = \frac{2\lambda_{(T_5)}^{\text{н}} \lambda_{(T_6)}^{\text{н}}}{\lambda_{(T_5)}^{\text{н}} + \lambda_{(T_6)}^{\text{н}}}$

— приведенные коэффициенты теплопроводности материала соответственно верхнего и нижнего образцов при данной температуре.

Разность тепловых потоков для верхнего и нижнего образцов благодаря надежной тепловой защите от радиальных тепловых потерь составляет для металлов с  $\bar{\lambda}_{\text{м}} > 30$  вт/(м·град) до 2—3%, при  $\bar{\lambda}_{\text{м}} < 30$  вт/(м·град) до 5% и для неметаллических материалов с  $\bar{\lambda}_{\text{м}} < < 1$  вт/(м·град) до 10%.

Погрешность опытов не превышает в большинстве случаев 10% и лишь при малых тепловых потоках и для неметаллических материалов достигает 15%.

При нестационарном тепловом режиме в зоне контакта в данный момент времени  $\tau$  тепловая проводимость контакта  $\alpha_{\text{к.нст}}$  или обратное ей термическое сопротивление  $R_{\text{к.нст}}$  определяется следующим выражением:

$$\alpha_{\text{к.нст}} = \frac{1}{R_{\text{к.нст}}} = \frac{a - b}{b(R_{\text{в}} + R_{\text{н}})}, \quad (4-3)$$

где  $a$  — скорость подъема температуры на границах образцов (точки 1 и 8 на рис. 4-2,б), °К/мин;

$b$  — величина изменения скорости повышения температуры в контактной зоне (рис. 4-2,б), °К/мин;

$R_{\text{в}}$  и  $R_{\text{н}}$  — термические сопротивления материала соответственно верхнего и нижнего образцов в данный момент времени (при данной температуре).

По полученным значениям температур по показаниям 12-точечного потенциометра строится в относительных координатах график зависимости  $\partial T / \partial \tau = f(i)$ , где  $i$  — относительная координата (см. рис. 4-2).

Так, для 1-й точки определяется разность температур по мере нагрева образцов  $\Delta T = T_{(\tau_2)} - T_{(\tau_1)}$  и частное от деления  $\frac{\Delta T}{\tau_2 - \tau_1}$  наносится в зависимости от относительной координаты  $i$ :

$$i_1 = \frac{\Delta_1 - x}{\Delta_1}; \quad i = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 - x}{\Delta_2}.$$

За тем методом линейной экстраполяции находится величина изменения скорости повышения температуры в контактной зоне:

$$b = \frac{\partial T_{\kappa}(i, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial T_{\kappa}(0, \tau)}{\partial \tau}. \quad (4-4)$$

После этого определяется скорость повышения температуры на границах образцов (см. рис. 4-2, б). Наконец, термическое сопротивление контакта в данный момент времени находится по формуле

$$R_{\kappa, \text{ист}} = \frac{b(R_B + R_H)}{a - b}, \quad (4-5)$$

для которой  $R_B$  и  $R_H$  определяются расчетным путем из выражений

$$R_B = \frac{\Delta_1}{\bar{\lambda}_B} \quad \text{и} \quad R_H = \frac{\Delta_2}{\bar{\lambda}_H},$$

где  $\bar{\lambda}_B$  — приведенная теплопроводность верхнего образца:

$$\bar{\lambda}_B = \frac{2\lambda_{(T1)}^B \lambda_{(T4)}^B}{\lambda_{(T1)}^B + \lambda_{(T4)}^B};$$

$\Delta_1$  — расстояние между 1-й точкой замера температуры и контактной плоскостью,  $m$ ;

$\bar{\lambda}_H$  — приведенная теплопроводность нижнего образца:

$$\bar{\lambda}_H = \frac{2\lambda_{(T5)}^H \lambda_{(T8)}^H}{\lambda_{(T5)}^H + \lambda_{(T8)}^H},$$

$\Delta_2$  — расстояние между плоскостью контакта и 8-й точкой замера температуры.

Максимальная относительная погрешность эксперимента подсчитывается по выражению

$$\frac{\sigma R_k}{R_k} = \frac{2\sigma (\Delta t_k)}{\Delta t_k} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{2\sigma (\Delta t)}{\Delta t} + \frac{\sigma \lambda_m}{\lambda_m},$$

где  $R_k$  — термическое сопротивление контакта;

$\Delta t_k$  — температурный перепад в зоне контакта;

$\Delta t$  — температурный перепад между соседними термопарами;

$L$  — расстояние между соседними термопарами;

$\lambda_m$  — приведенный коэффициент теплопроводности контактирующих материалов;

$\sigma$  — абсолютная погрешность при измерении данной величины.

Значения температур определялись с помощью хромель-алюмелевых термопар, термо-э. д. с. которых измерялись потенциометром марки ПМС-48. Погрешность измерений температуры лежит в пределах  $\Delta t = \pm 0,3^\circ \text{C}$ . Расстояние между термопарами измерялось микроскопом с точностью  $\pm 0,05$  мм. Графическая экстраполяция при наличии четырех термопар на каждом образце (на расстоянии 5 мм одна от другой) вносит погрешность, равную 20% отклонения температуры за счет погрешности эксперимента, т. е.  $0,06^\circ \text{C}$ .

Коэффициент теплопроводности  $\lambda_m$  (из таблиц) имеет погрешность в пределах 2%. Отсюда имеем:  $\Delta t_k = (10 \pm 0,6)^\circ \text{C}$ ;  $\Delta t = (10 \pm 0,6)^\circ \text{C}$ ;  $L = (5 \pm 0,05)$  мм;

$$\begin{aligned} \frac{\sigma R_k}{R_k} \cdot 100 &= \frac{0,6}{10} \cdot 100 + \frac{0,6}{10} \cdot 100 + \\ &+ \frac{0,05}{5} \cdot 100 + 1,5 = \frac{0,02}{10} \cdot 100 + \frac{0,05}{5} \cdot 100 + 1,5 = 14,5\%. \end{aligned}$$

В ряде случаев при малых тепловых потоках и малых градиентах температур по длине образцов относительная погрешность доходит до  $\sigma R_k = 25\%$ .

#### 4-2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ КОНТАКТА МЕТОДОМ «ЕСТЕСТВЕННОЙ ТЕРМОПАРЫ»

Кроме определения термического сопротивления контакта, не меньший интерес вызывает непосредственно определение температуры  $T_k$  в зоне контакта.

Как известно из литературы по контактному теплообмену, приводятся лишь косвенные методы определения температуры контактной зоны, при которых определяется температура до зоны контакта и к ней прибавляется половина величины температурного перепада  $\Delta T_{\text{к}}/2$ . Невершенство этого метода не вызывает сомнений. Трудно согласиться с тем, что определяемая величина  $T_{\text{к.ср}}$  является температурой непосредственно мест контакта неровностей обеих поверхностей.

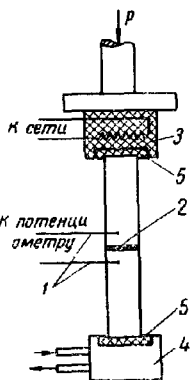


Рис. 4-9. Прибор для определения температуры в зоне контакта (метод «естественной термопары»).

1 — электроды термопар; 2 — спай «естественной термопары»; 3 — нагреватель; 4 — холодильник; 5 — изоляционные прокладки.

Ниже рассматривается метод непосредственного определения температуры в местах контакта поверхностей, который называется методом «естественной термопары». Этот метод в основном пригоден для смешанных контактных пар (медь — алюминий, сталь — медь и др.), хотя предварительное гальваническое нанесение слоя металла на одну из поверхностей однородной пары или введение прокладки в виде фольги позволяет создать искусственную разнородную пару.

Сущность метода заключается в следующем. К образцам (рис. 4-9) из разнородных металлов приваривается по одному концу проводника 1 из металла, идентичного металлу данного образца. При контакте однородной пары проводники отводятся от одного из образцов и гальванически нанесенного слоя металла или прокладки. Спаем термопары является место контакта 2 образцов. Для устранения дополнительных спаев в местах стыка образцов с нагревателем 3 и холодильником 4 последние изолированы прокладками 5. Метод требует предварительной градуировки в воздушном или жидкостном ультратермостате.

В табл. 4-1 приведены значения температур в зоне контакта, определенных методом «естественной термопары» и обычным (косвенным) методом для пар образцов из различных материалов и с различной обработкой поверхностей. Сравнение табличных данных подтверждают высказанные предположения о возможной разнице по-



казаний температуры, определенной разными методами. Наибольшие различия имеют место при контакте пар со значительными расхождениями по чистоте обработки поверхностей.

Таблица 4-1

Значения температур в зоне контакта, определенных методом «естественной термопары» и косвенным методом для различных пар (по данным автора)

| Материал пары     | Класс чистоты обработки пары | Средняя высота неровностей, мкм | Средняя температура в зоне контакта, °К |                 | Примечание                            |
|-------------------|------------------------------|---------------------------------|---|-----------------|---------------------------------------|
|                   |                              |                                 | метод «естественной термопары»          | косвенный метод |                                       |
| Д1—сталь 45       | ▽5—▽5                        | 12,5—13,2                       | 383                                     | 380,5           | Поверхность верхнего образца омеднена |
| Сталь 45—Д1       | ▽5—▽5                        | 13,2—12,5                       | 379                                     | 380,3           |                                       |
| Сталь 45—сталь 45 | ▽5—▽4                        | 13,2—22,8                       | 350                                     | 345,2           |                                       |
| М2—сталь 45       | ▽5—▽7а                       | 14,1—1,1                        | 373                                     | 378,6           |                                       |
| Сталь 45—М2       | ▽7а—▽5                       | 1,1—14,1                        | 368                                     | 363,8           |                                       |

Когда верхний образец имеет микронеровности, по высоте значительно превышающие неровности на поверхности нижнего образца ( $h_{ср1} > h_{ср2}$ ), вполне очевидно, что «естественная термопара» будет давать показания температуры плоскости касания неровностей (А—А) (рис. 4-10,а), лежащей ниже плоскости средней температуры, определяемой по косвенному методу (В—В). Так, для пары М2—сталь 45 имеем:  $T_{к(мет)} = 373^\circ \text{К}$  против  $T_{к(к.м)} = 378,6^\circ \text{К}$ .

Обратная картина наблюдается, когда меняется направление теплового потока или, что то же самое, когда образцы меняются местами (рис. 4-10,б). При одинаковой

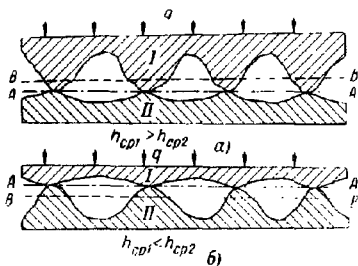


Рис. 4-10. Влияние расположения неровностей на величину температуры, определяемой методом «естественной термопары» или косвенным методом.

а — при  $h_{ср1} > h_{ср2}$ ; б — при  $h_{ср1} < h_{ср2}$

чистоте обработки контактирующих поверхностей температуры контакта, определяемые обоими способами, различаются незначительно.

Метод «естественной термопары» позволяет производить замеры температуры в контактной зоне в любой момент времени, что в комплексе с определением терми-

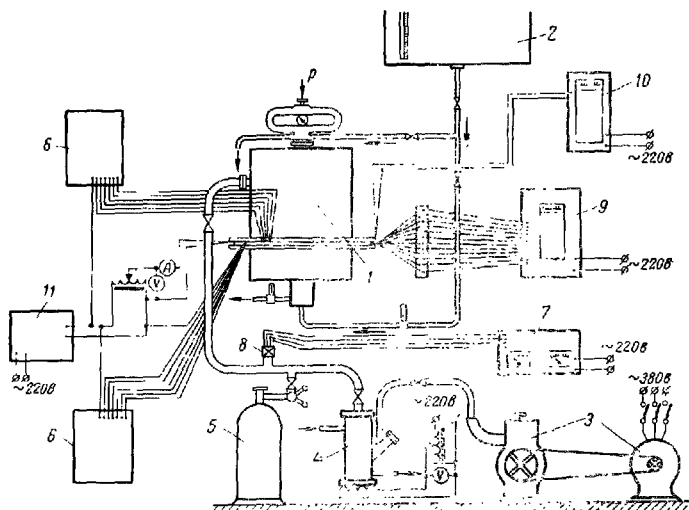


Рис. 4-11. Принципиальная схема установки по скоростному определению термического сопротивления и температуры в зоне контакта при нестационарном режиме.

1 — рабочая камера; 2 — емкость с хладагентом; 3 — форвакуумный насос с электродвигателем; 4 — диффузионный масляный насос; 5 — баллон с газом; 6 — контактные гальванометры; 7 — термопарный вакуумметр; 8 — манометрическая лампа; 9 — потенциометр (12 точечный); 10 — потенциометр (одноточечный); 11 — стабилизатор.

ческого сопротивления при нестационарном режиме позволяет считать его скоростным и универсальным. На рис. 4-11 приведена принципиальная схема установки по скоростному определению температуры и сопротивления контакта твердых тел.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

5-1. ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТА ПЛОСКОСТНО-ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ НАЧАЛЬНОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ ПРИЛОЖЕНИЯХ НАГРУЗКИ

Расчетные формулы, выведенные на основе ряда допущений, как отмечалось выше, требуют детальной проверки экспериментальным путем. Эксперименты позволяют оценить расчетные формулы путем сопоставления результатов эксперимента с данными расчета в каждом отдельном случае, а также выявить особенности физико-механических явлений в зоне контакта.

В данной главе приводятся и анализируются экспериментальные и некоторые расчетные данные по термическому сопротивлению контактов, полученные автором при исследовании контактного теплообмена.

Постановка опытов с контактами плоскостно-шероховатых поверхностей преследовала цель определения тер-

Таблица 5-1

Характеристики контактных пар с плоскостно-шероховатыми поверхностями

| № серии опытов | Материалы образцов контактных пар      | Класс обработки поверхностей                          | Максимальная высота микрошероховатостей, мкм | Примечание   |
|----------------|--|---|--|--|
| 1              | Д1Т--Д1Т<br>Д1Т--Д1Т                   | $\nabla 4$ — $\nabla 7a$<br>$\nabla 8a$ — $\nabla 9b$ | 4,6—6,8<br>5,3—1,9                           | Плоскостно-шероховатые поверхности                               |
| 2              | Д1Т—сталь 45                           | $\nabla 8a$ — $\nabla 9b$                             | 4,2—1,5                                      |  |
| 3              | Сталь 45—сталь 45<br>Сталь 45—сталь 45 | $\nabla 4$ — $\nabla 7b$<br>$\nabla 9b$ — $\nabla 9b$ | 2,8—5,9<br>1,8—1,6                           |  |
| 4              | 1X18H9T—1X18H9T                        | III<br>$\nabla 8b$ — $\nabla 9b$                      | 4—2,1  | Одна из поверхностей имеет регулярную цилиндрическую волнистость |
| 5              | Сталь 45—сталь 45                      | $\nabla 6a$ — $\nabla 6a$                             | 10,5—10,8                                    | В вакууме  |

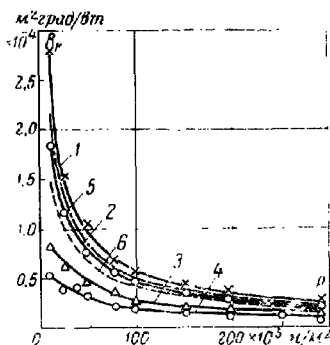


Рис. 5-1. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки для пары Д1Т—Д1Т при первоначальном (1, 3, 5) и последующем (2, 4, 6) нагружениях.

и 2— $R_{к.эксп1}$ ,  $R_{к.эксп2}$  (чистота обработки поверхностей  $\nabla 4-\nabla 7a$ ;  $T_{к}=414^{\circ}K$ ; средние удельные тепловые потоки  $q_{ср1}=102 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ;  $q_{ср2}=97,2 \times 10^3 \text{ вт/м}^2$ ); 3 и 4— $R_{к.эксп3}$ ,  $R_{к.эксп4}$  ( $\nabla 8 a-\nabla 9 b$ ;  $T_{к}=420^{\circ}K$ ;  $q_{ср3}=95,1 \times 10^3 \text{ вт/м}^2$ ;  $q_{ср4}=93,1 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ); 5 и 6— $R_{к.расч1}$ ,  $R_{к.расч2}$  (расчет для условий, соответствующих 1, 2).

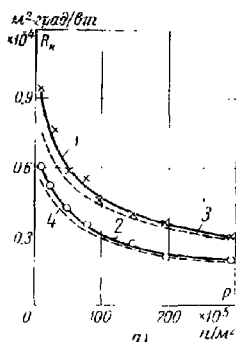
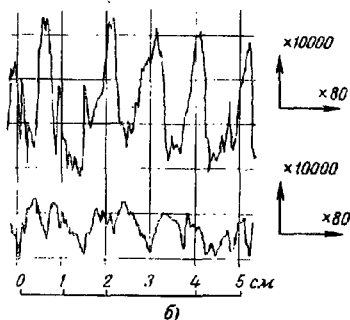


Рис. 5-2. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки для пары Д1Т—сталь 45 (а) и поперечные профилограммы поверхностей образцов (б).

1, 3—первоначальное и 2, 4—последующие нагружения; 1, 2— $R_{к.эксп1}$ ,  $R_{к.эксп2}$  (чистота обработки поверхностей  $\nabla 4-\nabla 7a$ ;  $T_{к}=414^{\circ}K$ ,  $q_{ср1}=102 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ,  $q_{ср2}=97,2 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ); 3, 4— $R_{к.расч1}$ ,  $R_{к.расч2}$  (расчет для условий, соответствующих 1, 2).

мического сопротивления контакта в зависимости от нагрузки в широком диапазоне физико-механических характеристик материалов, качества обработки поверхностей и термических условий. Для каждой из пяти проведенных серий опытов определялись термические сопротивления контакта при первоначальном и последующих нагружениях. Основные характеристики контактных пар, исследованных в этих опытах, приведены в табл. 5-1.

Результаты опытов и некоторых расчетов для контактных пар с плоскошероховатыми поверхностями в воздухе представлены в виде зависимости термического сопротивления от нагрузки  $R_{к}=f(p)$  на рис. 5-1—5-5 и в таблицах приложения II (см. табл. II-1 и II-2).



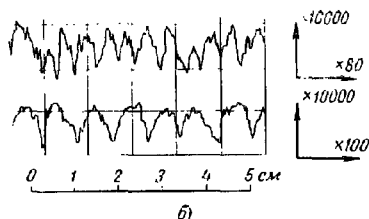
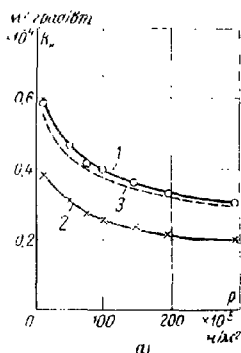


Рис. 5-3. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки для пары сталь 45—сталь 45 (а) и поперечные профилограммы поверхностей образцов (б).

1, 3 — первоначальное и 2 — последующее нагружения; 1, 2 —  $R_{к,эксп1}$ ;  $R_{к,эксп2}$  (чистота обработок поверхностей  $\nabla 9в$ — $\nabla 9в$ ;  $T_k = 418^\circ K$ ;  $q_{ср1} = 83,1 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ;  $q_{ср2} = 77 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ );  $R_{к,расч}$  (расчет для условий, соответствующих 1).

Сравнительный анализ характера кривых для случаев первоначального и последующих нагружений даст возможность выявить для каждого вида контакта ряд специфических особенностей течения теплового процесса в контактной зоне.

1. Повторные приложения нагрузки на начальной стадии нагружения значительно снижают термические сопротивления контактов, сформировавшиеся в момент начального нагружения для идентичных значений усилия сжатия.

В табл. 5-2 приводятся величины снижения термических сопротивлений контактов при повторных нагружениях по сравнению с первоначальными.

2. Зависимость термического сопротивления контакта

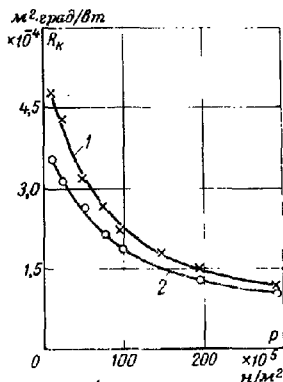


Рис. 5-4. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки для пары сталь 45—сталь 45 при первоначальном (1) и последующем (2) нагружениях.

1, 2 —  $R_{к,эксп1}$ ;  $R_{к,эксп2}$  (чистота обработок поверхностей  $\nabla 4$ — $\nabla 7б$ ;  $T_k = 420^\circ K$ ;  $q_{ср1} = 86,2 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ;  $q_{ср2} = 84,1 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ).

от нагрузки при первоначальном нагружении по сравнению с последующими в диапазоне малых давлений  $p = (10 \div 50) \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  имеет общую тенденцию к более интенсивной скорости вырождения (табл. 5-3).

3. Наличие волнистости на одной из контактирующих поверхностей не изменяет теплообмена в зоне контакта при первоначальном и последующих нагружениях, который

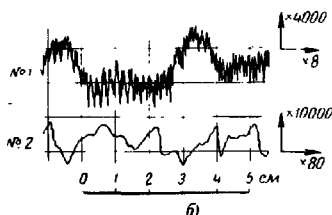
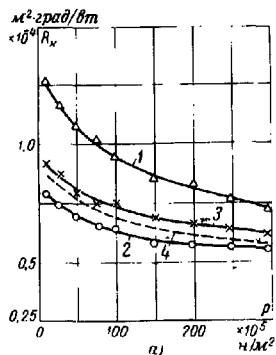


Рис. 5-5. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки для пары из стали 1X18H9T (а) и поперечные профилограммы поверхностей образцов (б).

1 — при наличии волнистости; 2 — при отсутствии волнистости для случая первоначального нагружения; 3 — при наличии волнистости для последующего нагружения ( $T_{\text{ж}} = 445^\circ\text{К}$ ); 1 —  $R_{\text{к.экв}1}$  (интенсивность обработки поверхностей  $\frac{\text{III}}{\sqrt{86}} \nabla 9$  б;  $q_{\text{ср}1} = 60,9 \times 10^5 \text{ вт/м}^2$ ); 2 —  $R_{\text{к.экв}2}$  ( $\nabla 7 \text{ в} \cdot \sqrt{86}$ ;  $q_{\text{ср}2} = 97,2 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2$ ); 3 —  $R_{\text{к.экв}3}$  ( $\frac{\text{III}}{\sqrt{86}} \nabla 9$  б;  $q_{\text{ср}3} = 59,9 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2$ ); 4 —  $R_{\text{к.расч}4}$  (расчет для условий, соответствующих 3).

Таблица 5-2

Снижение величины термического сопротивления контакта при повторных нагружениях по сравнению с первоначальным

| № серии опытов | Материалы образцов  | Класс обработки                                     | Усилие сжатия $p \cdot 10^{-5}$ , н/м <sup>2</sup> | Снижение термического сопротивления контакта, % |
|----------------|---------------------|---|--|---|
| 1              | Д1Т—Д1Т             | $\nabla 4 - \nabla 7 \text{ а}$                     | 10   | 35  |
|                | Д1Т—Д1Т             | $\nabla 8 \text{ а} - \nabla 9 \text{ б}$           | 10   | 38  |
| 2              | Д1Т — сталь 45      | $\nabla 8 \text{ а} - \nabla 9 \text{ в}$           | 10   | 33,5  |
|                | Сталь 45 — сталь 45 | $\nabla 4 - \nabla 7 \text{ б}$                     | 10   | 26  |
| 3              | Сталь 45 — сталь 45 | $\nabla 9 \text{ в} - \nabla 9 \text{ в}$           | 10   | 33,6  |
|                | 1X18H9T — 1X18H9T   | $\frac{\text{III}}{\sqrt{86}} - \nabla 9 \text{ б}$ | 10   | 27,3  |

практически соответствует теплообмену при контакте с плоскостно-шероховатыми поверхностями (рис. 5-5).

4. Как по характеру зависимостей  $R_k = f(p)$ , так и по абсолютной величине термического сопротивления кон-

Таблица 5-3

**Скорость вырождения термического сопротивления контакта на основании сравнения зависимостей  $R_k = f(p)$  при начальном и последующем нагружениях**

| № серии опытов | Материалы образцов  | Класс обработки  | Диапазон усилий сжатия $p \cdot 10^{-3}$ , кг/мм <sup>2</sup> | Скорость вырождения термического сопротивления контакта, % |                        |
|----------------|---------------------|------------------|---|--|------------------------|
|                |                     |                  |   | первоначальное нагружение                                  | последующее нагружение |
| 1              | Д1Т — Д1Т           | ▽4—▽7а           | 10—50   | 65   | 57                     |
|                | Д1Т — Д1Т           | ▽8а—▽9б          | 10—50   | 42,5   | 40                     |
| 2              | Д1Т — сталь 45      | ▽8а—▽9в          | 10—50   | 33,5   | 30,8                   |
| 3              | Сталь 45 — сталь 45 | ▽4—▽7б           | 10—50   | 33   | 26                     |
|                | Сталь 45 — сталь 45 | ▽9в—▽9в          | 10—50   | 21   | 19,5                   |
| 4              | 1X18H9T — 1X18H9T   | III<br>▽8б — ▽9б | 10—50   | 15   | 9                      |

такта расчетные значения для случаев первоначального и последующих нагружений достаточно удовлетворительно согласуются с опытными данными.

Определенный интерес вызывает вопрос физической сущности теплообмена в зоне контакта при первоначальном нагружении. В этом отношении заслуживает внимания график на рис. 5-6, где приводятся экспериментально-теоретические данные термического сопротивления фактического контакта  $R_m$  (в вакууме порядка  $2 \times 10^{-2}$  мм рт. ст.), а также результаты расчета сопротивления межконтактной среды  $R_c$  в зависимости от нагрузки для пары из стали 45 при начальном и последующих нагружениях. Характер расположения кривых говорит о том, что при первоначальном нагружении изменение общего термического сопротивления  $R_k$  в зависимости от нагрузки обусловлено формированием в основном сопротивления фактического контакта  $R_m$ . В то же время заметное влияние, особенно для малотеплопроводных материалов, оказывает и вторая составляющая общего термического сопротивления, т. е. сопротивление межконтактной среды  $R_c$ .

Природу процесса теплового контакта при первоначальном нагружении следует искать в особенностях деформирования неровностей поверхностей. Так, величины скорости роста фактической площади контакта при первоначальном и последующих нагружениях, приведенные в табл. 5-4 и полученные путем обработки кривых на рис. 2-9, по своему значению аналогичны величинам скорости вырождения зависимости термического сопротивления контакта от нагрузки, приведенным в табл. 5-3.

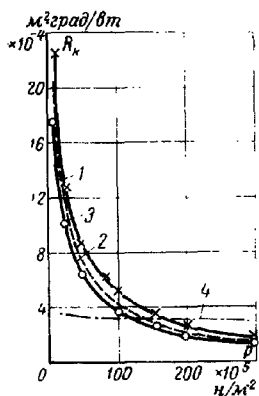


Рис. 5-6. Зависимость термического сопротивления фактического контакта от нагрузки для пары сталь 45—сталь 45 при первоначальном (1) и последующих (2) нагружениях (межконтактная среда — вакуум).

1, 2 —  $R_{м.эксп}$ ,  $R_{м.эксп2}$  (чистота обработки поверхностей  $\nabla 6a$ — $\nabla 6a$ ;  $T_{к} = -371^{\circ}K$ ); 3 —  $R_{м.расч1}$  (расчет для условий, соответствующих 1); 4 —  $R_{с.расч1}$  — расчетное термическое сопротивление среды по формуле (3-16).

волнистости выше III класса и макроотклонений для усилий сжатия до  $p = 50 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ .

Приведенные особенности первоначального нагружения контакта позволяют сделать практически ценные рекомендации. Так, например, при конструировании и эксплуатации тепловых разъемных соединений, которые лишь однажды испытывают нагрузку, необходимо учитывать, кроме основного, и дополнительное сопротивление. Это в первую очередь относится к соединениям с поверхностями ниже 7-го класса чистоты при наличии

Таблица 5-4

Изменение площади контакта в зависимости от нагрузки

| Материал | Класс обработки | Диапазон усилий сжатия $p \cdot 10^{-5}, \text{ н/м}^2$ | Скорость роста фактической площади контакта, % |                        |
|----------|-----------------|---|--|------------------------|
|          |                 |   | первоначальное нагружение                      | последующие нагружения |
| Алюминий | $\nabla 4$      | 25—50   | 43   | 34                     |



## 5-2. ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТА ПОВЕРХНОСТЕЙ С ВОЛНИСТОСТЬЮ И МАКРОНЕРОВНОСТЯМИ

Механический контакт поверхностей с волнистостью и макронеровностями по сравнению с контактом плоско-шероховатых поверхностей имеет ряд особенностей, которые вносят свои коррективы в контактный теплообмен, а следовательно, и характер формирования термического сопротивления.

Опытная программа исследования теплового обмена при контактировании поверхностей, имеющих волнистость, включала пять серий опытов с образцами, характеристики которых приводятся в табл. 5-5.

Таблица 5-5

Характеристики опытных образцов контактных пар  
с волнистыми и плоскими поверхностями

| Серия опытов | Материалы образцов    | Класс обработки                      | Средняя высота волн и макронеровностей, мкм | Примечание   |
|--------------|-----------------------|--------------------------------------|---|--|
| 1            | 1X181H9T—<br>1X181H9T | V<br>$\nabla_{86}$ — $\nabla_{9в}$   | $\frac{14}{2,2}$ —1,04                      | Одна из поверхностей имеет регулярную сферическую волнистость    |
|              | 1X18H9T—<br>1X18H9T   | $\nabla_{5}$ — $\nabla_{9в}$         | 13,5—0,9                                    | Плоскостно-шероховатые поверхности                               |
| 2            | 1X181H9T—<br>1X18H9T  | III<br>$\nabla_{86}$ — $\nabla_{96}$ | $\frac{3,2}{2,4}$ —1,2                      | Одна из поверхностей имеет регулярную цилиндрическую волнистость |
|              | 1X18H9T—<br>1X18H9T   | $\nabla_{7в}$ — $\nabla_{96}$        | 3,4—1,04                                    | Плоскостно-шероховатые поверхности                               |
| 3            | D16T—сталь<br>45      | VII<br>$\nabla_{66}$ — $\nabla_{66}$ | $\frac{46}{7,9}$ —6,1                       | Одна из поверхностей имеет регулярную цилиндрическую волнистость |
|              | D16T—сталь<br>45      | $\nabla_{3}$ — $\nabla_{66}$         | 44,6—6,1                                    | Плоскостно-шероховатые поверхности                               |
| 4            | D1—сталь<br>45        | V<br>$\nabla_{7а}$ — $\nabla_{8в}$   | $\frac{12}{6}$ —1,9                         | Одна из поверхностей имеет нерегулярную сферическую волнистость  |
| 5            | 1X18H9T—<br>1X18H9T   | V<br>$\nabla_{86}$ — $\nabla_{9в}$   | $\frac{14}{2,2}$ —1,04                      | В вакууме  |

На графиках (рис. 5-7 и 5-8) приведены данные опытов и некоторых расчетов в виде зависимостей  $R_{\text{к}} = \hat{f}(p)$  в воздухе для контактных пар, имеющих плоско-шероховатую и волнистую поверхности или плоско-шероховатые поверхности, в одной из которых высота выступов неровностей равна высоте волн.

Анализ полученных результатов показывает, что наличие волн хотя бы на одной из двух вступающих в те-

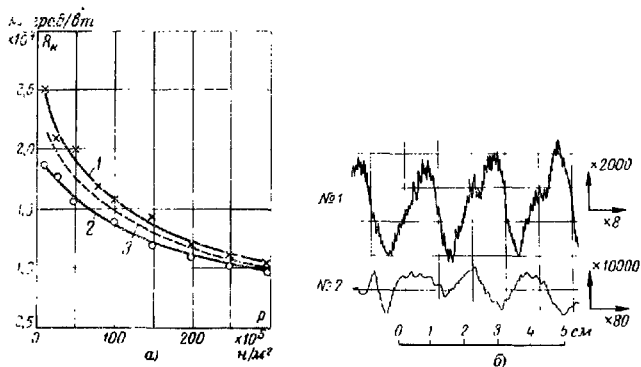


Рис. 5-7. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки для пары из стали 1X18I9T (а) и поперечные профилограммы поверхностей образцов (б).

1 — при наличии и 2 при отсутствии волнистости; 1 —  $R_{\text{к.эксп1}}$  (чистота обработки поверхностей  $\frac{V}{\sqrt{80}} = \sqrt{0.9}$ ;  $T_{\text{ж}} = 443^\circ \text{К}$ ;  $q_{\text{ср2}} = 69,8 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2$ ); 2 —  $R_{\text{к.эксп2}}$  ( $\sqrt{5} = \sqrt{0.9}$ ;  $T_{\text{ж}} = 443^\circ \text{К}$ ;  $q_{\text{ср2}} = 66,8 \cdot 10^5 \text{ вт/м}^2$ ); 3 —  $R_{\text{к.расч1}}$  (расчет для условий, соответствующих 1).

пловой контакт поверхностей повышает термическое сопротивление контакта по сравнению с плоско-шероховатыми поверхностями. При этом наиболее интенсивный рост сопротивления  $R_{\text{к}}$  имеет место в диапазоне начальных значений нагрузки (до  $50 \cdot 10^5 \text{ н/мм}^2$ ). Кроме того, определенное влияние на формирование сопротивления  $R_{\text{к}}$  оказывают параметры волнистости и в первую очередь высота волны  $H_{\text{в}}$ . Действительно, как видно из графиков на рис. 5-5 и 5-7, при одинаковых термических условиях и почти одинаковых классах чистоты обработки поверхностей контактная пара из стали марки 1X18I9T с параметрами волнистости: шагом  $L_{\text{в}} = 25 \times 10^{-4} \text{ м}$  и высотой  $H_{\text{в}} = 0,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}$  имеет термическое

сопротивление на целый порядок выше, чем пара из этой же стали с волнистой поверхностью, у которой  $L_n = 50 \times 10^{-4}$  м и  $H_n = 0,032 \cdot 10^{-1}$  м.

Результаты опытов в вакууме (рис. 5-9) подтверждают, что формирование термического сопротивления кон-

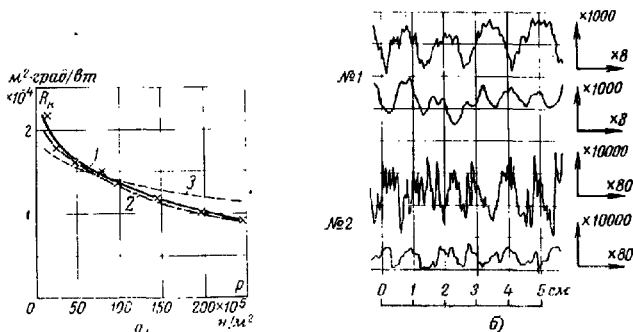


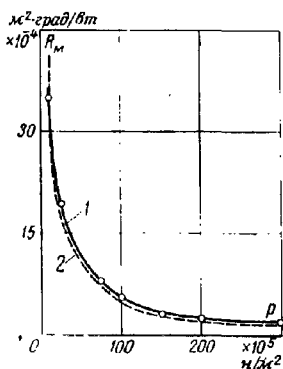
Рис. 5-8. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки для пары Д1 — сталь 45 при наличии нерегулярной волнистости (а) и профилограммы (поперечные и продольные) поверхностей образцов (б).

1 —  $R_{k,эксп}$  (чистота обработки поверхностей  $\frac{V}{\sqrt{7a}} = \nabla 8в; T_k = 423^\circ K; q_{ср1} = 90,9 \cdot 10^6 \text{ вт}/м^2$ ); 2 —  $R_{k,рвч1}$  (расчет для условий, когда фактическая площадь контакта определялась опытным путем); 3 —  $R_{k,рвч1}$  [расчет для условий, когда фактическая площадь контакта определялась по формуле (2-15)].

такта определяется изменением фактической площади контакта в зависимости от давления.

Выше отмечалось, что в реальных условиях разъемные соединения довольно часто имеют поверхности с ярко выраженной нерегулярной волнистостью. На графике (рис. 5-8) представлены данные опыта, когда контурная площадь контакта  $S_k$  определяется опытным путем (на краску), и данные расчета, когда расчет  $S_k$  ведется по формуле (2-15). Кривые, построенные по опытным данным и результатам расчетов по формуле (3-30), находятся в достаточно удовлетворительном согласовании, что подтверждает возможность приближенного расчета контурной площади  $S_k$  для поверхностей с нерегулярной волнистостью при незначительных отклонениях волн по высоте [Л. 67].

Большой практический интерес представляет рекомендация о целесообразности при тепловом контакте волнистых поверхностей до III класса включительно считать в первом приближении сопротивление незначительно



превышающим сопротивление контакта плоско-шероховатых поверхностей с микронеровностями, по высоте равными высоте волн. Такое допущение вполне оправдано, так как значение термического сопротивления контакта при часто встречающихся в производственных установках тепловых потоках  $q = (10 \div 60) \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$  не превышает  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \times \text{град/вт}$ .

Опытная программа исследования теплообмена при контактировании поверхностей с макронеровностями преследовала цель выявления особенностей такого рода контакта. В табл. 5-6 приводятся основные характеристики опытных образцов.

Исследованиям подвергались контактные пары из одинаковых металлов, поверхности которых в одном опыте

Рис. 5-9. Зависимость термического сопротивления фактического контакта от нагрузки для пары из стали 1Х18Н9Т при наличии волнистой поверхности (межконтактная среда—вакуум).

1— $R_{\text{м.эксп}}$  (чистота обработки поверхностей)  $\frac{V}{\nabla 96} - \nabla 9$  в;  $T_{\text{ж}} = 440^\circ \text{ К}$ ; 2— $R_{\text{м.расч}}$  (расчет для условий, соответствующих 1).

имели макроотклонения, а в другом — микронеровности, расположенные на плоскости и по высоте равные величине эквивалентной неплоскостности  $d_{\text{экив}}$  (см. рис. 2-12). Такого рода сравнения позволяют судить о влиянии макроотклонений контактирующих поверхностей на теплообмен в зоне контакта.

Результаты основных опытов и некоторых теоретических расчетов для контактных пар с плоско-шероховатыми поверхностями и поверхностями с макроотклонениями в воздухе представлены на рис. 5-10 и 5-11 в виде зависимости  $R_{\text{к}} = f(\rho)$  и данных табл. II-4 (см. приложение II). Анализ этих результатов позволяет установить ряд особенностей теплового контакта с макронеровностями.

### Характеристики опытных образцов контактных пар с макронеровностями и плоскими поверхностями

| № серия<br>опытов | Материалы<br>образцов  | Класс<br>обработки | Средняя<br>высота<br>макроне-<br>ровностей,<br>мкм | $\frac{d_{экив} \cdot 10^3}{b}$ | Примечание  |
|-------------------|------------------------|--------------------|--|---------------------------------|---|
| 1                 | Сталь 45—<br>сталь 45  | ▽8б—▽9а            | 2,1—1,4  | 70                              | Одна из поверхностей имеет сферическую выпуклость                         |
|                   | Сталь 45—<br>сталь 45  | ▽8а—▽9а            | 2,9—1,5  | —                               | Плоскостно-шероховатые поверхности  |
| 2                 | Сталь 45—<br>сталь 45  | ▽8а—▽8в            | 2—1,8  | 140                             | Одна из поверхностей имеет сферическую выпуклость                         |
| 3                 | Д16 — Д16<br>Д16 — Д16 | ▽7а—▽7а<br>"       | 5,8—6<br>6,1—5,7                                   | 180                             | Плоскостно-шероховатые поверхности  |
| 4                 | Д16 — Д16              | ▽7в—▽7б            | 3,8—4,6  | 347                             | Обе поверхности имеют цилиндрическую выпуклость (контакт вдоль цилиндров) |

1. Наличие неплоскостности повышает термическое сопротивление контакта по сравнению с плоскостно-шероховатыми поверхностями. Экспериментальные точки крайне чувствительны к величине всей эквивалентной неплоскостности  $d_{экив}$ .

2. Контактные пары с неплоскостностью в диапазоне малых усилий сжатия (до  $50 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ) имеют повышенные значения термического сопротивления по сравнению с плоскостно-шероховатыми поверхностями.

3. Зависимость  $R_{тк} = f(p)$  для контактных пар из металлов с пониженным модулем упругости ( $E < 10 \times 10^{10} \text{ н/м}^2$ ) имеет тенденцию к интенсивному вырождению при усилиях сжатия  $p > 50 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  аналогично плоскостно-шероховатым поверхностям. Вследствие резкого уменьшения величины  $d_{экив}$  и роста площадей  $S_{к}$  и  $S_{ф}$ , даже при значительной неплоскостности в первом приближении есть основание вести тепловой расчет, как для плоских поверхностей.

4. Термическое сопротивление контакта поверхностей со сферической выпуклостью заметно превышает величину сопротивления контакта поверхностей с цилиндрической выпуклостью, когда  $d_{\text{экв.с.ф}} = d_{\text{э.в.ц}}$ .

5. Кривые, построенные на основе расчетной зависимости (3-32), находятся в достаточно удовлетворительном согласовании с экспериментальными данными.

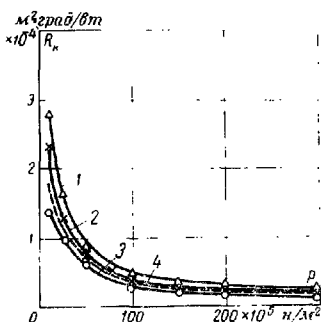
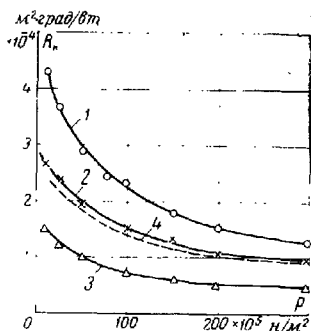


Рис. 5-10. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки для пары сталь 45—сталь 45 при наличии выпуклости (Т<sub>к</sub> = 376° К).

1— $R_{\text{к.эксп1}}$  (чистота обработки поверхностей  $\nabla 8 \text{ а} - \nabla 8 \text{ в}$ ;  $\frac{d_{\text{экв}}}{b} \cdot 10^5 = 140$ ;  $q_{\text{ср1}} = 68 \cdot 10^3 \text{ ат/м}^2$ ); 2— $R_{\text{к.эксп2}}$  ( $\nabla 8 \text{ б} - \nabla 9 \text{ а}$ ;  $\frac{d_{\text{экв}}}{b} \cdot 10^5 = 70$ ;  $q_{\text{ср2}} = 77,3 \cdot 10^3 \text{ ат/м}^2$ ); 3— $R_{\text{к.эксп3}}$  ( $\nabla 8 \text{ а} - \nabla 9 \text{ а}$ ;  $q_{\text{ср3}} = 63,1 \cdot 10^3 \text{ ат/м}^2$ ); 4— $R_{\text{к.расч2}}$  (расчет для условий, соответствующих 2).

Рис. 5-11. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки для пары Д16—Д16 при наличии выпуклости (Т<sub>к</sub> = 373° К).

1— $R_{\text{к.эксп1}}$  (чистота обработки поверхностей  $\nabla 7 \text{ в} - \nabla 7 \text{ б}$ ;  $\frac{d_{\text{экв}}}{b} \cdot 10^5 = 347$ ;  $q_{\text{ср1}} = 136 \cdot 10^3 \text{ ат/м}^2$ ); 2— $R_{\text{к.эксп2}}$  ( $\nabla 7 \text{ а} - \nabla 7 \text{ а}$ ;  $\frac{d_{\text{экв}}}{b} \cdot 10^5 = 180$ ;  $q_{\text{ср2}} = 128,1 \cdot 10^3 \text{ ат/м}^2$ ); 3— $R_{\text{к.эксп3}}$  ( $\nabla 7 \text{ а} - \nabla 7 \text{ а}$ ;  $q_{\text{ср3}} = 115 \cdot 10^3 \text{ ат/м}^2$ ); 4— $R_{\text{к.расч2}}$  (расчет для условий, соответствующих 2).

Так как в реальных разъемных соединениях и в первую очередь для значительных номинальных поверхностей наличие макрошерошкостей, как правило, неизбежно, то учет добавочного сопротивления необходим, особенно при малых усилиях сжатия (до  $50 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ).

### 5-3. ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫДЕРЖКИ ПОД НАГРУЗКОЙ И ОКИСНЫХ ПЛЕНОК НА ТЕПЛОБМЕН В ЗОНЕ КОНТАКТА

В гл. 2 отмечено, что при значительной по времени выдержке поверхностей под нагрузкой увеличивается площадь контакта и растет сближение. Все это несомненно ведет к увеличению тепловой проводимости контакта с ростом времени  $\tau$  приложения нагрузки. Это подтверждается результатами опытов, проведенных по программе, включающей пять серий опытов (табл. 5-7).

Таблица 5-7

Характеристики опытных образцов контактных пар и условий длительного контакта

| № серии опытов | Материалы образцов | Класс обработки | Средняя высота микронеровностей, мкм | Температура в зоне контакта, °К | Примечание   |
|----------------|--------------------|-----------------|--------------------------------------|---------------------------------|--|
| 1              | M2—сталь 45        | ▽8a- ▽3         | 2,3—69                               | 468                             | Поверхности плоско-шероховатые (с заметной окисной пленкой после эксперимента) |
| 2              | 2X13—2X13          | ▽4—▽7a          | 28—5,2                               | 470                             | Поверхности плоско-шероховатые   |
| 3              | 2X13—2X13          | ▽7a—▽96         | 5,2—1,1                              | 470                             |  |
| 4              | ФК-16Л—сталь 45    | ▽9a—▽5          | 1,5—11,6                             | 343                             | В вакууме  |
|                | ФК-16Л—сталь 45    | ▽9a—▽5          | 1,5—11,6                             | 403                             |  |
| 5              | 2X13—2X13          | ▽4—▽7a          | 28—5,2                               | 473                             |  |

Характер опытных зависимостей  $R_{\text{н}}=f(\tau)$  на графиках (рис. 5-12—5-15) и опытные данные табл. II-5 и II-6 (см. приложение II) позволяют сделать следующие выводы:

1. Наибольшее уменьшение термического сопротивления при длительной выдержке под нагрузкой наблюда-

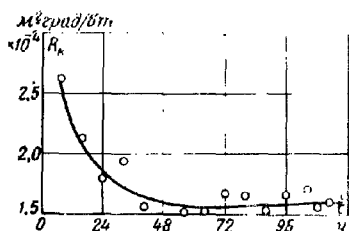


Рис. 5-12. Зависимость термического сопротивления контакта от времени приложения нагрузки (без предварительного обжата). Материалы пары М2—сталь, 45; нагрузка  $98 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>; чистота обработки поверхностей  $\nabla 8a - \nabla 3$ ;  $T_K = 468^\circ \text{K}$ .

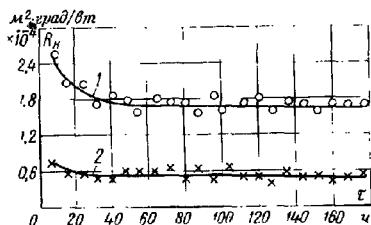


Рис. 5-13. Зависимость термического сопротивления контакта от времени приложения нагрузки для пары 2X13—2X13 (нагрузка  $98 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>;  $T_K = 470^\circ \text{K}$ ).

1—чистота обработки поверхностей  $\nabla 4 - \nabla 7a$ ; 2— $\nabla 7a - \nabla 9b$ .

ется у материалов с пониженным модулем упругости  $E < (10 \div 12) \times 10^{10}$  н/м<sup>2</sup>.

2. Термическое сопротивление контактных пар из материалов с  $E > 18 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup> на начальной стадии выдержки времени под нагрузкой (до  $\tau = 40$  ч) несколько снижается (на 15—20%), оставаясь в дальнейшем практически постоянным.

3. Повышение класса чистоты обработки поверхностей по существу ведет к вырождению зависимости  $R_K = f(\tau)$ .

4. При длительном тепловом контакте медных образцов визуально наблюдается появление окисной пленки, создающей дополнительное сопротивление (подъем второй половины кривой на рис. 5-12).

5. Как по характеру зависимостей  $R_K = f(\tau)$ , так и по абсолютной величине сопротивления  $R_K$ , расчетные значения по

формуле (3-34) находятся в удовлетворительном согласовании с опытными данными.

Для материалов с малым модулем упругости учет влияния их реологических свойств на сопротивление необходим, в то время как для материалов с  $E > 18 \times 10^{10}$  н/м<sup>2</sup> и поверхностей выше 6—7-го класса чистоты обработки изменением сопротивления  $R_K$  от времени  $\tau$  можно пренебречь.

Ограниченный объем сведений по вопросам роста толщины пленок, формирования их твердости, геометрии поверхностей после окисления затрудняет на данном эта-



не произвести теоретическую оценку влияния окисных пленок на термическое сопротивление контакта.

При постановке опытов по влиянию окисных пленок на теплообмен в зоне контакта особое внимание уделяется подготовке образцов контактных пар к эксперименту. На контактных поверхностях предварительно выращива-

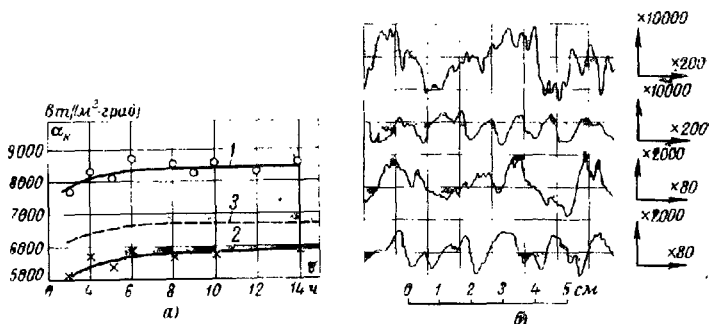


Рис. 5-14. Зависимость тепловой проводимости контакта от времени приложения нагрузки при различных термических условиях для пары с неметаллическим материалом (а) и продольные и поперечные профилограммы ее поверхностей (б). Материалы пары ФК16Л — сталь 45; нагрузка  $19,6 \cdot 10^5 \text{ н}/\text{м}^2$ .

1, 2 — для  $\alpha_{\text{к.оксид}}$ ,  $\alpha_{\text{к.оксид}}$  соответственно при  $T_{\text{к1}}=403^\circ \text{ К}$  и  $T_{\text{к2}}=343^\circ \text{ К}$ ; 3 — для  $\alpha_{\text{к.расч}}$  (расчет при условиях, соответствующих 2).

ются окисные пленки при повышенных температурах и значительной выдержке времени. Основные данные опытных образцов приводятся в табл. 5-8.

Таблица 5-8

### Характеристики опытных образцов контактных пар с окисными пленками

| № серии опытов | Материалы образцов | Температура нагрева образцов, °К | Время нагрева, ч | Толщина окисной пленки, А | Цвет побежалости |
|----------------|--------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
| 1              | M2—M2              | 493                              | 72               | 640                       | Синий            |
| 2              | M2—M2              | 510                              | 97               | 1 200                     | Оранжевый        |
| 3              | D16T—D16T          | 523                              | 92               | 510                       | —                |
| 4              | D16T—D16T          | 568                              | 112              | 1 050                     | —                |

Для определения толщины окисных пленок применяется гравиметрический метод с одновременным контролем по цветам побужалости, сущность которого заключается в следующем. Если за определенный промежуток времени окисление приводит к увеличению массы на  $G$  (г) у образца с номинальной площадью  $S_n$  (см<sup>2</sup>), то толщина окисной пленки равна

$$\frac{G}{S_n D} \cdot \frac{M}{(M-m)}, \text{ см,}$$

а толщина окисленного металла равна

$$\frac{G}{S_n d} \cdot \frac{m}{(M-m)}, \text{ см,}$$

где  $D$  и  $d$  — соответственно плотности окисла и металла;  $M$  — молекулярный вес окисла;  $m$  — масса металла в  $M$  окисле (например,  $m$  — атомный вес меди в  $\text{CuO}$  и удвоенный атомный вес меди в  $\text{Cu}_2\text{O}_3$ ).

Экспериментальная программа исследований включает постановку опытов по определению термического сопротивления  $R_k$  для контакта чистых поверхностей и поверхностей с окисной пленкой различной толщины (табл. 5-8) и их сравнение.

Результаты опытов представлены в виде зависимости  $R_k = f(p)$  на графиках

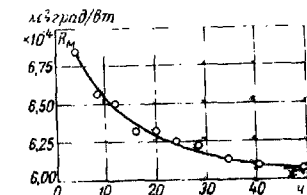


Рис. 5-15. Зависимость термического сопротивления фактического контакта от времени приложения нагрузки (межконтактная среда — вакуум). Материал пары 2Х13—2Х13; нагрузка  $98 \cdot 10^6$  н/м<sup>2</sup>; чистота обработки поверхностей  $\nabla 4$ — $\nabla 7$ ;  $T_k = 473^\circ \text{К}$ .

(рис. 5-16 и 5-17) и в табл. II-7 (см. приложение II). Как показывают результаты опытов, наличие окисных пленок увеличивает термическое сопротивление соединений. При этом повышение сопротивления  $R_k$  определяется ростом толщины окисной пленки. Так, для медных образцов при толщине пленки  $\delta = 640 \text{ \AA}$  на начальной стадии нагружения сопротивление  $R_k$  возрастает в 2 раза по сравнению с контактом чистых поверхностей. Дальнейшее нагружение хотя и незначительно снижает сопротивление  $R_k$  контактных пар с окисными поверхностями

стями, но в конечном результате термическое сопротивление в 5—8 раз больше, чем у контактных пар с чистыми поверхностями. Увеличение толщины окисной пленки до  $\delta = 1200 \text{ \AA}$ , т. е. почти в 2 раза, ведет к дальнейшему

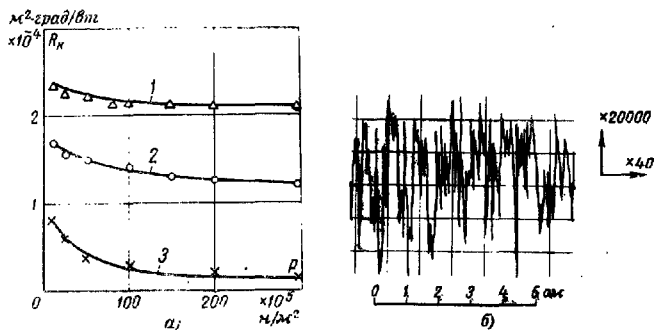


Рис. 5-16. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки при наличии и отсутствии на поверхностях его окисных пленок (а) и поперечная профилограмма, одинаковая для обеих поверхностей (б).

Материал пары М2—М2, чистота обработки поверхностей  $\sqrt{8\mu} - \nabla 8\text{в}$ ;  $T_{\text{ж}} = 393^\circ \text{ К}$ .

1 — окисные пленки толщиной  $\delta = 1200 \text{ \AA}$ ; 2 — то же,  $\delta = 640 \text{ \AA}$ ; 3 — чистые поверхности.

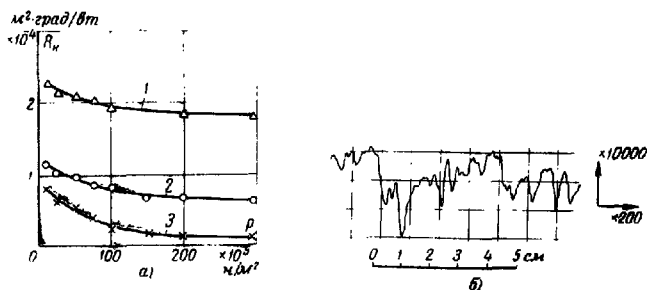


Рис. 5-17. Зависимость термического сопротивления контакта от нагрузки при наличии и отсутствии на поверхностях его окисных пленок (а) и поперечная профилограмма, одинаковая для обеих поверхностей (б).

Материалы пары Д16Т—Д16Т; чистота обработки поверхностей  $\sqrt{8\mu} - \nabla 8\text{в}$ ;  $T_{\text{ж}} = 385^\circ \text{ К}$ .

1 — окисные пленки толщиной  $\delta = 1060 \text{ \AA}$ ; 2 — то же,  $\delta = 510 \text{ \AA}$ ; 3 — чистые поверхности.

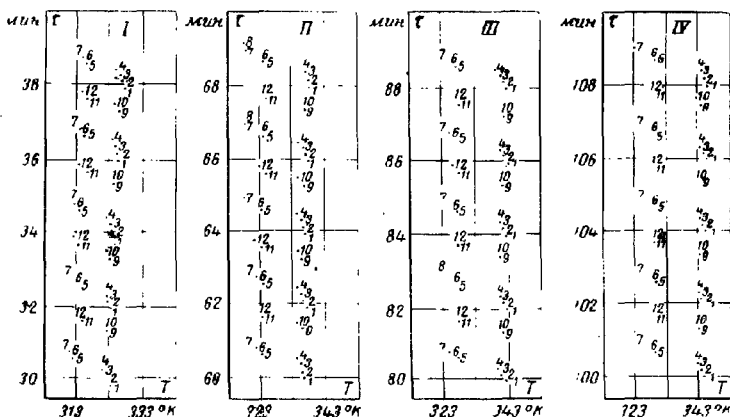
росту сопротивления  $R_k$  и вырождению зависимости  $R_k = f(p)$ .

Анализ поверхностей после проведения опытов показывает, что при давлениях до  $300 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> каких-либо разрушений поверхностного слоя не наблюдается, т. е. контакт непосредственно металлической основы почти исключается. Это в первую очередь и является причиной повышения сопротивления  $R_k$  соединений с окисленными поверхностями.

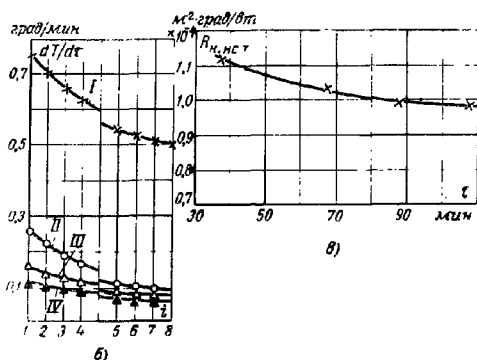
#### 5-4. НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, НАХОДЯЩИХСЯ В КОНТАКТЕ

В практике работы машин и аппаратов довольно часто встречаются соединения, подвергающиеся нестационарному тепловому воздействию. Для исследования особенностей контакта при нестационарном тепловом режиме применялась установка по скоростному определению термического сопротивления в зоне контакта (см. рис. 4-11). Показания самопишущего потенциометра в различные промежутки времени (4 интервала) нагрева образцов из материалов Д1 — сталь 45 и сталь 45 — сталь 30 приводятся на рис. 5-18 и 5-19. Здесь же приводится обработка данных в относительных координатах  $dT/d\tau = f(i)$  ( $i$  — относительная координата) с целью определения величины  $b$  — изменения скорости роста температуры в контактной зоне и величины  $a$  — скорости подъема температуры на границах образцов. Для нестационарного режима расчет термического сопротивления  $R_{k,нст}$  ведется по выражению (4-5) и определяется изменение  $R_{k,нст}$  в зависимости от времени  $\tau$  нагрева образцов (рис. 5-18, в и 5-19, в). Характер кривой  $R_{k,нст} = f(\tau)$  может быть объяснен, исходя из физической сущности теплообмена в зоне контакта. Действительно, как видно из рис. 5-19, в первом интервале нагрева (I) при  $\tau_1 = 80$  мин средняя температура контактной зоны лежит в пределах  $T_k = 311^\circ \text{K}$ , теплопроводность воздуха  $\lambda_c = 26,5 \cdot 10^{-3}$  вт/(м·град), эквивалентная теплопроводность контактирующих металлов  $\lambda_m = 47,8$  вт/(м·град), модуль нормальной упругости  $E = 20,05 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup>, в то время как в четвертом интервале (IV) при  $\tau_4 = 138$  мин, когда температура контакта  $T_k = 333^\circ \text{K}$ , соответственно  $\lambda_c = 28,6 \cdot 10^{-3}$  вт/(м·град),  $\lambda_m = 48,3$  вт/(м·град) и  $E = 20,1 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup>. Таким образом, имеет место увеличе-

ние теплопроводности среды и металла при почти неизменных в данном примере механических характеристиках. Если тепловая проводимость среды увеличилась на 7,35%, то проводимость металлов — всего на 1,1%, т. е. рост тепловой проводимости контактной зоны осуществ-



а)



б)

Рис. 5-18. Диаграммы показаний температур и их обработка при нестационарном тепловом режиме в зоне контакта.

Материалы пары Д1 — сталь 45: чистота обработки поверхностей  $\nabla 6a - \nabla 6a$ ; средняя высота микронеровностей  $h_{ср1} = 8,5 \text{ мкм}$  и  $h_{ср2} = 8,1 \text{ мкм}$ ; нагрузка  $50 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ;  $T_{н} = 343^\circ \text{К}$ ;  $R_{н,ст} = 0,96 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2 \cdot \text{град.ш.}$

а — показания самопишущего потенциометра в четырех интервалах времени нагрева образцов; б — зависимость  $dT/dt = f(t)$  — обработка опытных данных в относительных координатах; в — зависимость термического сопротивления контакта от времени нагрева.

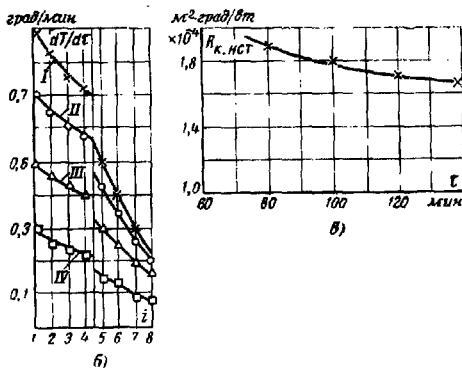
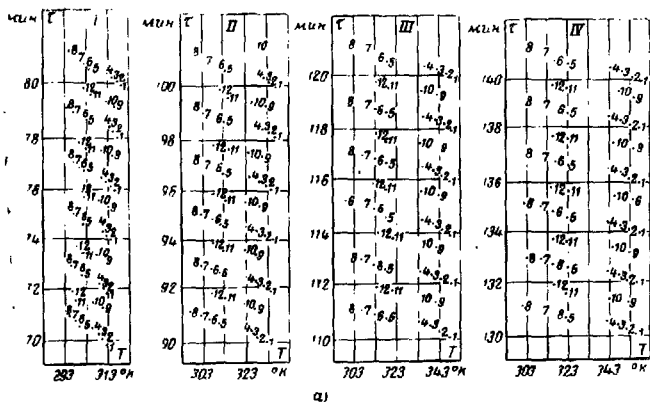


Рис. 5-19. Диаграммы показаний температур и их обработка при нестационарном тепловом режиме в зоне контакта.

Материалы пары сталь 45—сталь 30; чистота обработки поверхностей  $\nabla 5$ — $\nabla 6$ ; средняя высота микронеровностей  $h_{ср1}=12,5$  мкм и  $h_{ср2}=12$  мкм; нагрузка  $150 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>;  $T_{к.стац}=338^\circ\text{K}$ ;  $R_{к.стац}=1,61 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>·град/вт.

а — показания потенциометра (четыре интервала времени нагрева образцов); б — зависимость  $dT/d\tau=f(t)$ ; в — зависимость термического сопротивления контакта от времени нагрева.

вляется в основном за счет повышения проводимости среды. Если же учесть также некоторый прирост фактической площади контакта при длительном воздействии нагрузки ( $\tau_1 - \tau_4 = 60$  мин), то снижение термического сопротивления контакта в зависимости от времени нагрева (до 10%) вполне закономерно. Показателен начальный характер кривой  $R_{к.кст} = f(\tau)$ , когда точки более чувствительны ко времени нагрева образцов, что объясняется более интенсивным изменением скорости подъема температуры на границах и в контактной зоне. В дальнейшем, когда режим по сути дела приближается к стационарному, имеет место вырождение зависимости  $R_{к.кст} = f(\tau)$ .

Отмеченные особенности нестационарного теплообмена между телами, находящимися в контакте, представляют определенный практический интерес. Так, при умеренной скорости нагрева сопряженных тел в первом приближении термическое сопротивление при нестационарном режиме равняется термическому сопротивлению при стационарном тепловом режиме, т. е.  $R_{к.кст} = R_{к.ст}$ , чего нельзя утверждать, когда скорость нагрева достаточно интенсивна. В последнем случае, очевидно, задача требует частных решений для каждого из отдельных периодов времени нагрева. При этом скоростной метод определения термического сопротивления контакта значительно облегчает решение задачи.

## 5-5. МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА

Решение ряда технических задач может потребовать применения одного из способов искусственного изменения термического сопротивления разъемных и неразъемных соединений. Например, в одном случае возникает необходимость интенсификации теплообмена через зону контакта, а в другом, наоборот, создания на пути теплового потока дополнительного термического сопротивления. Для решения этих вопросов может быть предложен ряд практических рекомендаций.

Тепловую проводимость зоны контакта можно увеличить путем повышения чистоты обработки (целесообразно не более 9—10-го класса), исключения макронеровностей, а также волнистости, в первую очередь выше

III класса, различного рода окисных пленок, и увеличения силы сжатия до  $200 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>.

Кроме того, повышения тепловой проводимости можно добиться введением в контактную зону среды с теплопроводностью, близкой к теплопроводности металлов или превосходящей их, а также по возможности достаточно полно заполняющей все неровности контактирующих поверхностей.

Ниже приводятся мероприятия, направленные на снижение термического сопротивления контактных соединений.

Для разъемных соединений:

1. Напыление или гальваническое покрытие контактных поверхностей высокотеплопроводными и высокопластичными металлами.

2. Применение высокотеплопроводных прокладок из мягких металлов (олово, свинец, кадмий и т. п.).

3. Введение в зону контакта жидких металлов или сплавов.

4. Заполнение межконтактного пространства высокотеплопроводными газами.

5. Введение в зону контакта порошкообразных веществ.

6. Наполнение межконтактной прослойки теплостойкими вязкими веществами.

Для неразъемных соединений

1. Соединения типа пайки или сварки.

2. Клеевые соединения.

Экспериментальная программа с целью детального изучения достоинств и недостатков каждого из предложенных способов уменьшения термического сопротивления контакта включала серию опытов с образцами, характеристики которых приведены в табл. 5-9. Результаты опытов представлены на рис. 5-20—5-28 и в табл. II-8—II-12 (см. приложение II).

Покрытия из высокотеплопроводных и высокопластичных металлов наносились электрохимическим способом, который обеспечивает прочное сцепление осадка с основным металлом и позволяет довольно легко варьировать толщину покрытия.

Как видно из графиков на рис. 5-20—5-22, покрытие контактных поверхностей металлами с высоким коэффициентом теплопроводности (меднение) или малой твердостью (свинцевание и кадмирование) следует признать



довольно перспективным в производственных условиях. Действительно, как для плоскоотно-шероховатых поверхностей, так и для поверхностей с макронеровностями или волнистостью даже при малых усилиях сжатия наблюдается уменьшение сопротивления  $R_k$  в 2—3 раза.

Наблюдения за рельефом поверхностей, подвергшихся гальваническим покрытиям, показывают [Л. 81], что в ряде случаев качество поверхностей остается прежним (лужение, кадмирование, меднение и т. п.), но иногда происходит изменение ее исходной формы в сторону увеличения высоты неровностей (свинцевание). В последнем случае целесообразно в период свинцевания применять движущиеся резиновые щетки или подвергать освинцованные поверхности механической обработке.

Анализ экспериментальных кривых на графиках (рис. 5-20) и опытных данных табл. II-8 (см. приложение II) дает основание полагать, что для уменьшения сопротивления  $R_k$  в первую очередь следует отдать предпочтение покрытиям из мягких металлов (кадмирование, свинцевание, лужение). Действительно, из табл. 5-10 видно, что теплопроводность меди больше теплопроводности свинца в 11 раз, но в то же время твердость свинца по Бриггелю, наоборот, в 8—10 раз меньше, а потому термическое сопротивление омедненных образцов на целый порядок превышает сопротивление освинцованных образцов.

При тепловом контакте поверхностей с нанесенными на них мягкометаллическими покрытиями происходит в основном пластическая деформация микронеровностей, причем происходят интенсивный рост фактической пло-

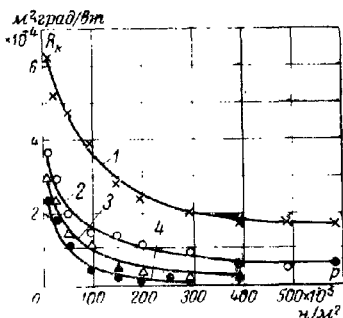


Рис. 5-20. Зависимость термического сопротивления контакта от сжатия при наличии гальванических покрытий на одной из контактирующих поверхностей.

Материал пары сталь 45—сталь 45; чистота обработки поверхностей  $\nabla 4$ — $\nabla 4$ ;  $T_k = 375^\circ \text{K}$ .

1 — исходные поверхности ( $q_{ср1} = 71,9 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ); 2 — меднение по поверхности ( $\delta = 60 \text{ мкм}$ ;  $q_{ср2} = 75 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ); 3 — кадмирование ( $\delta = 60 \text{ мкм}$ ;  $q_{ср3} = 74,8 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ); 4 — свинцевание ( $\delta = 60 \text{ мкм}$ ;  $q_{ср4} = 71,2 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ).

Характеристики образцов контактных пар при исследовании способов изменения термического сопротивления соединений

| Способ изменения термического сопротивления | № серия опытов | Материалы образцов  | Класс обработки поверхностей   | Средняя высота неровностей, мкм | Примечание                                 |
|---|----------------|---------------------|--|---------------------------------|--|
| I   | 1              | Сталь 45 — сталь 45 | $\nabla 4 - \nabla 4$  | 28—32                           | Контактируют чистые поверхности            |
|   | 2              | Сталь 45 — сталь 45 | $\nabla 4 - \nabla 4$  | 28—30                           | Одна из поверхностей покрыта медью         |
|   | 3              | Сталь 45 — сталь 45 | $\nabla 4 - \nabla 4$  | 28—29                           | Одна из поверхностей покрыта кадмием       |
|   | 4              | Сталь 45 — сталь 45 | $\nabla 4 - \nabla 4$  | 28—33                           | Одна из поверхностей покрыта свинцом       |
| II  | 1              | Сталь 45 — сталь 45 | $\nabla 96 - IV / \nabla 8a$<br>Одна из поверхностей имеет сферическую волнистость | 1, 16—5/2, 6                    | Контактируют чистые поверхности            |
|   | 2              | Сталь 45 — сталь 45 | То же  | 1, 16—5/2, 9                    | Поверхность с волнистостью покрыта кадмием |
|   | 3              | Сталь 45 — сталь 45 | " "  | 1, 16—5/3, 2                    | Поверхность с волнистостью покрыта свинцом |

А. Разъемные соединения

| Способ<br>названия<br>термиче-<br>ского со-<br>противле-<br>ния | № серии<br>опытов | Материалы образцов  | Класс обработки<br>поверхностей | Средняя высота<br>неровностей, мкм | Примечание                           |
|---|-------------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| I   | 1                 | ВК8 — сталь 45      | ▽7в—▽6а                         | 3,36—8,85                          | Контактируют чистые поверхно-<br>сти |
|   | 2                 |                     |                                 |                                    |                                      |
| II  | 1                 | ВК8 — сталь 45      | ▽5—▽4                           | 14,6—32,2                          | В зоне контакта воздух               |
|   | 2                 |                     |                                 |                                    |                                      |
|   | 3                 |                     |                                 |                                    |                                      |
| III   | 1                 | Сталь 45 — сталь 45 | ▽4—▽4                           | 28—32,2                            | В зоне контакта воздух               |
|   | 2                 |                     |                                 |                                    |                                      |
|   | 3                 |                     |                                 |                                    |                                      |
| IV  | 1                 | Сталь 45 — сталь 45 | ▽86—▽9а                         | 2,1—1,4                            | В зоне контакта углекислый газ       |
|   | 2                 |                     |                                 |                                    |                                      |
|   | 3                 |                     |                                 |                                    |                                      |
|   | 4                 |                     |                                 |                                    |                                      |

Поверхность образца из стали 45  
покрыта медью

В зоне контакта прокладка из  
кадмия

В зоне контакта прокладка из  
свинца

В зоне контакта сплав свинца с  
висмутом

В зоне контакта натрий в вакуу-  
ме

2,1—1,4  
2,1—1,4  
2,1—1,4

То же  
"  
"  
"

Сталь 45 — сталь 45  
Сталь 45 — сталь 45  
Сталь 45 — сталь 45

$$\frac{d_{\text{ср}}}{b} \cdot 10^3 = 70$$

| Способ<br>замены<br>термиче-<br>ского со-<br>противле-<br>ния | № серии<br>опытов | Материалы образцов                  | Класс обработки<br>поверхностей | Средняя высота<br>неровностей, мкм | Примечание  |     |                              |                  |                      |   |
|---|-------------------|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---|-----|------------------------------|------------------|----------------------|---|
| V   | 1                 | 1X18H9T—1X18H9T                     | ▽5—▽5                           | 17,8—17,6                          | В зоне контакта воздух<br>В зоне контакта графитовый поро-<br>шок<br>В зоне контакта алюмининевая<br>пудра<br>В зоне контакта глицерин<br>В зоне контакта глицерин и 20%<br>по весу графита |     |                              |                  |                      |   |
|   | 2                 | 1X18H9T—1X18H9T                     | ▽5—▽5                           | 17,8—17,6                          |   |     |                              |                  |                      |   |
|   | 3                 | 1X18H9T—1X18H9T                     | ▽5—▽5                           | 17,8—17,6                          |   |     |                              |                  |                      |   |
|   | 4                 | 1X18H9T—1X18H9T                     | ▽5—▽5                           | 17,8—17,6                          |   |     |                              |                  |                      |   |
|   | 5                 | 1X18H9T—1X18H9T                     | ▽5—▽5                           | 17,8—17,6                          |   |     |                              |                  |                      |   |
| I   | a {               | Д16Т—Д16Т<br>Д16Т—Д16Т<br>Д16Т—Д16Т | ▽6a—▽6a<br>▽6a—▽6a<br>▽6a—▽6a   | 2,1—8,8<br>2,1—8,8<br>2,1—8,8      | В зоне контакта воздух<br>В зоне контакта клей ВК-1<br>В зоне контакта клей ВК-3  |     |                              |                  |                      |   |
|   |                   |                                     |                                 |                                    |   | б { | ВК8—сталь 45<br>ВК8—сталь 45 | ▽6a—▽5<br>▽6a—▽5 | 8,9—15,2<br>8,9—15,2 | В зоне контакта воздух<br>В зоне контакта клей ВК-1 |
|   |                   |                                     |                                 |                                    |   |     |                              |                  |                      |   |

Б. Неразъемные соединения

щади контакта и сокращение объемной составляющей межконтактной среды. Это значительно снижает термическое сопротивление контакта, так как наблюдается уменьшение величин термического сопротивления фактического контакта  $R_m$  и сопротивления межконтактной среды  $R_c$ .

Практика применения металлических покрытий для снижения термического сопротивления контакта показы-

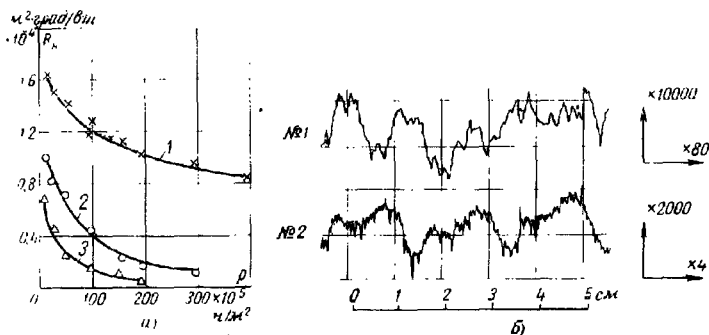


Рис. 5-21. Зависимость термического сопротивления контакта от сжигания для пары с волнистой поверхностью при наличии гальванических покрытий (а) и поперечные профилограммы поверхностей образцов (б). Материал пары сталь 45—сталь 45; чистота обработки по-

верхностей  $\nabla 9.5 - \frac{IV}{\nabla 8a}$ ;  $T_k = 373^\circ \text{K}$ .

1 — исходные поверхности ( $q_{ср1} = 64 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ); 2 — кадмирование поверхности ( $\delta = 50 \text{ мкм}$ ;  $q_{ср2} = 64.1 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ); 3 — свинцевание ( $\delta = 50 \text{ мкм}$ ;  $q_{ср3} = 68.8 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ).

вает [Л. 25], что наиболее целесообразно наносить металл толщиной, равной 2—3 максимальной высоте микронеровностей. Этот метод снижения сопротивления  $R_k$  в первую очередь перспективен для поверхностей ниже 9—10-го класса чистоты обработки, а также при наличии волнистости выше III класса или микроотклонений от плоскости с параметром  $d_{\text{экр}}/b = 50 \cdot 10^5$  для металлов с  $E > 18 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$  и  $\lambda_m < 40 \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$ .

Заслуживает внимания применение мягкометаллических прокладок (свинцовые, оловянные, кадмиевые и т. п.). Так, для контактной пары из твердосплавного материала вольфрамовой группы (для режущих пластин токарных резцов) марки ВК-8 и стали 45 введение

в зону контакта кадмневой или свинцовой прокладки даже при давлении порядка  $10 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> повышает тепловую проводимость в 2 раза, что подтверждается кривыми на рис. 5-23 и данными табл. II-9 (см. приложение

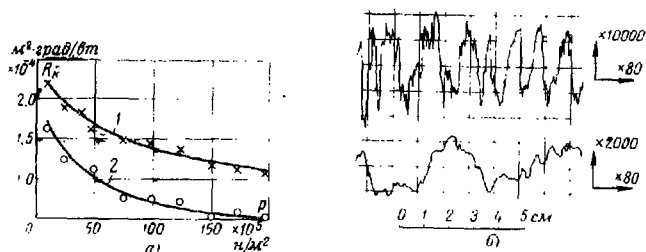


Рис. 5-22. Зависимость термического сопротивления контакта от сжатия при гальваническом покрытии одной из поверхностей (а) и поперечные профилограммы поверхностей образцов (б). Материалы пары ВК8 — сталь 45; чистота обработки поверхностей  $\nabla 7$  в  $\nabla 6$  а;  $T_k = 421^\circ \text{K}$ .

1 — исходные поверхности ( $\sigma_{ср1} = 50.1 \cdot 10^7$  ат/м<sup>2</sup>), 2 — поверхность образца из стали 45, покрытая медью ( $\delta = 50$  мкм).

ние II). Дальнейшее увеличение силы сжатия ведет к еще большему уменьшению термического сопротивления контакта, в первую очередь при введении в контактную зону менее твердой свинцовой прокладки.

Более результативным с точки зрения снижения термического сопротивления разъемных соединений оказывается использование жидкометаллических прослоек из

Таблица 5-10

**Физико-механические свойства металлов для покрытий при различных температурах**

| Металл для покрытий | Температура плавления, $^{\circ}\text{K}$ | Твердость по Бринеллю $H_{\text{В}} \times 10^{-2}$ , н/мм <sup>2</sup> | Предел прочности $\sigma_{\text{в}} \cdot 10^{-7}$ , н/мм <sup>2</sup> , при температуре, $^{\circ}\text{K}$ |      |      |      | Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , вт/(м·град), при температуре, $^{\circ}\text{K}$ |      |      |     |
|---------------------|---|---|--|------|------|------|---|------|------|-----|
|                     |   |   | 213  | 273  | 473  | 673  | 213   | 173  | 473  | 673 |
| Медь                | 1356                                      | 34—44   | 23,1   | 22,5 | 21,2 | 12,2 | 391   | 385  | 378  | 365 |
| Кадмий              | 593,9                                     | 20—30   | —  | —    | —    | —    | 93,2  | 92,5 | 91,2 | —   |
| Олово               | 504,9                                     | 12—20   | 1,76   | 1,18 | 0,69 | —    | 65,5  | 62,2 | 58,2 | —   |
| Свинец              | 600,3                                     | 4—7   | 1,17   | 0,79 | 0,47 | —    | 34,9  | 33,5 | 31,9 | —   |

легкоплавких металлов или сплавов, физические характеристики которых приводятся в табл. 5-11. Достоинства этого метода снижения термического сопротивления соединения очевидны (рис. 5-24). Так, например, при уси-

Таблица 5-11

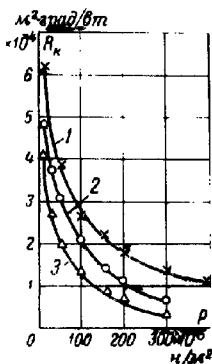
**Физические свойства металлов и сплавов, используемых в качестве прослоек в зоне контакта, при различных температурах**

| № п.п. | Наименование металла или сплава                                   | Температура плавления, °К | Теплопроводность, <i>вт. (м·град)</i> | Температура, °К |
|--------|---|---------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| 1      | Натрий  | 370,8                     | 81,5                                  | 473             |
|        |   |                           | 75,5                                  | 573             |
|        |   |                           | 71,2                                  | 673             |
|        |   |                           | 66,7                                  | 773             |
| 2      | Свинец  | 600,3                     | 16,28                                 | 603             |
|        |   |                           | 15,87                                 | 673             |
|        |   |                           | 15,48                                 | 773             |
| 3      | Олово   | 504,9                     | 33,5                                  | 513             |
|        |   |                           | 33,92                                 | 565             |
|        |   |                           | 33                                    | 690             |
|        |   |                           | 32,7                                  | 771             |
| 4      | Сплав свинца с висмутом<br>Pb 44,5% + Bi<br>55,5% (эвтектический) | 398                       | 9,23                                  | 433             |
|        |   |                           | 9,65                                  | 473             |
|        |   |                           | 10,05                                 | 513             |
|        |   |                           | 10,92                                 | 573             |
|        |   |                           | 11,32                                 | 593             |

лиях сжатия  $p = 10 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  введение в зону стыка сплава свинца с висмутом в воздушной среде и натрия в вакууме снижает сопротивление  $R_k$  в 6-7 раз. Повышение давления ведет к сплошности теплового контакта, когда сопротивление  $R_k \rightarrow 0$ . Особенно перспективен указанный метод при сопряжении поверхностей со значительными макроотклонениями, волнистостью или монтажными зазорами. Однако следует отметить, что использование этого метода связано со сложностью конструктивного оформления зоны контакта.

Уменьшение сопротивления  $R_k$  наблюдается при заполнении контактной зоны порошкообразными веществами (графитовый, медный или алюминиевый порошок и т. п.), как это видно из рис. 5-25 и табл. 11-10 (см. при-

ложение II). Технология введения порошкообразных веществ в контактную зону включает операцию по притирке поверхностей в целях заполнения впадин микро-неровностей этими веществами. Более ощутимые результаты по снижению сопротивления



$R_k$  дает введение в контактную зону вязких веществ (глицерин), особенно в виде композиции с порошкообразными веществами. Так, для пары из малотеплопроводной стали 1Х18Н9Т введение в контактную зону глицерина с 20% по весу графитового порошка снижает сопротивление  $R_k$  в 4 раза (рис. 5-25). Недостатком данного способа снижения сопротивления  $R_k$  является малая термостойкость вязких компонентов, что приводит к их выгоранию с образованием воздушных включений, в конечном итоге повышающих сопротивление  $R_k$  соединений.

Рис. 5-23. Зависимость термического сопротивления контакта от сжатия при наличии и отсутствии прокладок в зоне контакта. Материалы пары ВК8—сталь 45; чистота обработки поверхностей  $\nabla 5$ — $\nabla 4$ ;  $T_k = 393^\circ \text{K}$ .

1 — контакт без прокладок; 2 — прокладка из кадмия ( $\delta = 0,08 \text{ мм}$ ); 3 — прокладка из свинца ( $\delta = 0,1 \text{ мм}$ ).

Величиной термического сопротивления контакта можно сравнительно успешно управлять путем заполнения зоны контакта газами (водород, гелий, углекислый газ) с различной теплопроводностью, как это видно из рис. 5-26 и данных табл. II-11 (см. приложение II). При заполнении высокотеплопроводными газами (водород, гелий) проводимость через среду приобретает основное значение, в то время как проводимость через непосредственный контакт относительно мала, откуда характер зависимости  $R_k = f(p)$  выражен менее резко. Наоборот, наличие малотеплопроводных газов приводит к относительному росту теплопроводности через реальные места контакта, а потому и характер зависимости  $R_k = f(p)$  более выражен.

Не меньший интерес вызывает вопрос изменения термического сопротивления неразъемных соединений. Соединения типа пайки или сварки за счет монолитности, как правило, имеют незначительное термическое сопротивление контакта ( $R_k \rightarrow 0$ ). Другая картина наблю-

дана для соединений типа пайки или сварки за счет монолитности, как правило, имеют незначительное термическое сопротивление контакта ( $R_k \rightarrow 0$ ). Другая картина наблю-



дастся при теплообмене через клеевые соединения, при которых возникает необходимость определения тепловой проводимости клеевого шва в зависимости от давления отверждения для клеев с различной вязкостью.

На графиках (рис. 5-27) и в табл. II-12 (см. приложение II) приводятся данные опытов и расчета зависимости термического сопротивления клеевого шва от давления отверждения  $R_{\text{шва}} = f(p_{\text{отв}})$ . Склеиванию подвергаются образцы из сплава дюралюминия Д16Т и твердого сплава марки ВК-8 со сталью 45. Изменения термического сопротивления шва  $R_{\text{шва}}$  приводятся для маловязкого клея ВК-1 и более вязкого фенольно-каучукового клея ВК-3.

Результаты опытов показывают, что клеи, имеющие малую вязкость до отверждения (0,14—0,8 сек по конусному вискозиметру), улучшают тепловую проводимость клеевого шва, в то время как более вязкие клеи (вязкость > 2,6 сек) проявляют себя, как теплоизоляционный слой, в первую очередь при малых давлениях отверждения. Для маловязких клеев увеличение тепловой проводимости в зависимости от увеличения давления отверждения почти не наблюдается. И лишь незначительный рост тепловой проводимости, особенно для высоко-теплопроводных склеиваемых металлов (Д16Т), объясняется увеличением фактической площади контакта при сопряжении поверхностей, а отсюда и повышением тепловой проводимости соединений.

Совершенно по-другому представляется процесс формирования тепловой проводимости соединений на клеях с повышенной вязкостью. Если маловязкие клеи даже при незначительном давлении заполняют большинство воздушных полостей в зоне склеивания, то высоковязкие клеи образуют соединения с увеличенной клеевой про-

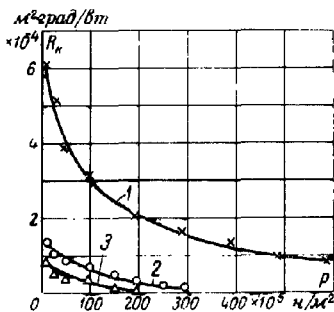


Рис. 5-24. Зависимость термического сопротивления контакта от сжатия при наличии и отсутствии в зоне контакта заполнителей. Материал пары сталь 45—сталь 45; чистота обработки поверхностей  $\nabla 4$ — $\nabla 1$ ;  $T_k = 513^\circ \text{ К}$ .

1 — в зоне контакта воздух:  $q_{c.p1} = 88,52 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ; 2 — сплав свинца с висмутом;  $q_{c.p2} = 83,3 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ ; 3 — натрий в вакууме  $q_{c.p3} = 81 \cdot 10^3 \text{ вт/м}^2$ .

слоистой и воздушными включениями. Интенсивное вырождение зависимости термического сопротивления клеевого шва от давления отверждения при данной температуре отверждения  $R_{шва} = f(p_{отв})$  для высоковязких

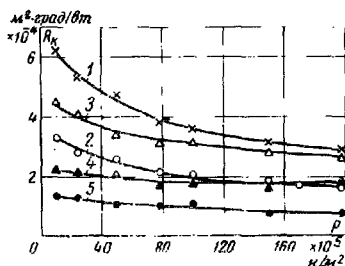


Рис. 5-25. Зависимость термического сопротивления контакта от сжатия при наличии и отсутствии в зоне контакта порошкообразных и вязких заполнителей. Материал пары сталь 1Х18Н9Т; чистота обработки поверхностей  $\nabla 5$ — $\nabla 5$ ;  $T_{II} = 378^\circ \text{K}$ .

1 — в зоне контакта воздух; 2 — графит; 3 — алюминиевая пудра; 4 — глицерин; 5 — глицерин и 20% графита по весу.

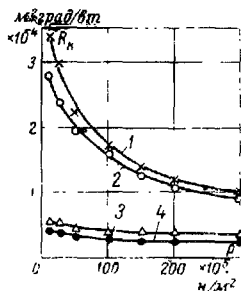


Рис. 5-26. Зависимость термического сопротивления контакта от сжатия при заполнении зоны контакта газом. Материал пары сталь 45 — сталь 45; чистота обработки поверхности  $\nabla 8$  и  $\nabla 9$  а;  $d_{зп} / b \cdot 10^5 = 70$ ;  $T_{II} = 375^\circ \text{K}$ .

1 — в зоне контакта углекислый газ (780 мм рт. ст.); 2 — воздух; 3 — гелий (755 мм рт. ст.); 4 — азот (715 мм рт. ст.).

клеев объясняется, с одной стороны, уменьшением толщины клеевой связки, а, с другой — вытеснением воздушных включений клеевой массой. Следовательно, понижения термического сопротивления клеевых соединений можно достичь либо применением маловязких клеев, либо доведением давления отверждения для высоковязких клеев до максимально возможного.

Могут быть рекомендованы для склеивания наполненные клеевые композиции (цементы или компаунды), получаемые путем введения в состав маловязкого клея высокотеплопроводных наполнителей, например графитовых, медных, алюминиевых порошков (рис. 5-28). Особенно перспективным выглядит применение наполненных клеев при наличии на склеиваемых поверхностях вол-

ности или различного рода макроотклонений от плоскости. Если же принять во внимание технические условия по подготовке поверхностей к склеиванию путем их обработки дробью, накаткой и т. п. в целях повышения механической прочности соединений, то применение наполненных клеев с точки зрения понижения термического сопротивления клевого шва следует признать наиболее эффективным.

При конструировании и эксплуатации рабочих узлов различных машин и аппаратов возникает необходимость аналитического расчета температурных полей в зоне клеевых соединений.

Практика склеивания деталей с помощью высоковязких клеев при применяемых давлениях отверждения (до  $20 \times 10^5 \text{ н/м}^2$ ) показывает, что обычно не наблюдается вступления поверхностей в непосредственный контакт, т. е. между поверхностями образуются клеевая прослойка определенной толщины.

Тепловая проводимость  $\alpha_{\text{шва}}$ , или обратная ей величина — термическое сопротивление клевого шва  $R_{\text{шва}}$ , в данном случае определяется из выражения

$$\alpha_{\text{шва}} = \frac{1}{R_{\text{шва}}} = \frac{\lambda_{\text{клея}}}{\delta_{\text{окл}} + l_{\text{к}}} \quad (5-1)$$

где  $\lambda_{\text{клея}}$  — теплопроводность клея при данной температуре отверждения;

$l_{\text{к}}$  — толщина клеевой прослойки.

В табл. 5-12 приводятся расчетные формулы по определению термического сопротивления клевого шва на высоковязких клеях для наиболее характерных случаев геометрических отклонений склеиваемых поверхностей.

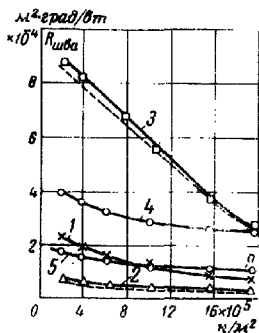


Рис. 5-27. Зависимость термического сопротивления клевого шва от давления отверждения при использовании клеев с различной вязкостью и температуре отверждения  $T_{\text{отв}} = 383^\circ \text{ К}$ . Материал пары Д16Т—Д16Т; чистота обработки поверхностей  $\nabla 6 \text{ а} - \nabla 6 \text{ а}$

1 — в зоне контакта воздух; 2 — клей ВК-1; 3 — клей ВК-3 (штриховые линии — расчетные данные, соответствующие условиям 2, 3); материалы пары ВК8 — сталь 48; чистота обработки поверхностей  $\nabla 6 \text{ а} - \nabla 5$ ; 4 — в зоне контакта воздух; 5 — клей ВК-1.

При посадке деталей на маловязкие клеи при давлении  $p_{отв} = (2 \div 3) \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ , когда поверхности вступают в непосредственный контакт, необходимо учитывать од-

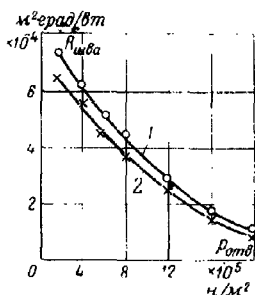


Рис. 5-28. Зависимость гермического сопротивления клевого шва от давления отверждения при использовании наполненного клея при температуре отверждения  $T_{отв} = 383^\circ \text{ К}$ . Материал пары Д16Т—Д16Т; чистота обработки поверхностей V6 а—V6 а.

1 — в зоне контакта клеи ВК-1 и 100% по весу графита; 2 — клеи ВК-1 и 100% медного порошка.

повременно тепловую проводимость через места фактического контакта  $\alpha_m$  и клеевые включения  $\alpha_{клев}$ .

Общая тепловая проводимость через клеевое соединение в данном случае имеет вид

$$\alpha_{шва} = \alpha_m + \alpha_{клев}.$$

Конечные расчетные формулы для различных возможных видов контакта склеиваемых пар маловязкими клеями приведены в табл. 5-13.

В целях упрощения инженерных расчетов выражение для определения термического сопротивления клевого шва при склеивании маловязкими клеями плоско-шероховатых поверхностей представлено на рис. 5-29 в виде номограммы. Номограмма позволяет определять  $R_{шва}$  или выбирать оптимальные значения параметров, влияющих на  $R_{шва}$ . Принцип построения номограммы и использование ее для расчетов аналогичны описанным выше для  $R_k$  (см. рис. 3-13).

Пример. Требуется определить термическое сопротивление клевого шва пары из стали 45 [ $\lambda_m = 47,3 \text{ вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ ];  $E = 20 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$ ] при температуре отверждения  $T_{отв} = 420^\circ \text{ К}$  и давлении  $p_{отв} = 10 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$  с поверхностями, обработанными по 5-му классу чистоты ( $h_{ср} = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ). Использовался клей марки ВК-1 ( $< 0,8 \text{ сек}$ ) с  $\lambda_{клев} = 19,3 \cdot 10^{-2} \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$ . Из графиков на рис. 3-3 и 3-8 имеем:  $B = 16$  и  $1 - t = 0,51$ . По номограмме находим:  $R_{шва} = 0,142 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град/вт}$ .

### Формулы для определения термического сопротивления клеевого шва на высоковязких клеях

| № п/п | Поверхности склеиваемых пар                 | Термическое сопротивление клеевого шва, $\text{м}^2 \cdot \text{град} / \text{вт}$   |
|-------|---|--|
| 1     | Плоскостно-шероховатые                      | $\frac{1}{R_{\text{шва}}} = \frac{\lambda_{\text{клея}}}{(h_{\text{макс } 1} + h_{\text{макс } 2})(1 - m) + l_{\text{к}}}$ |
| 2     | Волнистые                                   | $\frac{1}{R_{\text{шва}}} = \frac{\lambda_{\text{клея}}}{(H_{\text{макс } 1} + H_{\text{макс } 2})(1 - K) + l_{\text{к}}}$ |
| 3     | Плоскостно-шероховатая + волнистая          | $\frac{1}{R_{\text{шва}}} = \frac{\lambda_{\text{клея}}}{h_{\text{макс}}(1 - m) + H_{\text{макс}}(1 - K) + l_{\text{к}}}$  |
| 4     | С макрорклонениями                          | $\frac{1}{R_{\text{шва}}} = \frac{\lambda_{\text{клея}}}{\frac{d_1 + d_2}{2} + l_{\text{к}}}$                              |
| 5     | Плоскостно-шероховатая + с макрорклонениями | $\frac{1}{R_{\text{шва}}} = \frac{\lambda_{\text{клея}}}{\frac{d}{2} + h_{\text{макс}}(1 - m) + l_{\text{к}}}$             |
| 6     | Волнистая + с макрорклонениями              | $\frac{1}{R_{\text{шва}}} = \frac{\lambda_{\text{клея}}}{\frac{d}{2} + H_{\text{макс}}(1 - K) + l_{\text{к}}}$             |

Примечание.  $h_{\text{макс } 1}$  — максимальная высота выступов микронеровностей;  $H_{\text{макс}}$  — максимальная высота волн;  $m$  — коэффициент заполнения профиля микронеровностей;  $K$  — коэффициент заполнения профиля волн;  $d$  — величина неплоскостности;  $l_{\text{к}}$  — толщина клеевой прослойки между уровнями, лежащими на высоте максимальных выступов микронеровностей поверхностей.

В ряде случаев для улучшения тепловой защиты возникает необходимость искусственного повышения термического сопротивления контакта. Для решения этой задачи, исходя из специфических условий каждого случая, могут быть рекомендованы следующие мероприятия:

1. Искусственное увеличение эквивалентной толщины воздушной прослойки путем грубой обработки поверхностей (ниже 4-го класса), нанесением волнистости или неплоскостности.

2. Сведение до минимума контактного усилия сжатия.

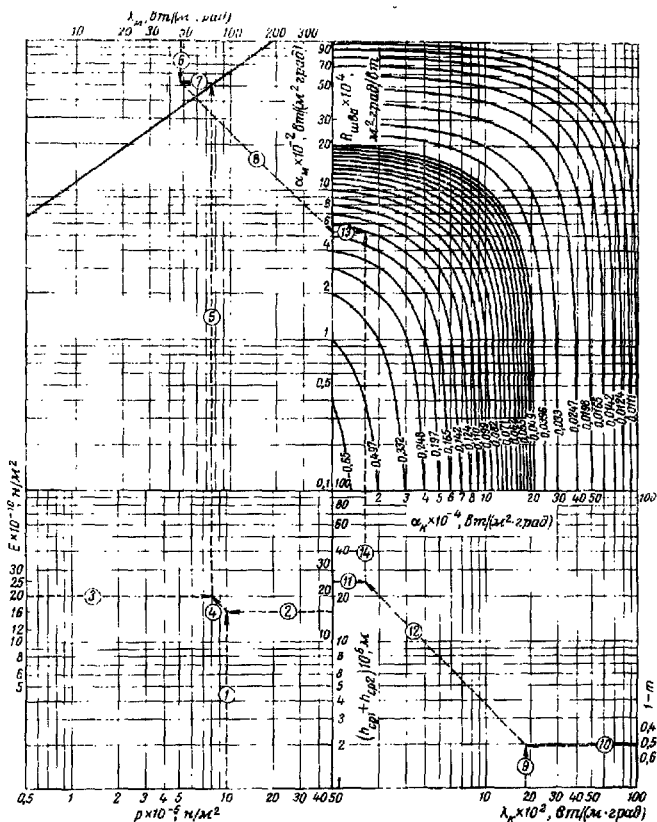


Рис. 5-29. Помограмма для определения термического сопротивления клеевых соединений на маловязких клеях при склеивании тел с плоскошероховатой поверхностью.

3. Введение в зону контакта прокладок из термоизоляционных материалов (асбест листовый, стеклянный войлок и т. п.).

4. Составление накетов из металлических листов.

5. Использование порошкообразных окислов в контактной зоне или их искусственное выращивание.

6. Создание в зоне контакта остаточного давления газовой среды меньше  $1 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст.

**Формулы для определения термического сопротивления  
клевого шва на маловязких клеях**

| № п/п, | Поверхности склеиваемых пар                 | Термическое сопротивление клеевого шва, $m^2 \cdot g \cdot \text{риб} / \text{ат}$  |
|--------|---|---|
| 1      | Плоскостно-шероховатые                      | $\frac{1}{R_{\text{шва}}} = 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_m \left( \frac{\rho_{\text{отв}}}{E} B_{\text{п}} \right)^{0,8} +$ $+ \frac{\lambda_{\text{клея}}}{(h_{\text{макс1}} + h_{\text{макс2}}) (1 - m)}$  |
| 2      | Волнистые                                   | $\frac{1}{R_{\text{шва}}} = 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_m \left( \frac{q_K}{E} B_{\text{п}} \right)^{0,8} +$ $+ \frac{\lambda_{\text{клея}}}{(H_{\text{макс.в1}} + H_{\text{макс.в2}}) (1 - K)}$  |
| 3      | Плоскостно-шероховатая + волнистая          | $\frac{1}{R_{\text{шва}}} = 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_m \left( \frac{q_K}{E} B_{\text{п}} \right)^{0,8} \times$ $\times \frac{2,38}{S_{\text{н}}} \left( \frac{RNn^{1/2}}{E} \right)^{2/3} +$ $+ \frac{\lambda_{\text{клея}}}{h_{\text{макс}} (1 - m) + H_{\text{макс.в}} (1 - K)}$ |
| 4      | С макрорезонансами                          | $\frac{1}{R_{\text{шва}}} = 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_m \left( \frac{q_K}{E} B_{\text{п}} \right)^{0,8} \times$ $\times \frac{2,4 \left( \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \cdot \frac{N}{E} \right)^{2/3}}{S_{\text{н}}} + \frac{2\lambda_{\text{клея}}}{d_1 + d_2}$                       |
| 5      | Плоскостно-шероховатая + с макрорезонансами | $\frac{1}{R_{\text{шва}}} = 2,12 \cdot 10^4 \bar{\lambda}_m \left( \frac{q_K}{E} B_{\text{п}} \right)^{0,8} \times$ $\times \frac{2,4 \left( \frac{rN}{E} \right)^{2/3}}{S_{\text{п}}} + \frac{\lambda_{\text{клея}}}{\frac{d}{2} + h_{\text{макс}} (1 - m)}$                           |

Примечание.  $R$  — радиус волны;  $r$  — радиус поверхности;  $n$  — плоскокостность;  $d$  — число волн на номинальной поверхности.

# ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА

### 6-1. К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОУСТОЙЧИВОСТИ СБОРНЫХ ТОКАРНЫХ РЕЗЦОВ

Приведенные выше методы изменения термического сопротивления могут найти широкое применение в различных областях техники [Л. 100—109], в частности для повышения износоустойчивости сборных токарных резцов.

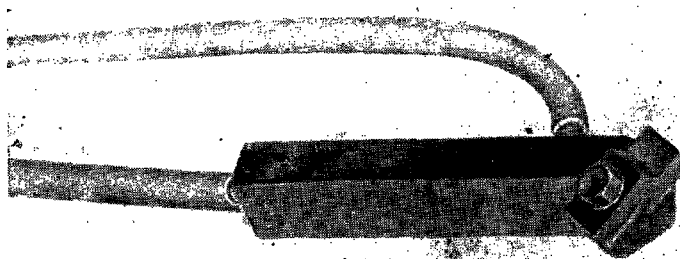


Рис. 6-1. Внешний вид сборного токарного резца с механическим креплением ножа-вставки и внутренним охлаждением.

Как известно, при обработке материалов резанием в зоне стружкообразования и местах контакта резца с заготовкой и стружки с резцом выделяется теплота, повышающая температуру режущей кромки резца и ведущая к потере резцом твердости, а следовательно, и к его затуплению. Наиболее эффективным мероприятием по снижению температуры в зоне резания считается искусственное охлаждение. Однако широко рекомендуемые способы охлаждения с использованием хладагента (поливка охлаждающей жидкости) не всегда себя оправдывает. Так, при больших скоростях резания и малом сечении срезаемого слоя эффект от охлаждения поливом незначителен [Л. 82]. При обработке же хрупких металлов или различного рода пластиков внешнее



охлаждение, как правило, вообще не применяется. В связи с этим определенный интерес вызывают мероприятия, направленные на эффективный отвод тепла из зоны резания в режущий клин и далее в стержень инстру-

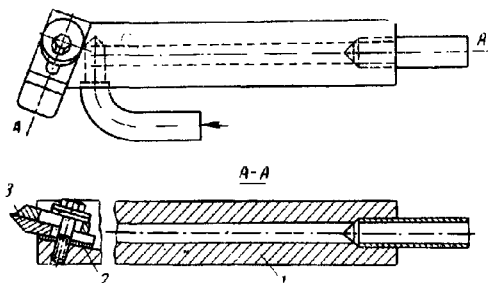


Рис. 6-2. Сборный токарный резец с механическим креплением ножа-вставки и внутренним охлаждением в разрезе.

1 — державка резца; 2 — мягкометаллическая прокладка; 3 — нож-державка.

струмента. Особенно ощутим эффект отвода тепла на державку инструмента при внутреннем охлаждении, когда хладагент подводится в специальные полости в теле

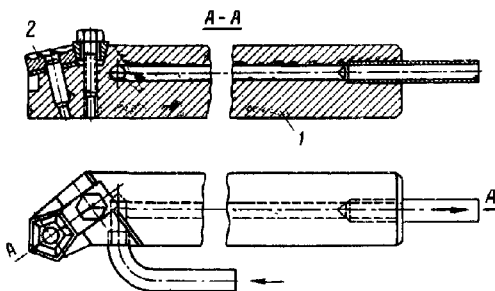


Рис. 6-3. Сборный токарный резец с механическим креплением многогранных неперетачиваемых пластин.

1 — державка резца; 2 — режущая пластина.

резца. При эксплуатации сборных токарных резцов с механическим креплением сменного ножа-вставки (рис. 6-1 и 6-2) или многогранных неперетачиваемых пластин (рис. 6-3) процесс отвода тепла на державку значитель-

## Характеристики поверхностей изделий

| Название изделия | Показатели                           | № контактной пары |             |          |      |                |        |             |      |                 |            |  |
|------------------|--------------------------------------|-------------------|-------------|----------|------|----------------|--------|-------------|------|-----------------|------------|--|
|                  |                                      | 1                 | 2           | 3        | 4    | 5              | 6      | 7           | 8    | 9               | 10         |  |
| Нож-вставка      | Класс обработки                      | ▽7                | ▽6          | ▽6       | ▽6   | ▽5             | III/▽7 | ▽5          | ▽6   | ▽5              | III.▽6     |  |
|                  | Средняя высота микронеровностей, мкм | 5,1               | 7,2         | 8,5      | 6,8  | 11,2           | 3,3,6  | 10,8        | 9,2  | 15,1            | 3,8<br>9,2 |  |
| Державка реза    | Класс обработки                      | ▽5                | IV<br>▽4    | II<br>▽6 | ▽5   | н. пл.<br>▽6   | ▽5     | III<br>▽4   | ▽5   | н. пл.<br>▽1    | ▽4         |  |
|                  | Средняя высота микронеровностей, мкм | 18,3              | 6,5<br>28,1 | 2<br>8,3 | 15,1 | 0,3 мкм<br>8,9 | 14,2   | 3,2<br>21,2 | 19,3 | 0,7 мкм<br>25,8 | 28,8       |  |

Примечание. н. пл. — неплюсовость.

но усложняется. В этом случае на пути теплового потока из зоны резания через нож или пластину на державку возникает сопротивление в виде малотеплопроводной воздушной прослойки в местах посадки. О наличии воздушного перехода переменной толщины говорят результаты контрольной проверки чистоты обработки поверхностей 10 произвольно выбранных ножей-вставок и посадочных мест державок резцов (табл. 6-1). Из таблицы видно, что, несмотря на ограниченную номинальную площадь контакта нож—державка ( $S_n=400 \text{ мм}^2$ ), эквивалентная толщина зазора  $\delta_{\text{экв}}$  лежит в пределах от 9 до 22 мкм. Очевидно, что одним из главных мероприятий по повышению износоустойчивости сборных резцов с внутренним охлаждением является улучшение теплового контакта нож — державка резца.

Для выявления наиболее рациональных способов снижения термического сопротивления в зоне посадки ножа на державке резца автором была поставлена серия специальных опытов. Метод исследования ограничивал количество переменных факторов, а потому переменным фактором считалось охлаждение, т. е. отсутствие охлаждения или наличие внутреннего охлаждения. Постоянными факторами принимались скорость резания, подача, обрабатываемый материал, геометрия резца, его материал, глубина резания.

Стандартные ножи-вставки из твердого сплава титано-вольфрамовой группы марки Т15К6 затачивались с помощью державок на экстракорундовых кругах. Для опытов применялись токарные резцы со следующей геометрией [Л. 82]: передний угол  $\gamma=0^\circ$ , задний угол  $\alpha=20^\circ$ ; угол наклона главной режущей кромки  $\lambda=0^\circ$ ; угол при вершине в плане  $\epsilon=93^\circ$  и главный угол в плане  $\phi=45^\circ$ . Державки резцов из стали 45 имели внутренние полости диаметром  $d=5 \text{ мм}$ , полученные на электроискровой установке. В качестве хладагента использовалась вода с антикоррозионными присадками. Температура воды  $T=289^\circ \text{ К}$ ; расход  $Q=4,8 \text{ л/мин}$ .

В основу определения износоустойчивости токарного резца положен метод определения устойчивости инструмента по характеру его конечного износа — изменений параметров резца (рис. 6-4) с учетом критериев износа.

Программа исследований предполагает сравнительный анализ износа параметров неохлаждаемого и охлаждаемого изнутри резца при различной чистоте об-

работки посадочного места на державке и нанесении гальванического покрытия или введении прокладок из мягких металлов.

Обработке подвергались болванки из стали 45 с твердостью по Бринеллю  $HV=193 \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$  на новом токарно-винторезном станке марки 1К62. Поддерживался сле-

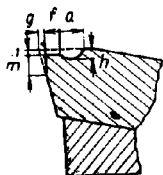


Рис. 6-4. Замеряемые параметры реза.

$a$  — ширина лунки;  $f$  — ширина фаски;  $g$  — отход режущей кромки от первоначального положения;  $n$  — спускающие кромки;  $m$  — износ по задней грани;  $h$  — глубина лунки.

дующий режим резания: подача инструмента  $S=0,2 \text{ мм/об}$ ; глубина резания  $t=2 \text{ мм}$ ; скорость  $v=226 \text{ м/мин}$ . Замеры параметров износа ножа-вставки осуществлялись по прохождению резцом пути в 2 000 мм. Полученные данные износа сведены в табл. 6-2.

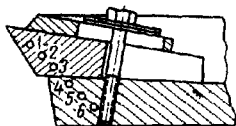
Таблица 6-2

Критерии износа реза  
(рис. 6-4)

| Условия охлаждения реза и характеристика поверхностей контактной пары (табл. 6-1)                         | Ширина лунки $a$ , мм | Ширина фаски $f$ , мм | Отход кромки от первоначального положения $g$ , мм | Спускающие кромки $n$ , мм | Износ по задней грани $m$ , мм | Глубина лунки $h$ , мм |
|---|-----------------------|-----------------------|--|----------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Без охлаждения (пара № 4)   | 0,52                  | 0,03                  | 0,13   | 0,14                       | 0,45                           | 0,12                   |
| Внутреннее охлаждение (пара № 1)  | 0,38                  | 0,04                  | 0,11   | 0,12                       | 0,38                           | 0,09                   |
| Внутреннее охлаждение (пара № 10)   | 0,43                  | 0,04                  | 0,11   | 0,14                       | 0,4                            | 0,097                  |
| Внутреннее охлаждение (пара № 9), в зоне контакта свинцовая прокладка, $\delta=0,1 \text{ мм}$            | 0,32                  | 0,05                  | 0,09   | 0,11                       | 0,35                           | 0,081                  |
| Внутреннее охлаждение (пара № 2), посадочное место на державке реза освинцовано, $\delta=0,08 \text{ мм}$ | 0,28                  | 0,05                  | 0,09   | 0,1                        | 0,33                           | 0,072                  |

Из теории резания известно, что наиболее характерным показателем износоустойчивости резца считается интенсивность износа лунки по глубине  $h$ . Из табл. 6-2 видно, что глубина лунки при работе без охлаждения на 20% больше по сравнению с охлаждаемым изнутри

Рис. 6-5. Схема расположения точек заделки термодпар для измерения температур в ноже-вставке и державке сборного резца.



резцом и сходными по чистоте обработки посадочными местами ножа и державки, когда эквивалентная толщина зазора  $\delta_{\text{ЭКВ}} = 12$  мкм.

Незначительное уменьшение глубины лунки (около 7%) имеет место при улучшении чистоты обработки посадочных поверхностей (с  $\delta_{\text{ЭКВ}} = 20,9$  мкм до  $\delta_{\text{ЭКВ}} = 12$  мкм). Меньший износ лунки (до 20—25%) обеспечивает введение в зону посадки ножа на державке



| мкм | Г | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 40  | 1 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| 38  | 1 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |

| мкм | Г | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 37  | 2 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| 35  | 2 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |

Рис. 6-6. Распределение температур в ноже и державке сборного резца с внутренним охлаждением при точении (а) по показаниям потенциометра (б).

1 — непосредственный контакт нож-державка резца; 2 — в зоне контактов с вставкой фольга толщиной  $\delta = 0,1$  мм.

Материалы пары Т15К6 — сталь 45; чистота обработки поверхностей  $\nabla 5$  —  $\nabla 4$ ;  $R_{\text{н.всп1}} = 4,67 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>·град/ат;  $R_{\text{н.рвс1}} = 3,62 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>·град/ат;  $R_{\text{н.всп2}} = 1,29 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>·град/ат.

свинцовой фольги или гальваническое нанесение свинца на посадочное место державки реза.

Указанные мероприятия по повышению стойкости сборных токарных резцов положительно сказываются и на износе задней грани  $m$ . У таких резцов значительно больше ширина фаски  $f$  и лунки  $a$ .

Сравнительно полную картину теплонапряженности, а следовательно, и износа режущей кромки резца дает температурное поле ножа-вставки и державки. Поста-

новка экспериментов была осуществлена на том же режущем оборудовании и при тех же режимах резания. В ноже-вставке и державке реза на электроискровой установке приготавливались шесть отверстий для посадки в них хромель-алюмелевых термодпар (рис. 6-5). Для обеспечения прочности контакта спаи термодпар приваривались конденсаторным методом к телу ножа и державки. Измерение э. д. с., развиваемой термодпарами, осуществлялось через щеточный переключатель потенциометром марки ППТВ.

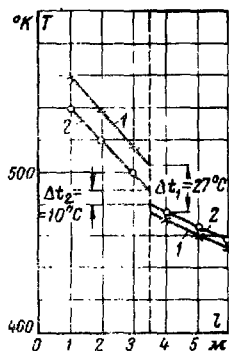


Рис. 6-7. Распределение температур в ноже и державке сборного резца при точении.

1 — непосредственный контакт нож—державка резца; 2 — в зоне контакта поверхность державки освинцована.

Материалы пары Т15К5 — сталь 45; чистота обработки поверхностей  $\sqrt{7} - \sqrt{8}$ ;  $R_{к. \text{в.св.п.1}} = 2,97 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{см}$ ;  $R_{к. \text{расч.1}} = 2,57 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{см}$ ;  $R_{к. \text{в.св.п.2}} = 12 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{см}$ .

Замеры показаний термодпар производились при установлении стационарного теплового режима (20—25 мин с начала работы), что фиксировалось самопишущим потенциометром типа ЭПП-09 М1.

На рис. 6-6 приводится распределение температур в ноже и державке сборного резца при точении с внутренним охлаждением при наличии на месте посадки нож—державка свинцовой про-

кладки толщиной  $\delta = 0,1 \text{ мм}$  и без нее, а на рис. 6-7 — освинцованной поверхности и без нее.

Из графиков на рис. 6-6 следует, что недостаточно плотное соединение нож—державка, особенно при наличии различного рода отклонений от плоскости на поверхностях разъема, препятствует отводу тепла из зоны

резания на державку. Так, в точке *I*, являющейся наиболее близкой к режущей кромке, при работе резцом, у которого посадочное место державки имеет неплоскостность порядка 0,7 мм/м, температура более чем на 20° С превышает температуру той же точки резца, имеющего более плотное соединение нож—державка (точка *I*, на рис. 6-6). Таким образом, в первом случае имеет место перегрев жога-вставки, главным образом его режущей кромки, что снижает прочностные качества твердосплавного материала и ведет к интенсификации его износа.

Повысить количество отводимого тепла на державку резца можно либо гальваническим покрытием посадочного места на державке, мягкими металлами, либо введением в зону посадки мягкометаллической прокладки. Так, введение свинцовой прокладки (см. рис. 6-6) приводит к снижению температуры точки *I* на 23° С. Температурный скачок в зоне соединения нож—державка уменьшается с 45 до 17° С, а термическое сопротивление с  $4,67 \cdot 10^{-4}$  до  $1,29 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>·град/вт. Расчетные значения термического сопротивления соединения по формулам гл. 3 хорошо согласуются с экспериментальными данными. Возможность получения надежных значений величины термического сопротивления соединения нож—державка расчетным путем значительно облегчает проведение инженерных расчетов температурных полей.

## 6-2. К ВОПРОСУ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

При работе современных радиоэлектронных устройств особый интерес приобретает проблема создания нормального теплового режима в рабочей зоне. Известно, что примерно 90—95% всех форм энергии в такого рода устройствах в конечном итоге превращаются в тепловую форму энергии, вследствие чего повышается температура деталей, работающих в аппарате [Л. 83]. При этом радиодетали сохраняют свои рабочие параметры только в том случае, если температура не превышает определенных, допустимых для них величин. В противном случае деталь или необратимо изменяет свои параметры, или совсем выходит из строя.

Исключительно большие требования по поддержанию нормального теплового режима предъявляются к мощным полупроводниковым приборам (диодам и триодам) и радиотехническим трансформаторам. В момент работы

полупроводникового прибора внутри кристалла полупроводника, и токоведущих частях прибора и проводниках выделяется значительное количество тепловой энергии. Развивающийся во времени процесс нарастания температуры может привести к значительным изменениям параметров приборов и в конечном счете к тепловому пробую. При работе радиотехнического трансформатора в его обмотке и сердечнике также выделяется тепло, повышающее температуру трансформатора и ускоряющее старение изоляции. Поэтому вопрос интенсификации процесса отвода тепла от деталей радиоэлектронных устройств, как источников тепловой энергии на охлаждающие устройства (шасси, радиаторы) является важным.

В целях интенсификации процесса отвода тепла от работающих полупроводниковых приборов осуществляют их посадку на радиаторы (рис. 6-8). Трансформаторы, как правило, закрепляют на шасси (рис. 6-9), которые выполняют роль теплоотводов. В обоих случаях тепловой поток наибольшей мощности направлен на теплоотводы.

Однако в местах крепления диодов, триодов и трансформаторов к теплоотводам возникает контактное термическое сопротивление, вызванное наличием межконтактной прослойки переменной толщины (обычно

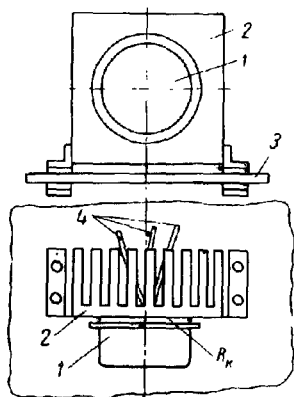


Рис. 6-8. Крепление мощного полупроводникового триода на радиаторе.

1 — корпус прибора; 2 — радиатор; 3 — шасси; 4 — выводы триода.

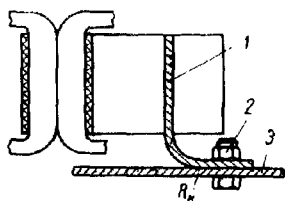


Рис. 6-9. Крепление радиотехнического трансформатора на шасси.

1 — медная шина; 2 — крепежный болт; 3 — шасси.



воздушной), что практически имеет место, если учесть серийный характер производства приборов, когда решение вопросов тщательной подгонки поверхностей и чистоты их обработки может быть не на должной высоте.

Практика эксплуатации радиотехнических приборов показывает, что пренебрежительное отношение к наличию теплового сопротивления в зоне посадки прибор — теплоотвод может свести к минимуму всю эффективность применения теплоотводящих устройств.

Исходя из приведенных выше мероприятий по снижению термического сопротивления контакта, ниже предлагается ряд рекомендаций по улучшению теплообмена через соединение прибор — теплоотвод.

1. Повышение чистоты обработки посадочного места на теплоотводе до 9—10-го класса, так как дальнейшее повышение чистоты поверхностей незначительно снижает термическое сопротивление контакта (см. гл. 5).

2. Гальваническое нанесение мягких металлов на посадочное место теплоотвода.

3. Введение в зону соединения прибор — теплоотвод мягкометаллической прокладки.

4. Введение в зону соединения жидких веществ (глицерин, машинные масла и т. п.) с наполнителем в виде графитового порошка.

5. Приложение максимально возможного усилия прижима прибора к теплоотводу.

В качестве примера, подтверждающего целесообразность применения предложенных мероприятий, приводятся экспериментальные данные по снижению температуры нагрева радиотехнического трансформатора. На рис. 6-10 показано изменение тепловой проводимости между сердечником трансформатора бронзового типа и окружающей средой при различных выполнениях посадочного места крепления трансформатора на шасси. Верхняя кривая 1 зависимости температуры перегрева в центре обмотки от мощности  $P_M$  выделенного тепла получена для случая, когда посадочное место крепления

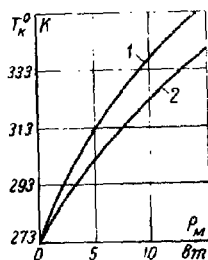


Рис. 6-10. Тепловые характеристики середины катушки трансформатора.

1 — в зоне контакта трансформатор—шасси воздух; 2 — в зоне контакта трансформатор—шасси глицерин и 100% по весу графитового порошка.

трансформатора на шасси обработано строганием до 5-го класса чистоты. Введение в зону крепления композиции в виде глицерина и 100% графитового порошка по весу приводит к снижению температуры перегрева (нижняя кривая 2). Результаты опытов показывают, что за счет создания хорошего теплового контакта между трансформатором и шасси температура перегрева в центре обмотки может быть снижена на 15—30%.

В заключение следует отметить, что предложенные выше рекомендации по снижению термического сопротивления соединения прибор — теплоотвод в комплексе с другими мероприятиями позволят создать оптимальные тепловые режимы работы радиоэлектронных устройств.

### **6-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ МЕТОДОМ КОНТАКТНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

Решение большого числа технических задач требует изучения процессов, протекающих в соединениях деталей машин. Определяющим фактором в большинстве этих процессов является фактическая площадь контакта между соприкасающимися поверхностями деталей машин. Поэтому определению и изучению этой величины придается особое значение.

В настоящее время известны четыре группы методов экспериментального определения фактической площади контакта. В основе этих методов лежат следующие принципы:

1. Измерение электропроводности контакта.
2. Перенос вещества с одной поверхности на другую в местах непосредственного контакта.
3. Наблюдение оптических явлений в местах контакта.
4. Измерение величины сближения поверхностей с известными геометрическими характеристиками.

Метод определения фактической площади контакта, основанный на измерении электропроводности контакта, применялся довольно широко Хольмом [Л. 29], Боуденом и Тейбором [Л. 13], Крагельским [Л. 20] и другими учеными. В основу этого метода положено представление общего сопротивления контакта

равным сумме двух сопротивлений: сопротивления, обусловленного размером контурной площадки контакта,  $1/2\rho_1\lambda$  и сопротивления, зависящего от числа и размера пятен фактического контакта  $1/2\rho\lambda n$ , где  $\rho$  — радиус контактного пятна;  $\rho_1$  — радиус контурной площадки контакта;  $\lambda$  — удельная электропроводимость;  $n$  — число пятен. Определение площади фактического контакта в этом случае сводится к измерению количества пятен контакта, которое находится при скольжении контактной щетки по медному кольцу. В общем этот метод не дает точного результата и требует гарировки каким-либо другим способом.

Наиболее широкое применение в инженерной практике находит метод определения фактической площади контакта, основанный на переносе краски с одной поверхности на другую. На одну из поверхностей наносится тонкий слой красящего люминесцирующего вещества, дающего при контакте отпечаток на другой поверхности. Площадь контакта замеряется специальным фотометрическим устройством. Этот метод хотя и обеспечивает приемлемую точность определения величины фактической площади контакта двух шероховатых непрозрачных поверхностей, но имеет ряд недостатков. Так, например, при повторном отсчете площади для одной и той же пары поверхностей приходится вновь наносить слой краски, чем затрудняется возможность получить кривую зависимости площади от нагрузки для одних и тех же шероховатых поверхностей.

Оптический метод измерения фактической площади контакта требует определенных условий, при которых одна из контактирующих поверхностей должна быть изготовлена из прозрачного материала в виде призмы. На контактирующую грань призмы падает пучок света под углом, превышающим предельный. В этом случае в местах касания шероховатой поверхности к прозрачной призме полное отражение нарушается и точки контакта в отраженном свете видны в виде темных пятен на зеркальном фоне. Этот метод позволяет делать лишь общие выводы, но не дает возможности определять фактическую площадь контакта в реальных соединениях.

Наиболее трудоемким, а также не обеспечивающим определение фактической площади контакта для реальных соединений считается метод, основанный на измерении сближения поверхностей с изученными геометриче-

скими характеристиками. Предварительно с шероховатой поверхности снимаются на профилографе продольная и поперечная профилограммы, после чего строятся кривые опорных поверхностей. Абсциссы кривых для одного и того же сближения перемножаются, после чего строится опорная кривая, учитывающая продольную и поперечную шероховатость. Вторая контактирующая поверхность обычно бывает гладкой, так как только в этом случае фактическая площадь контакта при данном сближении равна кривой, соответствующей абсциссе. Применение этого метода связано с трудностями технологического характера, а точность его в каждом частном случае зависит от большого числа факторов, влияние которых учесть зачастую не представляется возможным.

Таким образом, при наличии четырех методов определения фактической площади контакта в настоящее время нет универсального метода и в каждом отдельном случае при выборе метода необходимо исходить из заданных условий. В то же время ни один из указанных методов не позволяет определять фактическую площадь контакта в условиях значительных тепловых нагрузок, что характерно для условий работы деталей подавляющего числа машин.

Предлагаемый ниже метод определения фактической площади контакта, основанный на специфических особенностях прохождения теплового потока через зону контакта, указанных в гл. 3, позволяет получать результаты в условиях значительных тепловых нагрузок.

В гл. 3 работы приводятся расчетные формулы (3-25) и (3-26), в которых выражены общая тепловая проводимость или общее термическое сопротивление контакта  $\alpha_k$  или  $R_k$  в определенной зависимости от геометрии контактирующих поверхностей, нагрузки, физико-механических свойств материалов контактных пар и физических свойств межконтактной среды.

В первом приближении можно считать, что входящие в первые слагаемые правых частей выражений (3-25) и (3-26) члены  $\left(\frac{P}{E} B_{\Pi}\right)^{0,8}$  представляют собой отношение фактической площади контакта  $S_{\phi}$  к номинальной  $S_{\Pi}$ , т. е. относительную фактическую площадь контакта  $\eta_3$ . С учетом этого допущения путем элементарных преобразований (3-25) и (3-26) получаем формулы для расчета фактической площади контакта для различных условий при-

ложения нагрузки, чистоты обработки поверхностей и термических условий в зоне контакта.

При повторных приложениях нагрузки, а также первоначальном нагружении поверхностей выше 11-го класса чистоты обработки фактическая площадь контакта определяется выражением

$$S_{\phi} = 0,47 \cdot 10^{-4} \frac{S_{\Pi}}{\lambda_m} \left[ \frac{1}{R_k} - \frac{\lambda_c}{(h_{ср1} + h_{ср2})(1-m)d} \right]. \quad (6-1)$$

При первоначальном приложении нагрузки на контактирующие поверхности 5-11-го классов чистоты фактическая площадь контакта определяется формулой

$$S_{\phi} = 0,47 \cdot 10^{-4} \frac{S_{\Pi g}}{\lambda_m} \left[ \frac{1}{R_k} - \frac{\lambda_c}{(h_{макс1} + h_{макс2})(1-m)} \right]. \quad (6-2)$$

Для определения фактической площади контакта при повторных приложениях нагрузки в условиях вакуума применяется выражение

$$S_{\phi} = 0,47 \cdot 10^{-4} \frac{S_{\Pi}}{\lambda_m R_m}, \quad (6-3)$$

полученное путем преобразования формулы (3-9).

Для определения фактической площади контакта по приведенным зависимостям (6-1) — (6-3) необходимо на профилографе замерить значение высоты неровностей  $h_{ср}$  и  $h_{макс}$  у контактирующих поверхностей и найти величину коэффициента заполнения профиля микронеровностей  $m$ . Остальные величины, кроме значений сопротивлений  $R_k$  или  $R_m$ , можно определить, пользуясь табличными данными или графическими зависимостями [гл. 3].

Значения полного термического сопротивления контакта  $R_k$  или сопротивления мест фактического контакта  $R_m$  определяются опытным путем на установке по методике, описанной в гл. 4.

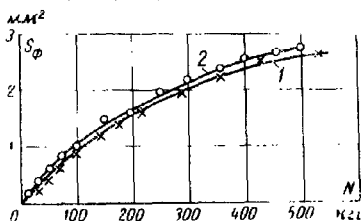


Рис. 6-11. Зависимость фактической площади контакта от нагрузки для пары Д1Т—Д1Т с поверхностями обработки точением до 4-го класса и абразивной шкуркой до 7а класса чистоты.

1 — площадь контакта определяется методом контактной теплопроводности; 2 — то же методом нанесения тонких угольных пленок [Л. 84].

Погрешность измерений фактической площади контакта лежит в пределах 8—10% при стационарном тепловом режиме и 10—15% — при нестационарном.

На рис. 6-11 приведены результаты опытов по определению предлагаемым методом фактической площади контакта для образцов из сплава дюралюминий Д17 при различных термических условиях и нагрузках. Сравнение результатов опытов, выполненных по методу нанесения тонких угольных пленок [Л. 84], с результатами, полученными методом контактной теплопроводности, показывает удовлетворительную их согласованность.

Предлагаемый метод определения фактической площади контакта при различных термических условиях и давлениях в его зоне расширяет возможности измерительной техники. Этим методом с достаточно высокой степенью точности можно определять фактическую площадь контакта шероховатых поверхностей и изменение ее в зависимости от температуры и давления в зоне контакта. Все это позволяет рекомендовать указанный метод для широкого применения в инженерной практике.

#### **6-4. ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ПРОВОДИМОСТИ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИИ**

Бурное развитие в последние годы химии полимеров позволило значительно расширить границы применения клеев. С помощью клеев достигаются надежные соединения разнообразных материалов, повышение прочности конструкций (за счет отсутствия отверстий, ослабляющих соединяемый материал и высокой усталостной прочности клеевых соединений), снижение веса конструкций, возможность одновременной герметизации швов в процессе соединения и экономическая выгода в условиях массового производства клеевых изделий. К основным недостаткам клеевых соединений следует отнести невысокую прочность при неравномерном отрыве и плохую теплопроводность по сравнению со склеиваемыми металлами. Недостаточно высокая теплопроводность клеев является обычно причиной неудовлетворительной работы склеенной конструкции. В связи с этим вопросы повышения тепловой проводимости клеевых соединений приобретают особое значение.

Ниже приводятся некоторые рекомендации по повышению тепловой проводимости клеевых соединений в узлах различных машин, основанные на экспериментальных исследованиях термического сопротивления этих соединений.

**1. Повышение тепловой проводимости клеевых соединений при восстановлении корпусов гидронасосов.** В ремонтной практике особое место занимают работы по восстановлению корпусов гидронасосов. Широко применяемые до последнего времени методы загильзовки не обеспечивают в подавляющем большинстве случаев герметичности соединений, что ведет к падению давления в системе рабочего режима. В настоящее время широкое применение находит ремонт корпусов гидронасосов при помощи клеевых соединений на базе эпоксидных композиций. Подлежащий ремонту корпус помещается в приспособление на горизонтально-фрезерном станке, которое обеспечивает надежность установки. Колодцы гидронасоса фрезеруются специальными фрезами со спиральным зубом, причем длина горизонтального перемещения стола фрезерного станка равняется межцентровому расстоянию колодцев. Предварительно отлитая из алюминия марки АЛ9 гильза прогоняется через калибр на прессе, за счет чего ее поверхность упрочняется. Запрессовка гильзы в корпус производится на специально приготовленную эпоксидную композицию. Загильзованные корпуса сушат в камерах с электрическим нагревом при температурах 323—333° К в течение 6—8 ч.

Исследования отремонтированных корпусов гидронасосов марок НШ-32 и НШ-46 во время эксплуатации показали, что для создания оптимального теплового режима в гидросистемах подъемных устройств необходимо проведение ряда мероприятий по интенсификации теплоотвода на корпус насоса и далее в окружающую среду. В ряде случаев за счет ухудшения теплообмена через клеевую прослойку соединения гильза — корпус наблюдается перегрев масла, в результате чего значительно падает давление в гидросистеме.

Для определения оптимального состава эпоксидной композиции с точки зрения достаточно хорошей теплопроводности клеевой прослойки в соединении гильза — корпус были проведены испытания четырех разновидностей рецептур клеев, различающихся в основном весо-

вым составом, дисперсностью и физическими свойствами наполнителя из сыпучих материалов.

#### Рецепт № 1

|  |     |                     |       |
|--|-----|---------------------|-------|
| Эпоксидная смола ЭД-6                      | 100 | весовых частей, или | 59%   |
| Дибутилфталат . . . . .                    | 20  | " "                 | 11,7% |
| Полиэтиленполиамин (отвердитель) . . . . . | 10  | " "                 | 5,8%  |
| Кварцевая мука (наполнитель) . . . . .     | 40  | " "                 | 23,5% |

Итого . . . . . 170 весовых частей, или 100%

#### Рецепт № 2

|   |     |                     |       |
|---|-----|---------------------|-------|
| Эпоксидная смола ЭД-6                       | 100 | весовых частей, или | 73%   |
| Дибутилфталат . . . . .                     | 10  | " "                 | 7,3%  |
| Полиэтиленполиамин . . . . .                | 7   | " "                 | 5,1%  |
| Алюминиевый порошок (наполнитель) . . . . . | 20  | " "                 | 14,6% |

Итого . . . . . 137 весовых частей, или 100%

#### Рецепт № 3

|   |     |                     |       |
|---|-----|---------------------|-------|
| Эпоксидная смола ЭД-6                       | 100 | весовых частей, или | 52,7% |
| Дибутилфталат . . . . .                     | 20  | " "                 | 10,5% |
| Полиэтиленполиамин . . . . .                | 10  | " "                 | 5,3%  |
| Алюминиевый порошок (наполнитель) . . . . . | 60  | " "                 | 31,5% |

Итого . . . . . 190 весовых частей, или 100%

#### Рецепт № 4

|  |     |                     |       |
|--|-----|---------------------|-------|
| Эпоксидная смола ЭД-6                      | 100 | весовых частей, или | 52,7% |
| Дибутилфталат . . . . .                    | 20  | " "                 | 10,5% |
| Полиэтиленполиамин . . . . .               | 10  | " "                 | 5,3%  |
| Графитовый порошок (наполнитель) . . . . . | 60  | " "                 | 31,5% |

Итого . . . . . 190 весовых частей, или 100%

На экспериментальной установке (см. рис. 4-3—4-5) для определения термического сопротивления в зоне контакта твердых тел были поставлены опыты на образцах из алюминия марки АЛ9. Контактные поверхности образцов обрабатывались фрезерованием до 5-го класса чистоты. Склеивание контактных пар клеями, приготовленными по указанным рецептам, производилось при температуре отверждения 323—333° К и давлении порядка  $(5 \div 6) \cdot 10^{-5}$  н/м<sup>2</sup>. Таким образом, создавались усло-



вия, сходные с условиями для операции сборки гильза — корпус гидронасоса.

По результатам исследований величина термического сопротивления клеевого соединения в зависимости от наполнителя композиции в  $\text{м}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}$  достигает: для рецепта № 1— $0,89 \cdot 10^{-4}$ , для рецепта № 3— $0,19 \cdot 10^{-4}$ , для рецепта № 2— $0,35 \cdot 10^{-4}$  и для рецепта № 4— $0,23 \cdot 10^{-4}$ .

Проведенные испытания серии отремонтированных гидронасосов марки НШ-32 в условиях рабочего режима (более 3 ч работы) показали следующие значения температуры масла в системе ( $^{\circ}\text{K}$ ): для рецепта № 1—358; для рецепта № 3—336; для рецепта № 2—344; для рецепта № 4—339.

Результаты лабораторно-производственных испытаний влияния состава клеевой композиции на тепловой режим работы отремонтированных гидронасосов подтвердили наличие определенного рода зависимости между ними. С учетом прочностных характеристик такого рода соединений наилучшие показатели теплового режима отремонтированных гидронасосов имеют клеевые композиции с наполнителями из высокотеплопроводных сыпучих материалов (алюминевый, бронзовый, графитовый порошки) в количестве 50—100 весовых частей.

**2. Повышение коэффициента трения в тормозных устройствах.** Узлы тормозных устройств современных самолетов, прессов, экскаваторов и других машин работают, как правило, в особо форсированных режимах, что приводит к повышению тепловых нагрузок в зоне трения. Стремление создать тормоза компактными при одновременном повышении скоростей и веса машин привело к тому, что количество кинетической энергии, проходящей на  $1 \text{ см}^3$  объема колеса тормоза, за последние годы возросло в несколько раз; так, например, для автомобилей в 3—4 раза, а для самолетов до 10 раз. Одним из основных требований, предъявляемых к современным тормозным парам, является обеспечение высокой фрикционной теплостойкости, т. е. способности пары трения сохранять высокое и стабильное значение коэффициента трения при различных температурах. Однако свойства большинства фрикционных материалов в значительной степени зависят от температуры. Так, твердость фрикционного материала ФК-16Л падает в 2 раза при повышении температуры с  $293^{\circ}$  до  $423^{\circ}\text{K}$ . Такое резкое снижение механических свойств фрикцион-

ных материалов, естественно, понижает коэффициент трения тормозной пары. Поэтому одним из реальных путей стабилизации значения коэффициента трения тормозной пары следует считать процесс интенсификации отвода тепла из зоны трения. В этом процессе в первую очередь необходимо повысить отвод тепла на диск, к которому обычно крепится накладка из фрикционного материала. Крепление накладок чаще всего осуществляется при помощи заклепок. Однако такое крепление имеет ряд существенных недостатков. Так, при работе за счет неравномерной затяжки накладок выкрашивается материал, значительно ухудшается отвод тепла на диск из-за неплотного прилегания и в конечном счете уменьшается коэффициент трения. Более перспективным выглядит крепление накладок к диску на теплоустойкие клеи. Специально проведенные исследования теплового режима тормозной пары при различных методах посадки накладок на диск подтверждают, что эти методы оказывают определенное влияние на контактный теплообмен и величину коэффициента трения пары.

Для исследования контактного теплообмена были поставлены на экспериментальной установке четыре серии опытов с образцами из стали 45 и фрикционного материала ФК-16Л. Контактные поверхности обрабатывались до 5-го класса чистоты; при этом исключались волнистость и макроотклонения от плоскости. В зоне контакта поддерживались давление в пределах от  $5 \cdot 10^5$  до  $25 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> и температура в диапазоне 473—523° К. В контактной зоне с целью выявления состава межконтактной среды, обладающей наибольшими теплопроводными свойствами, находились воздух и клеевые соединения на базе эпоксидных композиций, приготовленных по трем рецептурам.

Термическое сопротивление контакта для пары ФК-16Л — сталь 45 в зависимости от рода межконтактной среды имеет следующие числовые значения (м<sup>2</sup> · град/вт):

для воздушной прослойки —  $9,4 \cdot 10^{-3}$ ; для клеевой прослойки по рецепту № 1 —  $6,2 \cdot 10^{-3}$ ; для клеевой прослойки по рецепту № 2 —  $7,8 \cdot 10^{-3}$ ; для клеевой прослойки по рецепту № 3 —  $5,1 \cdot 10^{-3}$ .

Результаты опытов показывают, что наибольшей теплопроводностью обладают клеевые соединения с высокотеплопроводным и мелкодисперсным наполнителем.

Одновременно на дисковой машине трения марки МДП-1 были проведены исследования коэффициента трения с образцами из фрикционного материала ФК-16Л. Образцы крепились к держателю из стали 45 заклепками или с помощью клеев на базе эпоксидных композиций. Как показали результаты опытов, при давлении в зоне трения порядка  $12 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> величины коэффициента трения  $f$  различны в зависимости от способа крепления и состава эпоксидной композиции: при креплении на заклепках  $f=0,22$ , на эпоксидную композицию по рецепту № 1  $f=0,28$ , на эпоксидную композицию по рецепту № 2  $f=0,24$ , на эпоксидную композицию по рецепту № 3  $f=0,32$ .

#### Рецепт № 1

|   |     |                     |                              |
|---|-----|---------------------|------------------------------|
| Эпоксидная смола ЭД-6                       | 100 | весовых частей, или | 45,5%                        |
| Дибутилфталат . . . . .                     | 10  | " " "               | 4,5%                         |
| Полиэтиленполиамин . . .                    | 10  | " " "               | 4,5%                         |
| Обезжиренная чугунная стружка (наполнитель) | 100 | " " "               | 45,5%                        |
| Итого . . . . .                             |     |                     | 220 весовых частей, или 100% |

#### Рецепт № 2

|  |     |                     |                              |
|--|-----|---------------------|------------------------------|
| Эпоксидная смола ЭД-6                  | 100 | весовых частей, или | 41,7%                        |
| Дибутилфталат . . . . .                | 20  | " " "               | 8,4%                         |
| Полиэтиленполиамин . . .               | 10  | " " "               | 4,2%                         |
| Портландцемент (наполнитель) . . . . . | 100 | " " "               | 45,7%                        |
| Итого . . . . .                        |     |                     | 240 весовых частей, или 100% |

#### Рецепт № 3

|  |     |                     |                              |
|--|-----|---------------------|------------------------------|
| Эпоксидная смола ЭД-6                      | 100 | весовых частей, или | 57,2%                        |
| Дибутилфталат . . . . .                    | 20  | " " "               | 11,4%                        |
| Полиэтиленполиамин . . .                   | 10  | " " "               | 5,7%                         |
| Графитовый порошок (наполнитель) . . . . . | 45  | " " "               | 25,7%                        |
| Итого . . . . .                            |     |                     | 175 весовых частей, или 100% |

Приведенные числовые значения коэффициента трения свидетельствуют о том, что применение клеевых соединений на базе эпоксидных композиций с высокотеплопроводным наполнителем позволяет максимально повысить коэффициент трения тормозной пары.

## 6-5. К ВОПРОСУ О ТЕПЛОВЫХ КОНТАКТАХ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

В современных теплоизмерительных приборах достаточно часто встречаются прижимные тепловые контакты. Так, при определении коэффициента теплопроводности твердых материалов тепловые контакты являются неизбежной составляющей частью конструкции приборов. На рис. 6-12 показан широко применяемый в измерительной технике плоский прибор для определения коэффициента теплопроводности материалов при стационарном тепло-

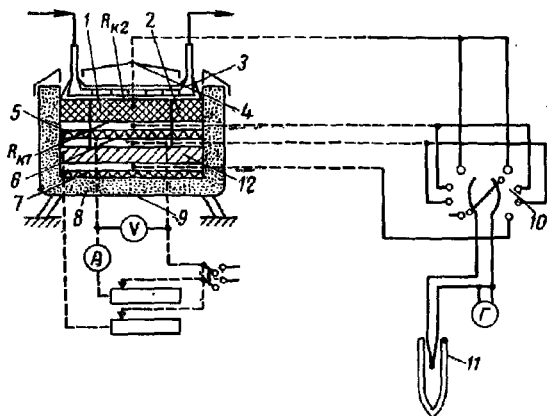


Рис. 6-12. Схема прибора для определения коэффициента теплопроводности методом пластины.

1 — испытуемый образец в виде диска; 2 — кольцо из испытуемого материала для компенсации тепловых потерь; 3 — холодильник; 4 — крышка прибора; 5 — компенсационный электрический нагреватель; 6 — основной электрический нагреватель; 7 — нижний защитный нагреватель; 8 — тепловая изоляция; 9 — корпус прибора; 10 — переключатель термораз; 11 — сосуд Дьюара с холодным спаем; 12 — тепловая изоляция;  $R_{к1}$  — термическое сопротивление контакта нагреватель—образец;  $R_{к2}$  — термическое сопротивление контакта образец—холодильник.

вом режиме методом пластины. Образец, изготовленный в форме диска, помещен между электрическим нагревателем и водяным холодильником. На пути теплового потока от нагревателя к холодильнику через образец возникают два контактных тепловых сопротивления на переходах нагреватель — образец и образец — холодильник, неизменно вносящие погрешности при измерениях теплопроводности, особенно при высоких температурах.

Кроме того, при проведении серии опытов необходимо иметь известное и надежно воспроизводимое значение термического сопротивления либо оно должно быть ничтожно мало по сравнению с тепловым сопротивлением исследуемого образца.

В современной практике измерений подсчет возможной погрешности при определении коэффициентов теплопроводности, вызванной наличием термического сопротивления воздушных зазоров на переходах нагреватель — образец и образец — холодильник, проводится следующим образом.

**Пример 1.** Для определения коэффициента теплопроводности твердых материалов между нагревателем и холодильником располагается образец в виде диска из испытуемого материала (рис. 6-13). Диаметр диска  $D=100$  мм, толщина его  $l$ . Средняя температура рабочей (контактирующей) поверхности нагревателя  $T_n=433^\circ\text{К}$ , поверхности холодильника  $T_x=313^\circ\text{К}$ . Через диск проходит тепловой поток величиной  $Q=60$  Вт. Чистота обработки поверхностей нагревателя и холодильника 4-й класс ( $h_{ср}=35 \cdot 10^{-6}$  м), контактирующих поверхностей образца 3-й класс ( $h_{ср}=65 \cdot 10^{-6}$  м). Приблизительно толщина воздушных зазоров принимается равной сумме средних высот контактирующих неровностей нагревателя и холодильника с диском, т. е.  $\delta=100 \cdot 10^{-6}$ . Требуется найти погрешность в определении коэффициента теплопроводности, которая является следствием наличия термического сопротивления воздушных зазоров в переходах нагреватель — образец и образец — холодильник.

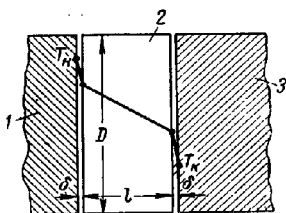


Рис. 6-13. Схема рабочего узла (в разрезе) прибора для определения коэффициента теплопроводности методом пластины.

1 — нагреватель; 2 — образец; 3 — холодильник.

Определяемая погрешность находится из выражения

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{действ}}} = \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{\text{действ}}}\right) \cdot 100\%, \quad (6-4)$$

где  $\lambda$  и  $\lambda_{\text{действ}}$  — соответственно коэффициент теплопроводности без учета термических сопротивлений воздушных зазоров и действительный коэффициент теплопроводности.

Величина коэффициента теплопроводности без учета термических сопротивлений воздушных зазоров определяется из уравнения Фурье в виде

$$\lambda = \frac{4Ql}{\pi D^2 (T_n - T_x)}. \quad (6-5)$$

Действительная величина коэффициента теплопроводности (с учетом термических сопротивлений воздушных зазоров) равна

$$\lambda_{\text{действ}} = \frac{4Ql}{\pi D^2 (T'_{\text{н}} - T'_{\text{х}})}, \quad (6-6)$$

где  $T'_{\text{н}}$  и  $T'_{\text{х}}$  — соответственно средние температуры поверхностей образца со стороны нагревателя и со стороны холодильника.

После подстановки (6-5) и (6-6) в (6-4) получается:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{действ}}} = \left( 1 - \frac{T'_{\text{н}} - T'_{\text{х}}}{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}} \right) \cdot 100\%. \quad (6-7)$$

Величина температурного перепада в образце находится в виде

$$T'_{\text{н}} - T'_{\text{х}} = T_{\text{н}} - T_{\text{х}} - \frac{4Q\delta}{\pi D^2} \left( \frac{1}{\lambda_{c1}} - \frac{1}{\lambda_{c2}} \right),$$

где  $\lambda_{c1}$  и  $\lambda_{c2}$  — соответственно коэффициенты теплопроводности среды зазоров при данных температурах.

Подстановка последнего выражения в (6-7) дает:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{действ}}} = \frac{4Q\delta}{\pi D^2} \cdot \frac{\frac{1}{\lambda_{c2}} - \frac{1}{\lambda_{c1}}}{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}} \cdot 100\%. \quad (6-8)$$

Коэффициенты теплопроводности воздуха для температур  $T_{\text{н}} = 433^\circ\text{K}$  и  $T_{\text{х}} = 313^\circ\text{K}$  соответственно равны  $\lambda_{c1} = 3,65 \times 10^{-2} \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$  и  $\lambda_{c2} = 2,65 \cdot 10^{-2} \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$ .

Подставив числовые значения величин, входящих в (6-8), получим:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{действ}}} = \frac{4 \cdot 60 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \left( \frac{1}{2,65 \cdot 10^{-2}} + \frac{1}{3,65 \cdot 10^{-2}} \right)}{3,11 (100 \cdot 10^{-3})^2 (433 - 313)} \cdot 100\% = 41,3\%.$$

Определенная таким образом погрешность коэффициента теплопроводности материала не отвечает истинному значению, так как при расчете не учитываются действительная величина воздушного зазора и специфический характер теплообмена через контактную зону. Кроме того, при постановке экспериментов, как правило, невозможно воспроизвести в серии опытов идентичные тепловые контакты. Это тем более существенно в том случае, когда для улучшения механического, а следовательно, и теплового контакта к поверхностям прикладываются определенные сжимающие усилия. В приведенной выше расчетной формуле (6-8) отсутствует член, учитывающий воздействие на тепловую проводимость соединений механической нагрузки.

Выражение (6-8) приобретает другой вид, если учитываются термические сопротивления, возникающие в соединениях нагреватель — образец и образец — холодильник:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{действ}}} = \frac{4Q}{\pi D^2} \cdot \frac{R_{\text{н1}} + R_{\text{н2}}}{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}} \cdot 100\%. \quad (6-9)$$

где  $R_{\text{н1}}$  и  $R_{\text{н2}}$  — соответственно термические сопротивления соединений нагреватель — образец и образец — холодильник,

Входящие в (6-9) контактные термические сопротивления  $R_{к1}$  и  $R_{к2}$  определяются по зависимостям, предложенным в гл. 3. Для получения действительных значений погрешностей необходимо предварительно снять профилограммы с контактирующих поверхностей нагревателя, образца и холодильника, учесть величину волнистости или макрошерошности, а также измерить усилие сжатия поверхностей.

Пример 2. Требуется найти погрешность при определении опытным путем коэффициента теплопроводности нержавеющей стали марки 1X1819T.

Контактирующие поверхности стального диска диаметром  $D = 100$  мм обработаны по 3-му классу чистоты ( $h_{ср} = 65 \cdot 10^{-6}$  м). Материал контактирующих поверхностей нагревателя и холодильника — медь. Чистота обработки поверхностей нагревателя и холодильника 4-й класс ( $h_{ср} = 35 \cdot 10^{-6}$  м). На сопрягаемых поверхностях нагревателя, образца и холодильника отсутствуют макрошерошности и волнистость. Температура рабочей поверхности нагревателя  $T_{н} = 433^{\circ}\text{К}$ , холодильника  $T_{х} = 313^{\circ}\text{К}$ . Через диск проходит тепловой поток величиной  $Q = 60$  Вт. К сопрягаемым поверхностям прикладывается постоянно усилие сжатия величиной  $p = 20 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>.

Для определения погрешности коэффициента теплопроводности по выражению (6-9) находясь значения термических сопротивлений контактов соединений нагреватель — образец и образец — холодильник из выражений для плоскошероватых поверхностей (3-24) — (3-26).

Для соосиленных нагреватель — образец приведенный коэффициент теплопроводности контактирующих материалов находится из выражения  $\bar{\lambda}_m = \frac{2\lambda_{м1}\lambda_{м2}}{\lambda_{м1} + \lambda_{м2}}$ , где коэффициенты теплопроводности для меди при температуре  $T_{н} = 433^{\circ}\text{К}$   $\lambda_{м1} = 380$  Вт/(м·град) и для нержавеющей стали 1X1819T  $\lambda_{м2} = 17,1$  Вт/(м·град).

$$\bar{\lambda}_m = \frac{2 \cdot 380 \cdot 17,1}{380 + 17,1} = 32,7 \text{ Вт/(м·град)}.$$

Предел упругости более мягкой меди при температуре  $T_{н} = 433^{\circ}\text{К}$   $E = 10,6 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $T_{н} = 433^{\circ}\text{К}$   $\lambda_c = 3,65 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·град). Коэффициент  $B_{н}$  в зависимости от  $h_{ср1} + h_{ср2} = 100 \cdot 10^{-6}$  м находится по графику на рис. 3-3, откуда  $B_{н} = 12,6$ .

Разность  $1 - m$  в зависимости от  $h_{ср} = 65 \cdot 10^{-6}$  м определяется по графику на рис. 3-8, откуда  $1 - m = 0,61$ .

Конечное значение тепловой проводимости контакта соединения нагреватель — образец по формуле (3-25)

$$\alpha_{к1} = 2 \cdot 12 \cdot 10^4 \cdot 32,7 \left( \frac{20 \cdot 10^5}{10,6 \cdot 10^{10}} \cdot 12,6 \right)^{0,8} + \frac{3,65 \cdot 10^{-2}}{100 \cdot 10^{-6} \cdot 0,61} = 862 + 600 = 1462 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}.$$

Термическое сопротивление контакта нагреватель — образец равняется

$$R_{к1} = \frac{1}{\alpha_{к1}} = \frac{1}{1462} = 6,83 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}.$$

Для соединения образец — холодильник, находящегося при температуре  $T_x = 313^\circ \text{K}$ , коэффициент теплопроводности нержавеющей стали  $\lambda_{м1} = 15,3 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ , меди  $\lambda_{м2} = 389 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ .

Приведенный коэффициент теплопроводности контактирующих материалов соединения образец — холодильник при данной температуре ( $T_x = 313^\circ \text{K}$ ) равняется

$$\bar{\lambda}_m = \frac{2 \cdot 15,3 \cdot 389}{15,3 + 389} = 29,5 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град}).$$

Предел упругости меди при  $T_x = 313^\circ \text{K}$   $E = 11,3 \cdot 10^{10} \text{ н}/\text{м}^2$ . Коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $T_x = 313^\circ \text{K}$   $\lambda_c = 2,67 \cdot 10^{-2} \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ .

Конечное значение тепловой проводимости контакта соединения образец — холодильник определяется по формуле (3-25):

$$\alpha_{к2} = 2,12 \cdot 10^4 \cdot 29,5 \left( \frac{20 \cdot 10^5}{11,3 \cdot 10^{10}} \cdot 12,6 \right)^{0,8} + \\ + \frac{2,67 \cdot 10^{-2}}{100 \cdot 10^{-6} \cdot 0,61} = 755 + 438 = 1193 \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}).$$

Отсюда термическое сопротивление контакта соединения образец — холодильник равняется

$$R_{к2} = \frac{1}{\alpha_{к2}} = \frac{1}{1193} = 8,38 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}.$$

Подставив полученные значения  $R_{к1}$  и  $R_{к2}$  в (6-9), можно определить величину погрешности при нахождении опытным путем коэффициента теплопроводности

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_{\text{действ}}} = \frac{4,60 (6,83 + 8,38) \cdot 10^{-4}}{3,14 (100 \cdot 10^{-6})^2 (433 - 313)} \cdot 100 = 9,74\%.$$

Найденное значение погрешности при определении коэффициента теплопроводности с учетом особенностей контактного теплообмена значительно ближе к истинному и в 4 раза меньше погрешности, полученной обычным способом.

При наличии на контактных поверхностях нагревателя, образца и холодильника волнистости или макронеровностей следует вести расчет термических сопротивлений контакта, входящих в выражение (6-9), по формулам (3-29) — (3-32).

Пример 3. Требуется найти погрешность при определении опытным путем коэффициента теплопроводности фрикционного материала ретинакс ФК-16Л.

Контактные поверхности образца в виде диска из фрикционного материала ФК-16Л диаметром  $D = 100 \text{ мм}$  обработаны по 5-му классу чистоты ( $h_{ср} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ) и имеют цилиндрическую волнистость с высотой волны  $H_n = 12 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , шагом  $L = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и радиусом закругления вершины  $R = 11 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Материал нагревателя и холодильника медь. Чистота обработки поверхностей нагревателя и холодильника 4-й класс ( $h_{ср} = 35 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ). Температуры рабочей поверхности нагревателя  $T_n = 433^\circ \text{K}$  и холодильника  $T_x = 313^\circ \text{K}$ . Через образец проходит тепловой поток величиной  $Q = 60 \text{ вт}$ . На контактирующие поверхности постоянно воздействует усилие сжатия величиной  $p = 20 \cdot 10^5 \text{ н}/\text{м}^2$ .



Для соединения нагреватель — образец, находящегося при температуре  $T_n = 433^\circ \text{К}$ , коэффициенты теплопроводности для меди  $\lambda_{м1} = 380 \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$  и для ретинакса ФК-16Л  $\lambda_{м2} = 0,43 \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$ . Приведенный коэффициент теплопроводности равен

$$\bar{\lambda}_m = \frac{2 \cdot 380 \cdot 0,43}{380 + 0,43} = 0,86 \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}.$$

Предел упругости более мягкого ретинакса при температуре  $T_n = 433^\circ \text{К}$   $E = 0,101 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$ . Коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $T_n = 433^\circ \text{К}$   $\lambda_c = 3,65 \cdot 10^{-2} \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$ . Коэффициент  $B_n$  в зависимости от  $h_{ср1} + h_{ср2} = 53 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  находится по графику на рис. 3-3, откуда  $B_n = 13,8$ . Разность  $l$  в зависимости от  $h_{ср} = 35 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  из графика на рис. 3-8 равняется 0,6. Согласно табл. 3-4 разность  $1-K$  принимается равной 0,5.

Для определения величины тепловой проводимости, а затем и термического сопротивления соединения нагреватель — образец по формуле (3-30) требуется найти значения контурной нагрузки  $q_k$  и относительные площади контакта  $\eta_1$  и  $\eta_2$ . Контурная нагрузка определяется из выражения  $q_k = N/S_k$ .

Нормальная нагрузка  $N$  находится по формуле

$$N = pS_n = 20 \cdot 10^5 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} = 1,57 \cdot 10^4 \text{ н}.$$

Контурная площадь контакта для  $N = 1,57 \cdot 10^4 \text{ н}$  определяется по формуле (2-21):

$$S_{кц-пл} = 1,52 \left( \frac{14 \cdot 10^{-2} \cdot 1,57 \cdot 10^4 \cdot 1,25}{0,101 \cdot 10^{10}} \right)^{1/2} = 7,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$\text{где } l = \frac{S_n}{L} = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4 \cdot 6,3 \cdot 10^{-2}} = 1,25 \text{ м}.$$

Затем находится значение контурной нагрузки:

$$q_k = \frac{1,57 \cdot 10^4}{7,9 \cdot 10^{-4}} = 0,198 \cdot 10^8 \text{ н/м}^2.$$

Относительная площадь контурного контакта определяется из выражения

$$\eta_1 = \left( \frac{q_k}{E} B_n \right)^{0,8} = \left( \frac{0,198 \cdot 10^8}{0,101 \cdot 10^{10}} \cdot 13,8 \right)^{0,8} = 0,351.$$

Относительная площадь фактического контакта находится из выражения

$$\eta_2 = \frac{S_k}{S_n} = \frac{4 \cdot 7,9 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,1^2} = 0,101.$$

Конечное значение тепловой проводимости контакта нагреватель—образец определяется из выражения (3-30):

$$\begin{aligned} x_{н1} &= 2,12 \cdot 10^4 \cdot 0,86 \cdot 0,351 \cdot 0,101 + \frac{3,65 \cdot 10^{-2}}{12 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 + 35 \cdot 10^{-6} \cdot 0,6} = \\ &= 646 + 1360 = 2006 \text{ вт/(м}^2 \cdot \text{град)}. \end{aligned}$$

Термическое сопротивление контакта нагреватель — образец

$$R_{к1} = \frac{1}{2 \cdot 006} = 4,99 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град} / \text{вт}.$$

Для соединения образец — холодильник, находящегося при температуре  $T_x = 313^\circ \text{К}$ , коэффициенты теплопроводности для ретинакса ФК-16Л  $\lambda_{м1} = 0,6 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$  и меди  $\lambda_{м2} = 389 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ . Приведенный коэффициент теплопроводности контактирующих материалов

$$\bar{\lambda}_m = \frac{2 \cdot 0,6 \cdot 389}{0,6 + 389} = 12 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град}).$$

Предел упругости ретинакса при температуре  $T_x = 313^\circ \text{К}$   $E = 0,138 \cdot 10^{10} \text{ н}/\text{м}^2$ .

Контурная площадь контакта

$$S_{кц-пл} = 1,52 \left( \frac{14 \cdot 10^{-3} \cdot 1,57 \cdot 10^4 \cdot 1,25}{0,138 \cdot 10^{10}} \right)^{1/2} = 6,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Контурная нагрузка

$$q_k = \frac{1,57 \cdot 10^4}{6,8 \cdot 10^{-4}} = 0,23 \cdot 10^8 \text{ н}/\text{м}^2.$$

Относительная площадь контурного контакта

$$\eta_1 = \left( \frac{0,23 \cdot 10^8}{0,138 \cdot 10^{10}} \cdot 13,8 \right)^{0,8} = 0,309.$$

Относительная площадь фактического контакта

$$\eta_2 = \frac{4 \cdot 6,8 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,1^2} = 0,0865.$$

Конечное значение тепловой проводимости контакта образец — холодильник

$$\alpha_{к2} = 2,12 \cdot 10^4 \cdot 1,2 \cdot 0,309 \cdot 0,0865 + \frac{2,67 \cdot 10^{-2}}{12 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 + 35 \cdot 10^{-6} \cdot 0,6} = 672 + 990 = 1662 \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}).$$

Термическое сопротивление контакта образец — холодильник

$$R_{к2} = \frac{1}{1662} = 6,03 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град} / \text{вт}.$$

Подставив полученные значения  $R_{к1}$  и  $R_{к2}$  в (6-9), получим величину погрешности коэффициента теплопроводности ретинакса:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_{\text{действ}}} = \frac{4 \cdot 60 (4,99 + 6,03) \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,1^2 (433 - 313)} \cdot 100 = 7,06 \%$$

## 6-6. К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТА В ЦЕЛЯХ СОЗДАНИЯ НАДЕЖНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТА

При работе современных машин и аппаратов или их узлов и деталей часто возникает необходимость создания для них надежной тепловой защиты. Широко известны способы тепловой защиты объектов путем нанесения слоев из теплоизоляционных материалов. Вместе с тем конструктивное исполнение компактных, по энергоемких машин и аппаратов выдвигает требования по внедрению в производство более совершенных методов тепловой защиты. В качестве одного из таких методов можно рекомендовать серию способов по искусственному увеличению термического сопротивления контакта в местах соединения деталей или узлов. Указанный способ тепловой защиты имеет большое преимущество по сравнению со способом нанесения тепловой изоляции, так как он не ведет к увеличению веса и габаритов объекта, а также не вносит изменений в конструктивное исполнение деталей или узлов.

Повышение термического сопротивления контакта может быть осуществлено путем увеличения эквивалентной толщины воздушной прослойки (грубая обработка, волнистость, макронеровности поверхностей), введения малотеплопроводных листовых или порошковых материалов (асбест, паронит, окислы металлов и т. п.), искусственного выращивания окисных пленок на контактирующих поверхностях и создания глубокого вакуума

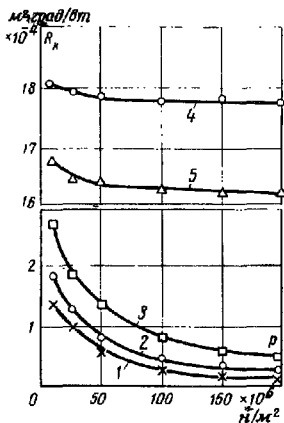


Рис. 6-14. Зависимость термического сопротивления контакта от давления для пары из дюралюминия Д16.

1 — контактные поверхности обработаны по 7а классу чистоты; 2 — по 5 му классу чистоты; 3 — по 3-му классу чистоты; 4 — по 7а классу чистоты и в зоне контакта асбестовые круги диаметром 6 мм и толщиной 80 мкм; 5 — по 7а классу чистоты и в зоне контакта порошковая окись магния с размерами зерен 80—100 мкм.

в контактной зоне. В ряде случаев целесообразно также комбинированное применение указанных способов увеличения термического сопротивления контакта.

На графиках (рис. 6-14) приведены сравнительные данные в виде кривых зависимостей  $R_k = f(p)$  для контактной пары из высокотеплопроводного дюралюминия Д16 при одинаковых термических условиях ( $T_k = 373^\circ \text{K}$ ). Анализ расположения кривых зависимостей  $R_k = f(p)$  на рис. 6-14, а также на рис. 5-8 и 5-11 позволяет выявить достоинства и недостатки предлагаемых методов тепловой защиты объекта.

Метод искусственного изменения геометрии контактирующих поверхностей (грубая обработка, волнистость, макрошероховатости) может быть рекомендован к производственному применению в том случае, когда конструктивное исполнение соединения не позволяет вносить в зону контакта теплоизоляционные материалы. Термическое сопротивление контакта в этом случае в значительной степени зависит от величины эквивалентной толщины зазора, возрастая с ее увеличением.

Наиболее простые с точки зрения исполнения соединения двух поверхностей с грубой обработкой позволяют повышать термическое сопротивление контакта для пары из высокотеплопроводных металлов в 2 раза при увеличении средней высоты микронеровностей в 10 раз (рис. 6-14). В значительно большей степени повышается термическое сопротивление контакта для соединения из малотеплопроводных материалов, так как в этом случае заметно снижается тепловая проводимость через пятна реального контакта. Для соединений с плоскостно-шероховатыми поверхностями, как отмечалось в гл. 5, можно повысить термическое сопротивление, применяя в контактной паре предварительно необжатые поверхности. В ряде случаев таким способом можно увеличить термическое сопротивление контакта до 30—40%.

Значительно эффективнее с точки зрения повышения термического сопротивления контакта выглядят соединения на волнистых поверхностях. Как показывает анализ расположения кривых зависимостей  $R_k = f(p)$  на рис. 5-5, термическое сопротивление контакта возрастает в первую очередь с увеличением высоты волны при удельной нагрузке до  $50 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . Наиболее целесообразно в этом случае применять соединения с поверхностями, имеющими цилиндрическую волнистость, когда

ребни волн контактируют в перекрестном направлении. За счет ограниченного числа контурных площадок фактическая площадь касания незначительна по величине, в то время как эквивалентная величина зазора в значительной степени воздействует на термическое сопротивление контакта в сторону его возрастания.

Представленные на рис. 5-10 и 5-11 опытные данные в виде зависимости  $R_k = f(p)$  для поверхностей с макрорельефами показывают, что термическое сопротивление контакта предрасположено к интенсивному увеличению с повышением величины эквивалентной неплоскостности и в первую очередь при малых усилиях сжатия (до  $50 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ ).

Практический интерес представляют соединения с поверхностями, имеющими сферическую выпуклость с минимально допустимым с точки зрения жесткости количеством контурных областей касания. В соединениях такого рода даже при достаточно высокой чистоте обработки поверхностей могут быть достигнуты большие значения термического сопротивления контакта. Применение данного способа тепловой защиты имеет свои границы, когда толщина эквивалентного воздушного зазора достигает предельного значения, за которым форсируют тепловые конвективные токи в зазоре. При конструировании таких соединений этот фактор следует учитывать в первую очередь.

Еще больший эффект по снижению тепловой проводимости через контактную зону соединения может быть получен, если между точками или контурными площадками непосредственного контакта поверхностей проложен тонкий слой теплоизоляционного материала. В этом случае практически сводится до минимума передача тепла через непосредственные места касания. На графиках (рис. 6-14) представлены опытные данные в виде зависимости  $R_k = f(p)$  для плоских поверхностей, обработанных по 7а классу чистоты, из высокотеплопроводного металла Д16.

Применяется местный способ нанесения асбеста в форме кругов диаметром  $D = 6 \text{ мм}$  и толщиной  $\delta = 80 \text{ мкм}$ . На контактирующую поверхность одного из образцов при помощи клея наносятся равномерно по всей площади четыре асбестовых кружка.

Как показывает анализ расположения кривых 1 и 4 на рис. 6-14, наблюдается увеличение термического со-

противления при внесении в зону контакта асбеста по сравнению с сопротивлением для обычной контактной пары. Термическое сопротивление возрастает в 10—20 раз при малых удельных нагрузках (до  $50 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>) и в 30—40 раз при больших нагрузках (выше  $50 \times 10^5$  н/м<sup>2</sup>).

Увеличение толщины теплоизоляционного материала ограничивается явлением конвективного переноса тепла воздухом, находящимся в зазоре. В качестве теплоизоляционных материалов могут быть применены самые разнообразные механически прочные материалы с теплопроводностью, меньшей 0,2 вт/(м·град).

Мало чем уступает по эффективности тепловой защиты указанному выше способу введение в контактную зону порошкообразных окислов металлов. На графике (рис. 6-14) представлена кривая 5 в виде зависимости  $R_{\kappa} = f(p)$  для пары с поверхностями с чистотой обработки 7а класса, между которыми помещена в виде порошка окись магния с размерами зерен 80—100 мкм. Порошок равномерно распределен по толщине слоя в одно зерно в виде четырех кругов диаметром  $D = 6$  мм.

Расположение кривых 1 и 5 также указывает на увеличение термического сопротивления контакта для пары с порошком окиси магния в 10—20 раз при малых удельных нагрузках и в 30—40 раз при больших нагрузках. Как показывает практика, рациональнее применять местное нанесение окисла металла на одну из контактных поверхностей, так как при сплошном слое окисла непосредственный тепловой контакт улучшается и увеличивается тепловая проводимость. Кроме того, увеличивается вес узла с такого рода соединениями. Целесообразно окислы металла помещать на клеевую подложку.

Конструктивное исполнение ряда узлов позволяет применить для тепловой защиты объекта составную систему из металлических пластин. Такой способ повышения термического сопротивления контакта основан на принципе увеличения количества контактных зон на пути теплового потока.

На рис. 6-15 показана кривая 1 в виде зависимости  $R_{\kappa} = f(p)$  для контактной системы из трех пластин, находящихся между двумя образцами. На пути теплового потока возникают четыре контактные зоны, имитирующие включенные последовательно термические сопротивления. Материал пластин и образцов из дюралюминия

Д16 и поверхности контакта обработаны по 7а классу чистоты.

Анализ расположения кривых  $I$  на рис. 6-15 и 6-14 показывает, что термическое сопротивление составной системы в 3- 3,5 раза больше сопротивления одинарной контактной пары. Значительное повышение термического сопротивления имеет место, когда в контактные зоны составной системы вводится листовый теплоизоляционный материал или окислы металла, наносимые по технологии, описанной выше. Как видно из графиков на рис. 6-15, термическое сопротивление системы из четырех контактных зон увеличивается при введении асбестовых прокладок (кривая 2) в 16 раз и при введении окиси магния (кривая 3) в 15 раз при малых удельных давлениях.

Возможность создания глубокого вакуума в контактной зоне позволяет значительно повысить термическое сопротивление контакта, в первую очередь когда в многослойную систему введены теплоизоляционные материалы.

В ряде ответственных соединений, когда не представляется возможным применение ни одного из указанных способов для увеличения термического сопротивления, может быть применен способ искусственного выращивания окисных пленок на контактных поверхностях. Выращивание окисных пленок целесообразно производить, сообразуясь с требованиями механической прочности и отдельно для каждой поверхности соединения. При незначительных механических нагрузках на контактные поверхности выращивание пленок осуществляется при повышенных температурах, когда достигается значительная толщина пленки. При высоких нагрузках целесообразно в ущерб толщине пленки выращивание осу-

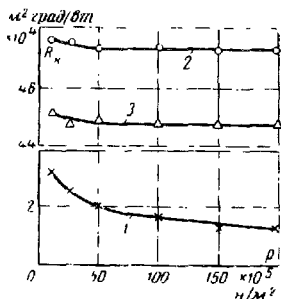


Рис. 6-15. Зависимость термического сопротивления контакта от давления для составной системы из трех пластин толщиной 1,5 мм, расположенных между двумя образцами из дюралюминия Д16. Контактные поверхности обработаны по 7а классу чистоты.

1 — в зоне контакта воздух; 2 — в зоне контакта круги из асбеста; 3 — в зоне контакта порошковая окись магния.

ществлять при малых температурах нагрева. Представленные на рис. 5-16 и 5-17 графики расположения кривых зависимостей  $R_{\kappa} = f(p)$  для чистых поверхностей и поверхностей с окисными пленками различной толщины указывают на значительный рост термического сопротивления контакта. При этом увеличение толщины окисной пленки ведет к повышению термического сопротивления контакта.

Приведенные выше способы улучшения тепловой защиты объекта не исчерпывают, однако, всех возможных в каждом конкретном случае мероприятий по снижению термического сопротивления контакта.



## ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОБМЕНА ЧЕРЕЗ ЗОНУ КОНТАКТА

Пример 1. Расчет термического сопротивления контакта при первоначальной нагрузке поверхностей (приближенный расчет).

Материал контактной пары сплав Д1Т—Д1Т. Контактуют плоские поверхности с чистой обработкой  $\nabla 8a - \nabla 9b$  (шлифованные) и максимальными высотами неровностей  $h_{\max 1} = 5 \cdot 10^{-6}$  м и  $h_{\max 2} = 1,9 \cdot 10^{-6}$  м. Температура в зоне контакта  $T_k = 420^\circ \text{К}$ . Удельное давление на контактные поверхности  $p = 50 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>. В зоне контакта находится воздух при атмосферном давлении.

Термическое сопротивление фактического контакта определяем по (3-10). При этом для сплава Д1Т при температуре  $T_k = 420^\circ \text{К}$  теплопроводность равна  $\lambda_m = 172$  вт/(м·град) и модуль упругости  $E = 5,9 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup>. По графику на рис. 3-3 для  $h_{\max 1} + h_{\max 2} = 6,9 \cdot 10^{-6}$  м коэффициент, характеризующий геометрические свойства поверхностей  $B_n = 23$ , а по графику на рис. 3-4 для  $h_{\max} = 5 \cdot 10^{-6}$  м и относительной нагрузке на контактные поверхности  $p/E = 0,84 \cdot 10^{-4}$  коэффициент  $g = 0,6$ .

Тогда

$$R_k = \frac{1}{2,12 \cdot 172 (0,84 \cdot 10^{-4} \cdot 23)^{0,8} \cdot 0,6} \cdot 10^{-4} = 8,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}.$$

Термическое сопротивление межконтактной воздушной прослойки  $R_0$  определяем согласно формуле (3-22) с учетом того, что при температуре  $T_k = 420^\circ \text{К}$  теплопроводность воздуха  $\lambda_0 = 35,6 \cdot 10^{-3}$  вт/(м·град), а из графика на рис. 3-8 для  $h_{\max} = 5 \cdot 10^{-6}$  м разность  $1 - m = 0,47$ . Относительное сближение  $\epsilon$ , входящее в (3-22), определяем для шлифованных поверхностей по приближенной формуле (3-20) при твердости по Бриеллю для данной температуры  $HV = 100 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>:

$$\epsilon = \left( \frac{0,0125 \cdot 50 \cdot 10^5}{100 \cdot 10^5} \right)^{0,185} = 0,234.$$

Тогда

$$R_0 = \frac{6,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,47 \cdot 0,766}{35,6 \cdot 10^{-3}} = 0,697 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}.$$

Полную тепловую проводимость контакта определяем по выражению (1-2) без учета влияния окисной пленки:

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{8,33 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{0,697 \cdot 10^{-4}} = 1,55 \cdot 10^4 \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}),$$

откуда термическое сопротивление контакта

$$R_k = 0,645 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}.$$

**Пример 2.** Расчет термического сопротивления контакта при неоднократных нагружениях поверхностей (приближенный расчет).

Материал контактной пары сталь 45. Чистота обработки контактных поверхностей  $\nabla 9$  в. Температура в зоне контакта  $T_k = 418^\circ \text{K}$ . Средние высоты микронеровностей на контактных поверхностях  $h_{ср1} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  и  $h_{ср2} = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . Удельное давление на контактные поверхности  $p = 10 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . В зоне контакта воздух при атмосферном давлении.

Термическое сопротивление фактического контакта определяем по формуле (3-9). Учитывая, что при температуре  $T_k = 418^\circ \text{K}$  теплопроводность для стали 45  $\lambda_m = 47,2 \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$ , модуль упругости  $E = 20 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$  и по графику на рис. 3-3 для  $h_{ср1} + h_{ср2} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  коэффициент  $B_n = 27$ , имеем:

$$R_m = \frac{1}{2,12 \cdot 17,2 \left( \frac{10 \cdot 10^5}{20 \cdot 10^{10}} \cdot 27 \right)^{0,8}} \cdot 10^{-4} = 12,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град/вт.}$$

Термическое сопротивление межконтактной воздушной прослойки определяем по формуле (3-236). В этом случае разность  $1 - m$  для  $h_{ср} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  из графика на рис. 3-8 равна 0,42, а при температуре  $T_k = 418^\circ \text{K}$  теплопроводность воздуха  $\lambda_c = 35,6 \cdot 10^{-3} \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$ . Для относительного давления  $p/E = 5 \cdot 10^{-6}$  из графика на рис. 3-10 коэффициент  $d$ , характеризующий влияние максимальных выступов микронеровностей при контакте поверхностей выше 7-го класса чистоты, равен 1,41. Следовательно,

$$R_c = \frac{2,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,42 \cdot 1,41}{35,6 \cdot 10^{-3}} = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град/вт.}$$

Полная тепловая проводимость контакта согласно формуле (1-2) равна:

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{12,6 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{6,5 \cdot 10^{-4}} = 0,233 \cdot 10^4 \text{ вт/(м}^2 \cdot \text{град)},$$

а термическое сопротивление контакта

$$R_k = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град/вт.}$$

**Пример 3.** Расчет термического сопротивления контакта при неоднократном нагружении поверхностей (уточненный расчет).

Материал контактной пары сплав Д16. Чистота обработки контактных поверхностей  $\nabla 7 \text{ в} - \nabla 8 \text{ в}$ . Средние и максимальные высоты микронеровностей соответственно равны:  $h_{ср1} = 3,22 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  и  $h_{ср2} = 1,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;  $h_{мвр1} = 5,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  и  $h_{мвр2} = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . Температура в зоне контакта  $T_k = 458^\circ \text{K}$ . Удельное давление на контактные поверхности  $p = 10 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ . В зоне контакта воздух при атмосферном давлении.

Термическое сопротивление фактического контакта определяем по формуле (3-7). Входящая в знаменатель выражения (3-7) дробь, ограниченная скобками, представляет собой относительную фактическую площадь контакта  $\eta_z$ . Чтобы ее определить, необходимо знать расчетное значение радиуса  $r$  закругления вершин выступов, для чего снимаются продольная и поперечная профилограммы с контактной поверхности одного из образцов (в данном случае чистота обработки обеих поверхностей почти одинакова).

Путем обработки профилограмм [Л. 12] получаем следующие значения радиусов закругления вершин выступов в продольном и поперечном направлениях:  $r_{\text{прод}} = 740 \text{ мкм}$ ;  $r_{\text{попер}} = 487 \text{ мкм}$ . Расчетное значение радиуса определяется выражением вида

$$r_{\text{расч}} = \sqrt[3]{r_{\text{прод}} r_{\text{попер}}^2} = \sqrt[3]{740 \cdot 487^2} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

После построения кривых опорных поверхностей на основе продольных и поперечных профилограмм [Л. 12] получим следующие значения коэффициентов:  $b_1 = 12$ ;  $\nu_1 = 2,24$ ;  $b_2 = 8$ ;  $\nu_2 = 2,36$ .

Расчетные значения коэффициентов  $b'$  и  $\nu'$  кривых опорных поверхностей определяем из выражения (2-10), а значение коэффициента  $K_2$  находим из табл. 2-8. Подставив значения коэффициентов  $b$ ,  $\nu$ ,  $K_2$  и высоты  $h_{\text{макс}}$ , входящих в указанные уравнения, получим:

$$b' = \frac{1,28 (4 + 2)^{4,0} \cdot 0,13}{4^{2,24} \cdot 2^{2,35}} = 41,3;$$

$$\nu' = 0,9 (2,24 + 2,36) = 4,14.$$

Коэффициент  $B$ , входящий в (3-7) и характеризующий свойства материалов, находим по уравнению из табл. 2-4 для упругой деформации неровностей, учитывая, что при температуре в зоне контакта  $T_n = 458^\circ \text{ К}$  для дюралюминия марки Д16 модуль упругости  $E = 5500 \text{ кг/мм}^2$  и коэффициент Пуассона  $\mu = 0,33$ . Тогда

$$B = \frac{5500}{2,35 (1 - 0,33^2)} = 2610.$$

Из табл. 2-4 коэффициент отношения площадей при сближении  $\alpha = 0,5$  и коэффициент, зависящий от деформации,  $\omega = 0,5$ .

Из табл. 2-5 коэффициент  $K_1 = 0,62$  (при  $\nu = 4$  и  $\omega = 0,5$ ). Среднее значение максимальной высоты выступов неровностей поверхностей  $h_{\text{макс}} = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

Определяем относительную фактическую площадь контакта, т. е. дробь, входящую в знаменатель (3-7):

$$\eta_3 = \left( \frac{0,5}{0,5} \frac{0,5}{4,14} \cdot 41,3 \frac{0,5}{4,14} \cdot 0,62 \cdot 0,1 \right)^{4,64} = 0,00221.$$

Коэффициент теплопроводности дюралюминия Д16 при температуре  $T_n = 458^\circ \text{ К}$  равен  $\lambda_n = 200 \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$ . Числитель формулы (3-7), т. е. коэффициент стягивания линий теплового тока  $\varphi$ , определяем по формуле (3-4):

$$\varphi = 1 - 1,41 \eta_3^{1/2} + 0,3 \eta_3^{3/2} = 1 - 1,41 \cdot 0,00221^{1/2} + 0,3 \cdot 0,00221^{3/2} = 0,93.$$

Подставив полученные значения в формулу (3-7), найдем термическое сопротивление фактического контакта:

$$R_{\text{ж}} = \frac{0,93}{2,12 \cdot 200 \cdot 0,00221} \cdot 10^{-4} = 0,99 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2 \cdot \text{град/вт.}$$

Термическое сопротивление межконтактной воздушной прослойки определяем по формуле (3-16). При температуре  $T_n = 458^\circ \text{ К}$  теплопроводность воздуха  $\lambda_c = 38,4 \cdot 10^{-3} \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$ . По графику на рис. 3-8 для  $h_{\text{макс}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  находим разность  $1 - m = 0,48$ .

Относительное сближение поверхностей под нагрузкой согласно формуле (2-9) равно

$$\epsilon = \left( \frac{0,6^{0,5} \cdot 0,1}{0,5 \cdot 4,13 \cdot 0,62 \cdot 2610 \cdot 0,004^{0,5}} \right)^{1/4,51} = 0,11.$$

Термическое сопротивление воздушной прослойки будет

$$R_c = \frac{(5,2 + 2,8) \cdot 10^{-3} \cdot 0,48 \cdot 0,89 \cdot 0,998}{38,4 \cdot 10^{-3}} = 0,89 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}.$$

Полная тепловая проводимость контакта согласно (1-2) равна

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{0,99 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{0,89 \cdot 10^{-4}} = 2,13 \cdot 10^4 \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}),$$

откуда термическое сопротивление контакта

$$R_k = 0,43 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}.$$

**Пример 4.** Расчет термического сопротивления контакта при многократном нагружении плоской и волнистой поверхностей (уточненный расчет).

Материалы контактной смешанной пары Д1 — сталь 45. Чистота обработки поверхностей V/∇7a—∇8в. Средние и максимальные высоты микронеровностей соответственно равны:  $h_{ср1} = 6 \cdot 10^{-6}$  м и  $h_{ср2} = 1,9 \cdot 10^{-6}$  м;  $h_{макс1} = 7,8 \cdot 10^{-6}$  м и  $h_{макс2} = 2,7 \cdot 10^{-6}$  м. Средняя высота волн поверхности из Д1  $H_{ср.в} = 12 \cdot 10^{-6}$  м. Температура в зоне контакта  $T_k = 423^\circ \text{К}$ . Удельное давление на контактные поверхности  $p = 10 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>. В зоне контакта воздух при атмосферном давлении. Номинальная площадь контакта  $S_n = 700$  мм<sup>2</sup>.

Термическое сопротивление контакта определяем по выражению (3-30); при этом значение относительной площади фактического контакта  $\eta_1$  находим по формуле (2-9), а относительной контурной площади  $\eta_2$  — по выражению  $\eta_2 = S_k/S_n$ . Контурная площадь контакта  $S_k$  для сферических волн определяется по уравнению (2-15).

Путем обработки волнограмм получаем следующие значения продольного и поперечного радиусов волн:  $R_{прод} = 14$  мм и  $R_{попер} = 29$  мм. Расчетное значение радиуса волн находится по формуле

$$R_{расч} = \sqrt{R_{прод} R_{попер}} = \sqrt{14 \cdot 29} = 20,2 \text{ мм}.$$

Число волн на номинальной поверхности образца получается из выражения

$$n = \frac{S_n}{L_1 L_2} = \frac{700}{1,75 \cdot 1,375} = 290,$$

где  $L_1$  и  $L_2$  — значения шагов волн, определяемые из волнограмм.

Модуль упругости более мягкого дюралюминия Д1 при температуре  $T_k = 423^\circ \text{К}$   $E = 5700$  кгс/мм<sup>2</sup>. Нормальная нагрузка определяется из выражения  $N = p S_n = 10 \cdot 7 = 70$  кгс. Тогда по (2-15) имеем:

$$S_k = 2,38 \left( \frac{20,2 \cdot 290 \cdot 70}{5700} \right)^{2/3} = 8,9 \text{ мм}^2.$$

$$\text{Контурная нагрузка } q_k = \frac{N}{S_k} = \frac{70}{8,9} = 7,85 \text{ кгс}/\text{мм}^2.$$

Для определения относительной площади фактического контакта по (2-9) с поверхностями снимаются продольные и поперечные профилограммы. Обработка профилограмм дает следующие значения продольного, поперечного и расчетного радиусов выступов микронеровностей:

$$r_{\text{пгод}} = 390 \text{ мкм}; r_{\text{попер}} = 130 \text{ мкм}; r_{\text{всч}} = \sqrt{390 \cdot 130} = 413 \text{ мкм}.$$

После построения кривых опорных поверхностей получим следующие значения коэффициентов  $b$  и  $v$ :  $b_1=2,6$ ;  $v_1=2,1$ ;  $b_2=3,1$ ;  $v_2=2,37$ .

Расчетные значения коэффициентов  $b$  и  $v$  определяем по выражению (2-10):

$$b' = \frac{2 \cdot 3,1 (7,8 + 2,7)^{4,47} \cdot 0,11}{7,8^{2,1} \cdot 2,7^{2,37}} = 41,3; v' = 0,9 (2,1 + 2,37) = 4.$$

Значения коэффициента  $K_2$  находим из табл. 2-8.

Коэффициент  $B$  находим из уравнения в табл. 2-4 для упругой деформации неровностей (аналогично примеру 3):

$$B = \frac{5700}{2,35 (1 - 0,33^2)} = 2700.$$

Из табл. 2-4 коэффициент отношения площадей при сближении  $\alpha=0,5$  и коэффициент, зависящий от деформации,  $\omega=0,5$ . Из табл. 2-5 коэффициент  $K_1=0,7$  (при коэффициентах  $\omega=0,5$  и  $v=2,37$ ).

Значения относительных площадей контакта будут:

$$\eta_1 = \left( \frac{0,5^{1/3} \cdot 41,3^{1/8} \cdot 0,413^{1/2} \cdot 7,85}{0,0078^{1/2} \cdot 0,7 \cdot 2700} \right)^{4/4,5} = 0,0612;$$

$$\eta_2 = \frac{8,9}{700} = 0,0127.$$

Относительное сближение поверхностей находится по выражению (2-9):

$$\alpha = \left( \frac{0,413^{1/2} \cdot 7,85}{0,5 \cdot 41,3 \cdot 0,7 \cdot 2700 \cdot 0,0078^{1/2}} \right)^{1/4,5} = 0,233.$$

При температуре  $T_k=423^\circ\text{K}$  теплопроводности контактирующих металлов  $\lambda_{\text{мд1}}=188 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$  и  $\lambda_{\text{м.сталь45}}=47,2 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ .

Приведенный коэффициент теплопроводности смешанной пары определяется как

$$\bar{\lambda}_m = \frac{2\lambda_{\text{м1}}\lambda_{\text{м2}}}{\lambda_{\text{м1}} + \lambda_{\text{м2}}} = \frac{2 \cdot 188 \cdot 47,2}{188 + 47,2} = 75,6 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град}).$$

Коэффициент теплопроводности воздушной среды в зазоре  $\lambda_c = 35,8 \cdot 10^{-3} \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ .

По графику на рис. 3-8 для  $h_{\text{макс}}=7,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  находим разность  $1 - m=0,49$ . Согласно данным табл. 3-4 коэффициент заполнения профиля волн  $K=0,5$ , т. е. разность  $1 - K=0,5$ .

Подставив полученные значения величин в выражение (3-30), получим величину тепловой проводимости контакта плоской и волнистой поверхностей:

$$\frac{1}{R_{к.в}} = 2,12 \cdot 10^4 \cdot 75,6 \cdot 0,0612 \cdot 0,0127 + \\ + \frac{35,8 \cdot 10^{-3}}{(12 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 + 6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4) (-0,233)} = 5675 \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}),$$

а термическое сопротивление

$$R_{к.в} = 1,76 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{град}}{\text{вт}}.$$

**Пример 5.** Расчет термического сопротивления контакта трубы со спирально намотанным оребрением в охлаждающих установках масляных трансформаторов.

Материал трубы — сталь. Материал оребрения — алюминий. Диаметры стальной трубы 18/15 мм. Чистота обработки наружной поверхности трубы 6б класса, внутренней поверхности ребра 6а класса. Температура в зоне контакта труба — оребрение  $T_k = 443^\circ \text{K}$ . Максимальная высота микрочерешковостей наружной поверхности трубы  $h_{\text{макс}1} = 7,1 \cdot 10^{-6}$  м, внутренней поверхности ребра  $h_{\text{макс}2} = 9,2 \cdot 10^{-6}$  м. В зоне контакта находится воздух при атмосферном давлении. Оребрение трубы осуществлено с натягом. Удельное сжатие на контактные поверхности  $p = 18 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>. Теплопроводность воздуха  $\lambda_c = 3,84 \cdot 10^{-2}$  вт/(м · град) (при  $T_k = 443^\circ \text{K}$ ); теплопроводность стали  $\lambda_{ст} = 47$  вт/(м · град); теплопроводность алюминия  $\lambda_{ал} = 191$  вт/(м · град) (при  $T_k = 443^\circ \text{K}$ ). Модуль упругости более мягкого металла (алюминий)  $E = 5,5 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup> (при  $T_k = 443^\circ \text{K}$ ). Приведенная теплопроводность контактирующих металлов

$$\bar{\lambda}_m = \frac{2 \cdot 47 \cdot 191}{47 + 191} = 75,5 \text{ вт}/(\text{м} \cdot \text{град}).$$

Термическое сопротивление фактического контакта труба — оребрение по формуле (3-10) для первоначально нагружаемых поверхностей

$$R_m = \frac{1}{2,12 \cdot 75,5 \left( \frac{18 \cdot 10^5}{5,5 \cdot 10^{10}} \right)^{0,8} \cdot 0,51} \cdot 10^{-4} = 4,62 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}.$$

Коэффициент  $B_n$ , входящий в (3-10), определяется из графика на рис. 3-3 в зависимости от  $h_{\text{макс}1} + h_{\text{макс}2} = 16,3 \cdot 10^{-6}$  м и равняется 18,5.

Коэффициент  $g$ , также входящий в (3-10), определяется из графика на рис. 3-4 в зависимости от  $p/E = 0,37 \cdot 10^{-4}$  и  $h_{\text{макс}} = 9,2 \cdot 10^{-6}$  м и равняется 0,51.

Термическое сопротивление межконтактной (воздушной) среды соединения труба — оребрение определяется по формуле (3-17):

$$R_c = \frac{(7,1 + 9,2) \cdot 10^{-6} \cdot 0,49 (1 - 0,204)}{3,84 \cdot 10^{-2}} = 1,65 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}.$$

Разность  $1-m$ , входящая в (3-17), определяется из графика на рис. 3-8 в зависимости от  $h_{\max} = 9,2 \cdot 10^{-6}$  м и равняется 0,49. Относительная величина сближения поверхностей  $\epsilon$  определяется из выражения (3-19):

$$\epsilon = \left( \frac{1,8 \cdot 10^5}{52 \cdot 10^7} \right)^{0,28} = 0,204.$$

Полная тепловая проводимость контакта труба — оребрение из формулы (3-26).

$$\alpha_k = \frac{1}{4,62 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{1,65 \cdot 10^{-4}} = 0,824 \cdot 10^4 \text{ вт/(м}^2 \cdot \text{град)}.$$

Отсюда полное термическое сопротивление соединения труба—оребрение

$$R_k = \frac{1}{\alpha_k} = \frac{1}{0,824 \cdot 10^4} = 1,21 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град/вт}.$$

Пример 6. Расчет термического сопротивления клевого шва между гильзой и корпусом герметизированного гидронасоса марки ПШ-46.

Материал гильзы и корпуса — алюминий. Чистота обработки склеваемых при ремонте поверхностей гильзы и корпуса 5-й класс. Максимальная высота микронеровностей поверхностей  $h_{\max} = 18,3 \cdot 10^{-6}$  м. В зоне клевого шва клей на основе эпоксидной смолы марки ЭД-5 в количестве 100 в. ч., дибутылфталата 10 в. ч., полиэтиленполиамина 7 в. ч. в алюминиевого порошка 10 в. ч. Температура отверждения клея  $T_{\text{отв}} = 363^\circ \text{К}$ . Давление отверждения  $p_{\text{отв}} = 10 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>. Теплопроводность клея  $\lambda_{\text{клея}} = 22,2 \cdot 10^{-2}$  вт/(м · град) (при  $T_{\text{отв}} = 363^\circ \text{К}$ ). Теплопроводность алюминия  $\lambda_m = 180$  вт/(м · град) (при  $T_{\text{отв}} = 363^\circ \text{К}$ ). Модуль упругости алюминия  $E = 5,8 \cdot 10^{10}$  н/м<sup>2</sup> (при  $T_{\text{отв}} = 363^\circ \text{К}$ ).

При давлении отверждения  $p_{\text{отв}} = 10 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup> наблюдается полный металлический контакт поверхностью гильзы и корпуса (вязкость клея 0,7 сек по конусному вискозиметру), поэтому расчет тепловой проводимости через клеевой шов ведется по формуле 1 табл. 5-13, как для масляякого клея.

Коэффициент  $B_{11}$ , входящий в формулу 1 табл. 5-13, находится из графика на рис. 3-3 в зависимости от  $h_{\max} (1+h_{\max}) = 36,6 \cdot 10^{-6}$  м, откуда  $B_{11} = 15,2$ . Разность  $1-m$  из графика на рис. 3-8 в зависимости от  $h_{\max} = 18,3 \cdot 10^{-6}$  м равна 0,54.

Полная тепловая проводимость клевого шва соединения гильза — корпус

$$\alpha_{\text{шва}} = 2,12 \cdot 10^4 \cdot 180 \left( \frac{10 \cdot 10^5}{5,8 \cdot 10^{10}} \cdot 15,2 \right)^{0,8} + \frac{22,2 \cdot 10^{-2}}{(18,3 + 18,3) \cdot 10^{-6} \cdot 0,54} = 5650 + 11250 = 16900 \text{ вт/(м}^2 \cdot \text{град)}.$$

Термическое сопротивление клевого шва соединения гильза—корпус,

$$R_{\text{шва}} = \frac{1}{\alpha_{\text{шва}}} = \frac{1}{16900} = 0,592 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{град/вт}.$$

ТАБЛИЦЫ РАСЧЕТНЫХ И ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Исследуемая контактная пара Д1Т—Д1Т; обработка поверхностей  $\nabla 4$ — $\nabla 7a$  при начальном и последующем приложениях нагрузки; межконтактная среда—воздух;  
 $T_x = 414^\circ \text{K}$

| $p \cdot 10^{-3}$ ,<br>н/м <sup>2</sup> | Первоначальное нагружение                       |            |   |   |   |  |  |   |
|---|---|------------|---|---|---|--|--|---|
|   | Результаты приближенного теоретического расчета |            |   |   |   |  |  |   |
|   | $\gamma_a \cdot 10^3$                           | $\epsilon$ | $\alpha_k \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{жс}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт | $\alpha_c \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{с}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{жк}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт |
| 9,8                                     | 0,723   | 0,0716     | 21,30   | 4,7   | 12,55   | 7,97   | 33,85  | 2,96  |
| 24,5                                    | 1,86  | 0,0925     | 54,60   | 1,835   | 12,80   | 7,82   | 67,40  | 1,495   |
| 49                                      | 3,6   | 0,112      | 106,00  | 0,945   | 13,10   | 7,64   | 119,10   | 0,81  |
| 73,5                                    | 5,25  | 0,126      | 154,00  | 0,65  | 13,40   | 7,47   | 167,40   | 0,598   |
| 98                                      | 8,07  | 0,136      | 201,00  | 0,497   | 13,60   | 7,36   | 214,60   | 0,467   |
| 147                                     | 9,73  | 0,153      | 286,00  | 0,35  | 13,80   | 7,25   | 299,80   | 0,331   |
| 196                                     | 12,6  | 0,165      | 371,00  | 0,269   | 13,95   | 7,17   | 384,95   | 0,26  |
| 294                                     | 17,85   | 0,185      | 523,00  | 0,191   | 14,30   | 7  | 537,30   | 0,186   |

Продолжение табл. II-1

| $p \cdot 10^{-3}$ ,<br>н/м <sup>2</sup> | Первоначальное нагружение                |                    |   |   | Последующее нагружение                   |                 |   |   |
|---|--|--------------------|---|---|--|-----------------|---|---|
|   | Результаты эксперимента                  |                    |   |   |  |                 |   |   |
|   | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup> | $\Delta T$ ,<br>°C | $\alpha_k \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{жс}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup> | $\Delta T$ , °C | $\alpha_{\text{жс}} \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{жс}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт |
| 9,8                                     | 63,5                                     | 17,9               | 35,50   | 2,82  | 66,7                                     | 12,2            | 54,70   | 1,83  |
| 24,5                                    | 85,8                                     | 13,1               | 65,50   | 1,528   | 82                                       | 9,6             | 85,50   | 1,171   |
| 49                                      | 92,5                                     | 9,5                | 97,30   | 1,028   | 87,5                                     | 6,5             | 134,50  | 0,743   |
| 73,5                                    | 111,3                                    | 7,8                | 146,00  | 0,687   | 96,5                                     | 5,5             | 175,00  | 0,572   |
| 98                                      | 110                                      | 6,3                | 175,00  | 0,572   | 98,6                                     | 4,5             | 219,00  | 0,457   |
| 147                                     | 114,5                                    | 4,9                | 233,00  | 0,428   | 99                                       | 3,4             | 292,00  | 0,343   |
| 196                                     | 118                                      | 4,2                | 281,00  | 0,356   | 108                                      | 3,1             | 350,00  | 0,286   |
| 294                                     | 120,5                                    | 3,0                | 402,00  | 0,249   | 118                                      | 2,2             | 538,00  | 0,186   |



Таблица II-2

Исследуемая контактная пара сталь 45 — сталь 45; обработка поверхностей  $\nabla 4$ — $\nabla 76$  при начальном и последующем приложениях нагрузки; межконтактная среда — воздух;  
 $T_K = 420^\circ \text{K}$

| $P \cdot 10^{-3}$ ,<br>Н/м <sup>2</sup> | Первоначальное нагружение                       |            |   |   |   |   |   |   |
|---|---|------------|---|---|---|---|---|---|
|   | Результаты приближенного теоретического расчета |            |   |   |   |   |   |   |
|   | $\eta \cdot 10^3$                               | $\epsilon$ | $\alpha_M \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_M \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт | $\alpha_C \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_C \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт | $\alpha_K \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_K \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт |
| 9,8                                     | 0,225   | 0,0638     | 2,27  | 44  | 20,30   | 4,93  | 22,57   | 4,43  |
| 24,5                                    | 0,503   | 0,0832     | 5,12  | 19,5  | 20,90   | 4,78  | 26,02   | 3,85  |
| 49                                      | 0,965   | 0,1        | 9,70  | 10,3  | 21,40   | 4,68  | 31,10   | 3,22  |
| 73,5                                    | 1,5   | 0,112      | 15,10   | 6,62  | 21,70   | 4,62  | 36,80   | 2,720   |
| 98                                      | 2,03  | 0,12       | 20,30   | 4,93  | 21,90   | 4,57  | 42,20   | 2,37  |
| 147                                     | 3,06  | 0,13       | 30,70   | 3,26  | 22,20   | 4,51  | 52,90   | 1,89  |
| 196                                     | 4,23  | 0,148      | 44,20   | 2,27  | 22,60   | 4,43  | 66,80   | 1,5   |
| 294                                     | 6,12  | 0,166      | 61,60   | 1,625   | 23,10   | 4,33  | 84,70   | 1,18  |

Продолжение табл. II-2

| $P \cdot 10^{-3}$ ,<br>Н/м <sup>2</sup> | Первоначальное нагружение                |                 |   |   | Последующее нагружение                   |                 |   |   |
|---|--|-----------------|---|---|--|-----------------|---|---|
|   | Результаты эксперимента                  |                 |   |   |  |                 |   |   |
|   | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup> | $\Delta T$ , °C | $\alpha_K \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_K \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup> | $\Delta T$ , °C | $\alpha_K \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_K \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт |
| 9,8                                     | 59,3                                     | 28,1            | 21,10   | 4,75  | 60,2                                     | 21,2            | 28,50   | 3,52  |
| 24,5                                    | 62,8                                     | 26,8            | 23,50   | 4,27  | 64                                       | 20              | 32,0  | 3,13  |
| 49                                      | 79                                       | 25,2            | 31,30   | 3,2   | 71,2                                     | 18,6            | 38,2  | 2,62  |
| 73,5                                    | 82                                       | 21,8            | 37,70   | 2,66  | 80,3                                     | 17,1            | 47  | 2,13  |
| 98                                      | 91                                       | 20,4            | 44,50   | 2,25  | 85,5                                     | 16              | 53,50   | 1,87  |
| 147                                     | 104                                      | 18,3            | 56,80   | 1,76  | 108,3                                    | 13,8            | 78,50   | 1,275   |
| 196                                     | 104                                      | 15,6            | 66,70   | 1,5   | 119                                      | 12              | 99  | 1,01  |
| 294                                     | 106                                      | 13              | 83,30   | 1,2   | —  | —               | —   | —   |

Исследуемая контактная пара Д1 — сталь 45; обработка

 $\frac{V}{\sqrt{7a}} - \sqrt{8}$  впри наличии волнистости; среда — воздух; $T_{\text{ж}} = 423 \text{ }^\circ\text{K}$ 

| $p \cdot 10^{-5}$ ,<br>кг/м <sup>2</sup> | Результаты теоретического расчета             |   |          |          |                     |  |  |
|--|---|---|----------|----------|---------------------|--|--|
|  | $S_{\text{к}} \cdot 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> | $q_{\text{к}} \cdot 10^{-5}$ ,<br>кг/м <sup>2</sup> | $\eta_1$ | $\eta_2$ | $\eta_3 \cdot 10^3$ | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-2}$ ,<br>Вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/Вт |
| 9,8                                      | 8,9   | 76,8  | 0,0612   | 0,0127   | 0,78                | 1,25   | 80,0   |
| 24,5                                     | 16,53   | 103,5   | 0,0812   | 0,0237   | 1,92                | 3,08   | 32,4   |
| 49                                       | 26,2  | 131,0   | 0,0997   | 0,0375   | 3,73                | 5,98   | 16,7   |
| 73,5                                     | 34,2  | 150,0   | 0,113    | 0,0489   | 5,53                | 8,86   | 11,3   |
| 98                                       | 41,5  | 165,0   | 0,123    | 0,0593   | 7,27                | 11,60  | 8,6  |
| 147                                      | 54,4  | 189,0   | 0,159    | 0,0778   | 10,8                | 173,0  | 5,8  |
| 196                                      | 66  | 208,0   | 0,150    | 0,0943   | 14,1                | 225,0  | 4,44   |
| 245                                      | 76,5  | 224,0   | 0,161    | 0,109    | 17,6                | 282,0  | 3,55   |
| 294                                      | 86,4  | 238,0   | 0,170    | 0,123    | 21,0                | 336,0  | 2,98   |

Продолжение табл. 11-3

| $p \cdot 10^{-5}$ ,<br>кг/м <sup>2</sup> | Результаты теоретического расчета                                |  |  |  | Результаты эксперимента                  |                 |  |  |
|--|--|--|--|--|--|-----------------|--|--|
|  | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-2}$ ,<br>Вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/Вт | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-2}$ ,<br>Вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/Вт | $q \cdot 10^{-5}$ ,<br>кг/м <sup>2</sup> | $\Delta T$ , °C | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-2}$ ,<br>Вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/Вт |
| 9,8                                      | 55,5   | 1,80   | 56,75  | 1,76   | 79                                       | 17,3            | 45,5   | 2,20   |
| 24,5                                     | 56,8   | 1,76   | 59,90  | 1,67   | 84                                       | 15,1            | 55,5   | 1,80   |
| 49                                       | 57,8   | 1,73   | 63,78  | 1,57   | 85                                       | 14,0            | 60,6   | 1,65   |
| 73,5                                     | 58,5   | 1,71   | 67,36  | 1,48   | 87                                       | 13,0            | 66,7   | 1,50   |
| 98                                       | 58,5   | 1,70   | 70,50  | 1,42   | 91                                       | 11,8            | 77,0   | 1,30   |
| 147                                      | 59,8   | 1,67   | 77,10  | 1,30   | 95                                       | 10,9            | 87,0   | 1,15   |
| 196                                      | 60,2   | 1,65   | 82,70  | 1,21   | 97                                       | 9,2             | 105,2  | 0,95   |
| 245                                      | 60,0   | 1,64   | 89,10  | 1,12   | 99                                       | 8,9             | 111,0  | 0,90   |
| 294                                      | 61,0   | 1,63   | 94,60  | 1,05   | 101                                      | 8,6             | 117,8  | 0,85   |

Исследуемая контактная пара сталь 45—сталь 45, обработка поверхностей  $\nabla 86$ — $\nabla 9a$  при наличиимакронеровности порядка  $\left(\frac{d_{\text{зав}}}{8}\right) \cdot 10^6 = 70$ ; среда—воздух;  $T_{\text{ж}} = 376^\circ\text{K}$ 

| $p \cdot 10^4 \text{ н/м}^2$ | Результаты приближенного теоретического расчета |                                      |                     |                     |                     |                     |   |  |   |   | Результаты эксперимента             |                            |  |
|------------------------------|---|--------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---|--|---|---|-------------------------------------|----------------------------|--|
|                              | $S \cdot 10^6 \text{ н}^2$                      | $\delta \cdot 10^{-4} \text{ н/н}^2$ | $\sigma \cdot 10^3$ | $\sigma \cdot 10^3$ | $\sigma \cdot 10^3$ | $\sigma \cdot 10^3$ | $R_{\text{н}} \cdot 10^4 \text{ н}^2/\text{см}^2$ | $\alpha \cdot 10^{-2} \text{ нм}/(\text{н}^2 \cdot \text{см}^2)$ | $R_{\text{н}} \cdot 10^4 \text{ н}^2/\text{см}^2$ | $R_{\text{н}} \cdot 10^4 \text{ н}^2/\text{см}^2$ | $\tau \cdot 10^{-2} \text{ нм/н}^2$ | $\Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha \cdot 10^{-2} \text{ нм}/(\text{н}^2 \cdot \text{см}^2)$ |
| 9,8                          | 26,3  | 261                                  | 9,55                | 37,6                | 0,359               | 3,72                | 26,9  | 43,52  | 2,3   | 54,3  | 14,5                                | 37,5                       | 2,67   |
| 24,5                         | 48,9  | 351                                  | 12,1                | 69,8                | 0,845               | 8,66                | 11,55   | 48,46  | 2,07  | 55  | 13,2                                | 41,7                       | 2,4  |
| 49                           | 78  | 441                                  | 14,4                | 111                 | 1,6                 | 16,40               | 6,11  | 56,20  | 1,89  | 60,2  | 11,8                                | 51,1                       | 1,96   |
| 73,5                         | 101   | 510                                  | 16,35               | 144,5               | 2,36                | 24,20               | 4,14  | 64,00  | 1,57  | 62  | 10,6                                | 58,5                       | 1,71   |
| 98                           | 123   | 558                                  | 17,8                | 176                 | 3,14                | 32,20               | 3,11  | 72,00  | 1,39  | 65,8  | 10                                  | 65,8                       | 1,52   |
| 147                          | 160   | 645                                  | 19,9                | 229                 | 4,55                | 46,80               | 2,14  | 86,60  | 1,155   | 71,5  | 9,4                                 | 76                         | 1,315  |
| 196                          | 195   | 705                                  | 20,9                | 279                 | 5,83                | 60,00               | 1,67  | 99,80  | 1,01  | 77,5  | 8,9                                 | 87                         | 1,15   |
| 245                          | 224   | 766                                  | 22,6                | 321                 | 7,24                | 74,20               | 1,35  | 114,60   | 0,88  | 80,6  | 8,4                                 | 96,3                       | 1,04   |
| 294                          | 257   | 800                                  | 23,4                | 368                 | 8,6                 | 88,20               | 1,135   | 128,00   | 0,79  | 81,7  | 8                                   | 102                        | 0,98   |

Таблица II-5

Результаты эксперимента. Исследуемая контактная пара  
 М2—сталь 45; обработка поверхностей  $\sqrt{8a}$ — $\sqrt{3}$ ; среда—воздух;  
 выдержка под нагрузкой 120 ч;  $T_k=468^\circ \text{K}$ ;  $p=98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$

| $\tau, \text{ч}$ | $q \cdot 10^{-3}, \text{вт/м}^2$ | $\Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha_k \cdot 10^{-2}, \text{вт/(м}^2 \times \text{Хград)}$ | $R_k \cdot 10^4, \text{м}^2 \cdot \text{град/вт}$ | Примечание   |
|------------------|----------------------------------|----------------------------|---|---|--|
| 8                | 75,6                             | 19,8                       | 38,2  | 2,62  | В конце опыта визуально наблюдалось образование окисной пленки на медном образце |
| 16               | 79,5                             | 16,9                       | 47,2  | 2,125   |  |
| 24               | 82,5                             | 14,75                      | 56  | 1,79  |  |
| 32               | 85,6                             | 16,6                       | 51,6  | 1,94  |  |
| 40               | 88                               | 13,7                       | 64,2  | 1,558   |  |
| 56               | 93,5                             | 14,2                       | 65,8  | 1,52  |  |
| 64               | 81,7                             | 12,5                       | 65,5  | 1,53  |  |
| 72               | 78,8                             | 13,2                       | 59,8  | 1,675   |  |
| 80               | 83,8                             | 13,8                       | 60,8  | 1,65  |  |
| 88               | 91,5                             | 14                         | 65,4  | 1,53  |  |
| 96               | 87,3                             | 14,4                       | 60,7  | 1,65  |  |
| 104              | 86                               | 14,6                       | 58,4  | 1,7   |  |
| 108              | 89                               | 14                         | 63,8  | 1,57  |  |
| 113              | 92                               | 14,7                       | 62,6  | 1,6   |  |
| 120              | 97                               | 16                         | 60,7  | 1,65  |  |

Таблица II-6

Результаты эксперимента. Исследуемая контактная пара  
 2Х13—2Х13; обработка поверхностей  $\sqrt{4}$ — $\sqrt{7a}$ ; среда—воздух;  
 выдержка под нагрузкой 180 ч;  $T_k=470^\circ \text{K}$ ;  $p=98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$

| $\tau, \text{ч}$ | $q \cdot 10^{-3}, \text{вт/м}^2$ | $\Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha_k \cdot 10^{-2}, \text{вт/(м}^2 \times \text{Хград)}$ | $R_k \cdot 10^4, \text{м}^2 \cdot \text{град/вт}$ |
|------------------|----------------------------------|----------------------------|---|---|
| 8                | 71,0                             | 18,1                       | 39,2  | 2,55  |
| 16               | 78,5                             | 16,5                       | 47,7  | 2,10  |
| 24               | 80,0                             | 16,0                       | 50,0  | 2,00  |
| 32               | 79,0                             | 13,8                       | 57,3  | 1,75  |
| 40               | 79,5                             | 14,3                       | 55,6  | 1,80  |
| 56               | 79,5                             | 12,8                       | 62,5  | 1,60  |
| 64               | 78,0                             | 14,0                       | 55,6  | 1,80  |
| 80               | 79,6                             | 13,5                       | 59,0  | 1,70  |
| 100              | 79,0                             | 12,6                       | 62,5  | 1,60  |
| 120              | 75,6                             | 13,6                       | 55,6  | 1,80  |
| 136              | 75,3                             | 12,8                       | 59,0  | 1,70  |
| 160              | 75,8                             | 12,4                       | 60,7  | 1,65  |
| 180              | 77,0                             | 12,7                       | 60,7  | 1,65  |

Таблица II-7

Результаты эксперимента. Исследуемая контактная пара Д16Т—Д16Т; обработка поверхностей  $\nabla 8$ — $\nabla 8$ ; среда—воздух;  $T_{\text{ж}}=395^{\circ}\text{K}$

| $p \cdot 10^{-3}$ ,<br>к/м <sup>2</sup> | На контактных поверхностях отсутствует окисная пленка |                 |  |  | На контактных поверхностях имеется окисная пленка толщиной $\delta=510 \text{ \AA}$ |                 |  |  |
|---|---|-----------------|--|--|---|-----------------|--|--|
|   | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup>              | $\Delta T$ , °C | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup>  | $\Delta T$ , °C | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт |
| 9,8                                     | 74,4  | 5,8             | 128  | 0,78   | 70,5  | 8,1             | 87,0   | 1,15   |
| 24,5                                    | 78,8  | 4,9             | 159  | 0,63   | 70,2  | 7,3             | 96,0   | 1,04   |
| 49                                      | 80,0  | 4,0             | 200  | 0,50   | 71,2  | 6,7             | 106,4  | 0,94   |
| 73,5                                    | 83,8  | 3,1             | 270  | 0,37   | 72,0  | 6,1             | 117,6  | 0,85   |
| 98                                      | 92,0  | 2,3             | 400  | 0,25   | 72,3  | 5,7             | 125,0  | 0,80   |
| 147                                     | 106,0   | 1,7             | 625  | 0,16   | 72,6  | 5,1             | 143,0  | 0,70   |
| 196                                     | 115,0   | 1,5             | 770  | 0,13   | 73,0  | 4,9             | 149,5  | 0,67   |
| 294                                     | 118,0   | 1,3             | 910  | 0,11   | 74,0  | 4,6             | 159,0  | 0,63   |

Таблица II-8

Результаты эксперимента. Исследуемая контактная пара сталь 45—сталь 45; обработка поверхностей  $\nabla 4$ — $\nabla 4$ ; среда—воздух;  $T_{\text{ж}}=375^{\circ}\text{K}$

| $p \cdot 10^{-3}$ ,<br>к/м <sup>2</sup> | В зоне контакта воздух                   |                 |  |  | Контактные поверхности покрыты медью, $\delta=50 \text{ мкм}$ |                 |  |  |
|---|--|-----------------|--|--|---|-----------------|--|--|
|   | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup> | $\Delta T$ , °C | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup>                      | $\Delta T$ , °C | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт |
| 9,8                                     | 34,9                                     | 21,6            | 16,15  | 6,2  | 42  | 15,1            | 27,8   | 3,6  |
| 24,5                                    | 40                                       | 20,5            | 19,5   | 5,13   | 47,8  | 13,7            | 34,9   | 2,87   |
| 49                                      | 42                                       | 19,8            | 21,1   | 4,73   | 60  | 12              | 50   | 2  |
| 98                                      | 48,9                                     | 19,2            | 25,5   | 3,93   | 68,6  | 9,8             | 70   | 1,43   |
| 147                                     | 64                                       | 17,5            | 36,7   | 2,73   | 69,7  | 9,3             | 75   | 1,335  |
| 196                                     | 67                                       | 16,1            | 41,7   | 2,4  | 78,2  | 8,1             | 96,7   | 1,035  |
| 294                                     | 77,5                                     | 15,5            | 50   | 2  | 81  | 7,3             | 111  | 0,9  |
| 392                                     | 83,5                                     | 13,9            | 60   | 1,665  | 102   | 6,8             | 176,5  | 0,567  |
| 490                                     | 80,5                                     | 13,1            | 61,3   | 1,635  | 105   | 4,9             | 91,5   | 0,466  |
| 588                                     | 77                                       | 12,3            | 62,5   | 1,6  | 94  | 4,7             | 200  | 0,5  |

| $p \cdot 10^{-3},$<br>$\text{H}/\text{M}^2$ | Контактные поверхности покрыты кадмием, $\delta=60 \text{ мкм}$ |                            |  |  | Контактные поверхности покрыты свинцом, $\delta=60 \text{ мкм}$ |                            |  |  |
|---|---|----------------------------|--|--|---|----------------------------|--|--|
|   | $q \cdot 10^{-3},$<br>$\text{вт}/\text{M}^2$                    | $\Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-2},$<br>$\text{вт}/(\text{M}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{рад})$ | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4,$<br>$\text{M}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}$ | $q \cdot 10^{-3},$<br>$\text{вт}/\text{M}^2$                    | $\Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-2},$<br>$\text{вт}/(\text{M}^2 \cdot \text{град})$ | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4,$<br>$\text{M}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}$ |
| 9,8   | 42,2  | 12,2                       | 34,5   | 2,9  | 41,5  | 9,7                        | 42,8   | 2,34   |
| 24,5  | 48,5  | 11                         | 44,1   | 2,27   | 53,2  | 8,1                        | 68,3   | 1,465  |
| 49  | 62  | 8,9                        | 70   | 1,435  | 68,2  | 7,5                        | 91   | 1,1  |
| 98  | 41  | 7,8                        | 91   | 1,1  | 80,7  | 3,5                        | 231  | 0,433  |
| 147   | 78,7  | 4,2                        | 187,5  | 0,533  | 105   | 2,1                        | 500  | 0,2  |
| 196   | 80,9  | 3,5                        | 231  | 0,433  | 112,5   | 1,5                        | 750  | 0,1335   |
| 245   | —   | —                          | —  | —  | 105   | 1,4                        | 752  | 0,133  |
| 294   | 105   | 2,8                        | 375  | 0,267  | 109   | 1,2                        | 910  | 0,11   |
| 392   | 112   | 2,6                        | 430  | 0,233  | —   | —                          | —  | —  |
| —   | —   | —                          | —  | —  | —   | —                          | —  | —  |

Таблица II-9

Результаты эксперимента. Исследуемая контактная пара ВК8—сталь 45; обработка поверхностей  $\nabla 5-\nabla 4$ ; среда—воздух  $T_{\text{ж}}=393 \text{ } ^\circ\text{K}$

| $p \cdot 10^{-5},$<br>$\text{H}/\text{M}^2$ | В зоне контакта воздух                       |                            |  |  | В зоне контакта кадмиевая прокладка, $\delta=0,08 \text{ мм}$ |                            |
|---|--|----------------------------|--|--|---|----------------------------|
|   | $q \cdot 10^{-3},$<br>$\text{вт}/\text{M}^2$ | $\Delta T, ^\circ\text{C}$ | $\alpha_{\text{ж}} \cdot 10^{-2},$<br>$\text{вт}/(\text{M}^2 \cdot \text{град})$ | $R_{\text{ж}} \cdot 10^4,$<br>$\text{M}^2 \cdot \text{град}/\text{вт}$ | $q \cdot 10^{-3},$<br>$\text{вт}/\text{M}^2$                  | $\Delta T, ^\circ\text{C}$ |
| 9,8   | 33,7   | 20,8                       | 16,2   | 6,17   | 34,6  | 16,6                       |
| 24,5  | —  | —                          | —  | —  | 40  | 14,8                       |
| 49  | 46,3   | 17,8                       | 26   | 3,85   | 44,7  | 13,6                       |
| 98  | 55   | 14,5                       | 38   | 2,63   | 57,6  | 11,8                       |
| 171,5                                       | 62   | 13                         | 47,7   | 2,1  | 65,7  | 9,1                        |
| 196   | 63,5   | 10,8                       | 59   | 1,7  | 73,5  | 7,9                        |
| 294   | 70,8   | 9,2                        | 77   | 1,3  | 85  | 5,3                        |
| 392   | 81   | 8,7                        | 93   | 1,075  | —   | —                          |

| $p \cdot 10^{-3}$ ,<br>н/м <sup>2</sup> | В зоне контакта кадмие-<br>вая прокладка, $\delta=0,08$ мм |   | В зоне контакта свинцовая прокладка,<br>$\delta=0,1$ мм |                 |   |   |
|---|--|---|---|-----------------|---|---|
|   | $\alpha_k \cdot 10^{-2}$ ,<br>см/(м <sup>2</sup> ·град)    | $R_k \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/см | $q \cdot 10^{-3}$ , вт/м <sup>2</sup>                   | $\Delta T$ , °C | $\alpha_k \cdot 10^{-2}$ ,<br>см/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_k \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/см |
| 9,8                                     | 20,9   | 4,8   | 36,8  | 14,8            | 24,9  | 4,025   |
| 24,5                                    | 27,1   | 3,7   | 45,1  | 11,9            | 37,8  | 2,65  |
| 49                                      | 32,8   | 3,05  | 50,3  | 9,8             | 51,3  | 1,95  |
| 98                                      | 48,8   | 2,05  | 50,2  | 7,7             | 77  | 1,3   |
| 171,5                                   | 72,2   | 1,385   | 65  | 5,2             | 125   | 0,8   |
| 196                                     | 93   | 1,075   | 70,8  | 4,6             | 154   | 0,65  |
| 294                                     | 160  | 0,625   | 86,7  | 2,6             | 333   | 0,3   |
| 392                                     | —  | —   | —   | —               | —   | —   |

Таблица 11-10

Результаты эксперимента. Исследуемая контактная пара  
1X18N9T—1X18N9T, обработка поверхностей  $\nabla 5$ — $\nabla 5$ ;  
 $T_k=378$  °K

| $p \cdot 10^{-3}$ ,<br>н/м <sup>2</sup> | В зоне контакта воздух                |                 |   |   | В зоне контакта графитовый<br>порошок |                 |   |   |
|---|---------------------------------------|-----------------|---|---|---------------------------------------|-----------------|---|---|
|   | $q \cdot 10^{-3}$ , вт/м <sup>2</sup> | $\Delta T$ , °C | $\alpha_k \cdot 10^{-2}$ ,<br>см/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_k \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/см | $q \cdot 10^{-3}$ , вт/м <sup>2</sup> | $\Delta T$ , °C | $\alpha_k \cdot 10^{-2}$ ,<br>см/(м <sup>2</sup> ·град) | $R_k \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/см |
| 9,8                                     | 30,6                                  | 18,9            | 16,2  | 6,17  | 42,3                                  | 13,9            | 31,4  | 3,29  |
| 24,5                                    | 32,4                                  | 17,1            | 18,9  | 5,28  | 44,1                                  | 12,6            | 35,0  | 2,86  |
| 49                                      | 34,3                                  | 15,9            | 21,5  | 4,64  | 45,9                                  | 11,8            | 38,9  | 2,57  |
| 73,5                                    | 37,2                                  | 14,5            | 25,7  | 3,9   | 46,8                                  | 10,1            | 46,7  | 2,14  |
| 98                                      | 38,3                                  | 13,8            | 27,8  | 3,6   | 47,6                                  | 9,5             | 50,0  | 2,0   |
| 147                                     | 39,9                                  | 12,5            | 31,9  | 3,14  | 47,8                                  | 8,9             | 53,8  | 1,86  |
| 196                                     | 41,0                                  | 11,7            | 35,0  | 2,86  | 49,0                                  | 8,1             | 60,6  | 1,65  |

| $p \cdot 10^{-5}$ ,<br>кг/м <sup>2</sup> | В зоне контакта глицерин                 |                 |  |   | В зоне контакта глицерин и<br>20% графита по весу |                 |  |   |
|--|--|-----------------|--|---|---|-----------------|--|---|
|  | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup> | $\Delta T$ , °C | $\alpha_{ж} \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·X<br>Х·град) | $R_{ж} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup>          | $\Delta T$ , °C | $\alpha_{ж} \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·X<br>Х·град) | $R_{ж} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт |
| 9,8                                      | 47,2                                     | 11,8            | 40,0   | 2,5   | 67,5  | 8,7             | 77,5   | 1,29  |
| 24,5                                     | 49,6                                     | 10,6            | 46,8   | 2,14  | 68,0  | 8,5             | 80,0   | 1,25  |
| 49                                       | 50,5                                     | 10,1            | 50,0   | 2,0   | 71,0  | 7,4             | 96,2   | 1,04  |
| 73,5                                     | 52,5                                     | 9,7             | 53,8   | 1,86  | 72,0  | 7,2             | 100,0  | 1,0   |
| 98                                       | 52,7                                     | 9,2             | 57,2   | 1,75  | 71,0  | 7,1             | 100,0  | 1,0   |
| 147                                      | 53,3                                     | 9,1             | 58,5   | 1,71  | 83,0  | 6,8             | 122,0  | 0,82  |
| 196                                      | 54,2                                     | 9,2             | 58,8   | 1,70  | 86,7  | 6,5             | 133,5  | 0,75  |

Таблица II-11

Результаты эксперимента. Исследуемая контактная пара  
сталь 45—сталь 45; обработка поверхностей  $\nabla 86—\nabla 9a$   
с неплоскостью порядка  $\frac{\delta_{эжв}}{b} \cdot 10^5 = 70$ ;  $T_{ж} = 375$  К

| $p \cdot 10^{-5}$ ,<br>кг/м <sup>2</sup> | В зоне контакта углекислый газ           |                 |  |   | В зоне контакта воздух                   |                 |
|--|--|-----------------|--|---|--|-----------------|
|  | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup> | $\Delta T$ , °C | $\alpha_{ж} \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·X<br>Х·град) | $R_{ж} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup> | $\Delta T$ , °C |
| 9,8                                      | 53,2                                     | 18,1            | 29,4   | 3,4   | 55,7                                     | 15,6            |
| 24,5                                     | 56,0                                     | 16,8            | 33,4   | 3,0   | 60,3                                     | 14,5            |
| 49                                       | 65,0                                     | 14,3            | 45,5   | 2,2   | 64,5                                     | 12,9            |
| 98                                       | 75,2                                     | 12,8            | 58,9   | 1,7   | 67,6                                     | 10,8            |
| 147                                      | 80,0                                     | 11,2            | 71,5   | 1,4   | 74,3                                     | 9,3             |
| 196                                      | 85,0                                     | 10,2            | 83,2   | 1,2   | 76,4                                     | 8,4             |
| 294                                      | 87,0                                     | 8,7             | 100,0  | 1,0   | 78,9                                     | 7,1             |

Продолжение табл. II-11

| $p \cdot 10^{-5}$ ,<br>кг/м <sup>2</sup> | В зоне контакта воздух   |   | В зоне контакта водород                  |                 |   |   |
|--|--|---|--|-----------------|---|---|
|  | $\alpha_{ж} \cdot 10^{-2}$ ,<br>вт/(м <sup>2</sup> ·X<br>Х·град) | $R_{ж} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт | $q \cdot 10^{-3}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup> | $\Delta T$ , °C | $\alpha_{ж} \cdot 10^{-2}$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт | $R_{ж} \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> ·град/вт |
| 9,8                                      | 35,7   | 2,8   | 113,5                                    | 5,1             | 223   | 0,45  |
| 24,5                                     | 41,7   | 2,4   | 113,6                                    | 4,2             | 271   | 0,37  |
| 49                                       | 50,0   | 2,0   | 118,8                                    | 3,8             | 312   | 0,32  |
| 98                                       | 62,6   | 1,6   | 121,4                                    | 3,4             | 357   | 0,28  |
| 147                                      | 80,0   | 1,25  | 123,3                                    | 3,2             | 385   | 0,26  |
| 196                                      | 91,0   | 1,1   | 125,0                                    | 3,0             | 417   | 0,24  |
| 294                                      | 111,0  | 0,9   | 121,0                                    | 2,9             | 417   | 0,24  |



Результаты эксперимента. Исследуемая контактная пара  
Д16Г—Д16Т; обработка поверхностей  $\nabla$ 6а— $\nabla$ 6а.

| $P_{отв} \cdot 10^{-5}, \text{ кг/см}^2$ | В зоне контакта воздух,<br>$T_{отв} = 333^\circ \text{ К}$ |                             |  |  | В зоне контакта высоковязкий клей<br>ВК-3. Образцы предварительно обжи-<br>мались под нагрузкой |                                    |                             |  |  |
|--|--|-----------------------------|--|--|---|------------------------------------|-----------------------------|--|--|
|  | $q \cdot 10^{-3}, \text{ вт/см}^2$                         | $\Delta T, ^\circ \text{C}$ | $\alpha_{шва} \cdot 10^{-2},$<br>$\text{вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ | $R_{шва} \cdot 10^4,$<br>$\text{м}^2 \cdot \text{град/см}$ | $P_{отв} \cdot 10^{-5}, \text{ кг/см}^2$  | $q \cdot 10^{-3}, \text{ вт/см}^2$ | $\Delta T, ^\circ \text{C}$ | $\alpha_{шва} \cdot 10^{-2},$<br>$\text{вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ | $R_{шва} \cdot 10^4,$<br>$\text{м}^2 \cdot \text{град/см}$ |
| 2  | 54,6   | 12,7                        | 43   | 2,33   | 2   | 33,2                               | 29,2                        | 11,35  | 8,8  |
| 4  | 57   | 11,1                        | 51,3   | 1,95   | 4   | 33,9                               | 27,8                        | 12,2   | 8,2  |
| 6  | 58,7   | 9,5                         | 61,8   | 1,62   | 8   | 37,2                               | 25,1                        | 14,85  | 6,75   |
| 10                                       | 65,2   | 8,8                         | 74,2   | 1,35   | 10  | 39                                 | 21,8                        | 17,9   | 5,6  |
| 15                                       | 87,3   | 7,5                         | 116,2  | 0,86   | 15  | 47,5                               | 17,6                        | 27,1   | 3,7  |
| 20                                       | 90,3   | 6,5                         | 139,2  | 0,72   | 20  | 53,7                               | 14,2                        | 37,8   | 2,65   |

Продолжение табл. 11-12

| $P_{отв} \cdot 10^{-5}, \text{ кг/см}^2$ | В зоне контакта маловяз-<br>кий клей ВК-1. Образцы<br>предварительно обжима-<br>лись |                             |  |  | Результаты приближенного расчета |  |  |  |  |  |  |
|--|--|-----------------------------|--|--|----------------------------------|--|--|--|--|--|--|
|  | $q \cdot 10^{-3}, \text{ вт/см}^2$   | $\Delta T, ^\circ \text{C}$ | $\alpha_{шва} \cdot 10^{-2},$<br>$\text{вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ | $R_{шва} \cdot 10^4,$<br>$\text{м}^2 \cdot \text{град/см}$ | $\eta$                           | $\alpha_{шва} \cdot 10^{-2},$<br>$\text{вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ | $R_{шва} \cdot 10^4,$<br>$\text{м}^2 \cdot \text{град/см}$ | $\alpha_{шва} \cdot 10^{-2},$<br>$\text{вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ | $R_{шва} \cdot 10^4,$<br>$\text{м}^2 \cdot \text{град/см}$ | $\alpha_{шва} \cdot 10^{-2},$<br>$\text{вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ | $R_{шва} \cdot 10^4,$<br>$\text{м}^2 \cdot \text{град/см}$ |
| 2  | 71,2   | 5,7                         | 125  | 0,8  | 0,000457                         | 17,3   | 5,78   |  |  | 196,3  | 0,51   |
| 1  | 80   | 4,8                         | 167  | 0,6  | 0,000812                         | 30,4   | 3,24   |  |  | 209,4  | 0,478  |
| 6  | 86   | 4,3                         | 200  | 0,5  | 0,00112                          | 42,6   | 2,35   |  |  | 221,6  | 0,452  |
| 10                                       | 87,5   | 3,5                         | 250  | 0,4  | 0,0017                           | 64,5   | 1,55   | 179  | 0,56   | 243,5  | 0,411  |
| 15                                       | 91   | 3,3                         | 286  | 0,35   | 0,00234                          | 88,8   | 1,125  |  |  | 267,8  | 0,374  |
| 20                                       | 103,5  | 3,1                         | 333  | 0,3  | 0,00288                          | 109,5  | 0,913  |  |  | 288,5  | 0,351  |

**ПРИЛОЖЕНИЕ III**  
**СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ**

Таблица III-1

**Классы чистоты обработки поверхности (ГОСТ 2789-59)**

| Класс чистоты поверхности | Разряд | Высота неровностей $H_{ср}$ , мкм, не более | Газовая длина $l_g$ , мм |
|---------------------------|--------|---|--------------------------|
| 1                         | —      | 320   | 8                        |
| 2                         | —      | 160   |                          |
| 3                         | —      | 80  |                          |
| 4                         | —      | 40  | 2,5                      |
| 5                         | —      | 20  |                          |
| 6                         | а      | 10  | 0,8                      |
|                           | б      | 8   |                          |
|                           | а      | 6,3   |                          |
| 7                         | б      | 5,0   |                          |
|                           | в      | 4,0   |                          |
|                           | а      | 3,2   |                          |
| 8                         | б      | 2,5   |                          |
|                           | в      | 2,0   |                          |
|                           | 9      | а   |                          |
| б                         |        | 1,25  |                          |
| в                         |        | 1,0   |                          |
| 10                        | а      | 0,8   |                          |
|                           | б      | 0,63  |                          |
|                           | в      | 0,5   |                          |
| 11                        | а      | 0,4   |                          |
|                           | б      | 0,32  |                          |
|                           | в      | 0,25  |                          |
| 12                        | а      | 0,2   |                          |
|                           | б      | 0,16  |                          |
|                           | в      | 0,125                                       |                          |
| 13                        | а      | 0,1   | 0,08                     |
|                           | б      | 0,08  |                          |
|                           | в      | 0,063                                       |                          |
| 14                        | а      | 0,05  |                          |
|                           | б      | 0,04  |                          |
|                           | в      | 0,032                                       |                          |

Таблица III-2

**Классификация волнистости поверхности [Л. 80]**

| Класс волнистости                                  | I | II | III | IV | V  | VI | VII | VIII | IX          |
|--|---|----|-----|----|----|----|-----|------|-------------|
| Верхний предел высоты волн $H_{в}$ , мкм . . . . . | 1 | 2  | 4   | 8  | 16 | 32 | 64  | 125  | 250 и более |

**Предельные отклонения формы цилиндрических  
поверхностей [Л. 53] (по ГОСТ 10356-63)**

| Интервалы номиналь-<br>ных диаметров, мм | Предельные отклонения в мкм для степеней точности |     |     |     |    |    |     |      |    |     |
|--|---|-----|-----|-----|----|----|-----|------|----|-----|
|  | I   | II  | III | IV  | V  | VI | VII | VIII | IX | X   |
| До 6                                     | 0,3   | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 2  | 3  | 5   | 8    | 12 | 20  |
| 6—18                                     | 0,5   | 0,8 | 1,2 | 2   | 3  | 5  | 8   | 12   | 20 | 30  |
| 18—50                                    | 0,6   | 1   | 1,6 | 2,5 | 4  | 6  | 10  | 16   | 25 | 40  |
| 50—120                                   | 0,8   | 1,2 | 2   | 3   | 5  | 8  | 12  | 20   | 30 | 50  |
| 120—260                                  | 1   | 1,6 | 2,5 | 4   | 6  | 10 | 16  | 25   | 40 | 60  |
| 260—500                                  | 1,2   | 2   | 3   | 5   | 8  | 12 | 20  | 30   | 50 | 80  |
| 500—800                                  | 1,6   | 2,5 | 4   | 6   | 10 | 16 | 25  | 40   | 60 | 100 |
| 800—1 250                                | 2   | 3   | 5   | 8   | 12 | 20 | 30  | 50   | 80 | 120 |

Таблица III-4

**Предельные отклонения формы плоских поверхностей  
в зависимости от точности их изготовления [Л. 55]**

| Длина поверх-<br>ности, мм |        | Степень точности плоской поверхности |     |     |    |     |     |     |       |
|----------------------------|--------|--------------------------------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-------|
|                            |        | I                                    | II  | III | IV | V   | VI  | VII | VIII  |
| свыше                      | до     | Допустимые отклонения формы, мк      |     |     |    |     |     |     |       |
| —                          | 60     | 0,6                                  | 1,2 | 2,5 | 5  | 10  | 20  | 40  | 80    |
| 60                         | 100    | 0,8                                  | 1,6 | 3   | 6  | 12  | 25  | 50  | 100   |
| 100                        | 160    | 1,0                                  | 2   | 4   | 8  | 16  | 32  | 60  | 120   |
| 160                        | 250    | 1,2                                  | 2,5 | 5   | 10 | 20  | 40  | 80  | 160   |
| 250                        | 400    | 1,6                                  | 3   | 6   | 12 | 25  | 50  | 100 | 200   |
| 400                        | 630    | —                                    | 4   | 8   | 16 | 32  | 60  | 120 | 250   |
| 630                        | 1 000  | —                                    | 5   | 10  | 20 | 40  | 80  | 160 | 320   |
| 1 000                      | 1 600  | —                                    | 6   | 12  | 25 | 50  | 100 | 200 | 400   |
| 1 600                      | 2 500  | —                                    | 8   | 16  | 32 | 60  | 120 | 250 | 500   |
| 2 500                      | 4 000  | —                                    | 10  | 20  | 40 | 80  | 160 | 320 | 630   |
| 4 000                      | 6 300  | —                                    | 12  | 25  | 50 | 100 | 200 | 400 | 800   |
| 6 300                      | 10 000 | —                                    | 16  | 32  | 60 | 120 | 250 | 500 | 1 000 |

Таблица III-5

**Теплопроводность чистых металлов  $\lambda_{ж}$ , *вт/(м·град)*,  
при различных температурах**

| Металл                  | Температура, °К |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|
|                         | 273             | 373  | 473  | 573  | 673  | 773  | 873  |
| Алюминий (99,0%) . . .  | 209             | 213  | 220  | 226  | 230  | 235  | —    |
| Висмут (99,995%) . . .  | 9,4             | 7,7  | 7,1  | —    | —    | —    | —    |
| Железо (99,9%) . . . .  | 74              | 68   | 61,7 | —    | 49   | —    | 38,4 |
| Литий . . . . .         | 68              | 71   | —    | —    | —    | —    | —    |
| Медь (99,9%) . . . . .  | 394             | 385  | 378  | 371  | 365  | 360  | 353  |
| Натрий . . . . .        | 109             | 108  | —    | —    | —    | —    | —    |
| Никель (99,9%) . . . .  | 67,5            | 61,6 | 58,2 | —    | 52,3 | —    | 57   |
| Серебро (99,9%) . . . . | 41              | 39,2 | 37,3 | 36,3 | 36,3 | 36,7 | 37,5 |
| Уран . . . . .          | 19,2            | 20,3 | 23,3 | 24,2 | —    | —    | —    |

**Физико-механические свойства углеродистых сталей  
при различных температурах**

| Марка стали    | Теплопроводность<br>$\lambda_{\text{ж}}, \text{вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ |        |        |        | Модуль упругости<br>$E \cdot 10^{-10}, \text{н}/\text{м}^2$ |        |        |        | Предел прочности<br>$\sigma_{\text{в}} \cdot 10^{-7}, \text{н}/\text{м}^2$ |        |        |        |
|----------------|--|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|
|                | 273° К   | 373° К | 473° К | 673° К | 273° К  | 373° К | 473° К | 673° К | 273° К   | 373° К | 473° К | 673° К |
| Сталь 20 . . . | 52,0   | 51,2   | 48,5   | 42,7   | 19,8  | 19,3   | 17,5   | 15,8   | 50,0   | —      | 49,5   | 41,3   |
| Сталь 25 . . . | —  | 50,6   | 48,6   | 42,3   | 19,8  | 19,5   | 19,1   | 15,3   | 49,2   | 49,8   | 53,2   | 46,6   |
| Сталь 30 . . . | 50,8   | 47,8   | 45,2   | 39,3   | 20,1  | 19,5   | 19,1   | 15,3   | 53,5   | 50,5   | 57,4   | 50,2   |
| Сталь 40 . . . | 52,0   | 50,6   | 48,2   | 41,8   | 20,9  | 20,6   | —      | —      | 53,0   | —      | 59,2   | 50,9   |
| Сталь 45 . . . | —  | 48,2   | 41,5   | 45,6   | 19,7  | 19,3   | 18,6   | 17,15  | 52,7   | 50,2   | 58,8   | 53,2   |

Таблица III-7

**Физико-механические свойства легированных конструкционных  
сталей при различных температурах**

| Марка стали | Теплопроводность<br>$\lambda_{\text{ж}}, \text{вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ |        |        |        | Модуль упругости<br>$E \cdot 10^{-10}, \text{н}/\text{м}^2$ |        |        |        | Предел прочности<br>$\sigma_{\text{в}} \cdot 10^{-7}, \text{н}/\text{м}^2$ |        |        |        |
|-------------|--|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|
|             | 273° К   | 373° К | 473° К | 673° К | 293° К  | 373° К | 473° К | 673° К | 293° К   | 373° К | 473° К | 673° К |
| 30Х         | 42,8   | 42,5   | 41,8   | 38,7   | 20,9  | 21,1   | —      | —      | 63,2   | 76,2   | 77,2   | 64,7   |
| 34ХН3       | 37,3   | 36,4   | 35,3   | 34,0   | 20,7  | 20,3   | —      | —      | 101  | 98,0   | 90,2   | 83,0   |
| 16М         | 49,7   | 48,2   | —      | 41,0   | 20,3  | —      | —      | 18,5   | 53,0   | —      | 52,0   | —      |
| 12МХ        | —  | 50,2   | 50,2   | 48,6   | 20,6  | —      | —      | 17,2   | 44,5   | 42,2   | 44,8   | 42,2   |
| 15ХМ        | —  | 44,6   | —      | 41,5   | 20,6  | —      | —      | 17,3   | 52,8   | —      | —      | 49,4   |
| 12Х1МФ      | 35,8   | 35,6   | 35,5   | 35,2   | —   | —      | —      | —      | 58,2   | —      | —      | 47,0   |
| 35ХН3МФ     | —  | 54,8   | 50,2   | 44,4   | 20,4  | —      | 19,0   | 17,4   | 58,2   | —      | 79,8   | 74,0   |

Таблица III-8

**Физико-механические свойства нержавеющей и жаропрочных  
сталей при различных температурах**

| Марка стали | Теплопроводность<br>$\lambda_{\text{ж}}, \text{вт}/(\text{м}\cdot\text{град})$ |        |        |        | Модуль упругости<br>$E \cdot 10^{-10}, \text{н}/\text{м}^2$ |        |        |        | Предел прочности<br>$\sigma_{\text{в}} \cdot 10^{-7}, \text{н}/\text{м}^2$ |        |        |        |
|-------------|--|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|
|             | 273° К   | 373° К | 473° К | 673° К | 293° К  | 373° К | 473° К | 673° К | 293° К   | 373° К | 473° К | 673° К |
| 1Х13        | 23,9   | 24,9   | 21,0   | 27,7   | 21,7  | —      | 20,5   | 18,9   | 73,0   | —      | 65,2   | 57,3   |
| 2Х13        | 23,9   | 25,5   | 25,9   | 25,4   | 21,8  | 21,1   | 20,6   | 18,5   | 70,5   | —      | —      | —      |
| 1Х18Н9Т     | —  | 16,2   | 17,5   | 20,8   | 19,8  | 19,4   | 18,9   | 17,3   | 64,2   | 50,0   | 45,5   | 43,6   |
| 4Х14Н14В2М  | 13,8   | 15,4   | 16,8   | 20,3   | 20,7  | 19,8   | —      | 17,2   | 77,8   | 73,3   | 70,1   | 64,0   |
| 30ХГС       | —  | 37,7   | 35,8   | 35,2   | 19,4  | 18,0   | 17,3   | 16,5   | 107,0  | 102,1  | 93,8   | 85,9   |

**Физико-механические свойства меди и сплавов  
при различных температурах**

| Марка сплава | Теплопроводность $\lambda_m$ ,<br><i>вт/(м·град)</i> |        |        |        | Предел прочности $\sigma_n \cdot 10^{-2}$ , <i>н/м<sup>2</sup></i> |        |        |        |
|--------------|--|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|
|              | 293° К   | 373° К | 473° К | 573° К | 293° К   | 373° К | 473° К | 573° К |
| Д1           | 165  | 181    | 194    | 203    | 42,1   | 36,3   | 27,4   | —      |
| Д16          | 171  | 186    | 204    | —      | 47,0   | 28,9   | 19,1   | —      |
| Латунь Л80   | —  | 109    | 110    | 114    | 59,8   | 56,0   | 44,1   | 29,2   |
| М2           | 390  | 386    | 378    | 372    | 23   | 22,5   | 21,1   | 19,8   |

Таблица III-10

**Теплопроводность различных технических материалов  $\lambda_m$ ,  
*вт/(м·град)*, при различных температурах**

| Марка материала                      | Температура, °К |         |           |           |           |
|--------------------------------------|-----------------|---------|-----------|-----------|-----------|
|                                      | 293             | 373     | 573       | 873       | 1173      |
| Графит (параллельно слоям) . . . . . | 151—205         | 137—178 | 116,3—137 | 79—101    | 58—83,6   |
| То же поперек слоев                  | 99—130          | 85—115  | 71—102    | 46,5—75,5 | 37,3—53,3 |
| Слюда поперек слоев                  | 0,46—0,58       | —       | —         | —         | —         |
| Текстолит . . . . .                  | 0,23—0,34       | —       | —         | —         | —         |
| Асбест . . . . .                     | 0,097           | 0,113   | 0,151     | 0,203     | —         |

Таблица III-11

**Теплопроводность некоторых жидкостей  $\lambda$ , *вт/(м·град)*,  
при различных температурах ( $\rho = 0,98 \cdot 10^3$  *н/м<sup>3</sup>*)**

| Жидкость                    | Температура, °К |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                             | 273             | 298   | 323   | 348   | 373   | 398   | 423   |
| Вода . . . . .              | 0,55            | 0,612 | 0,648 | 0,672 | 0,682 | 0,695 | 0,693 |
| Глицерин . . . . .          | —               | 0,279 | 0,283 | 0,286 | 0,289 | 0,292 | 0,295 |
| Вазелиновое масло . . . . . | 0,125           | 0,123 | 0,122 | 0,121 | 0,118 | 0,117 | 0,116 |
| Касторовое масло . . . . .  | 0,183           | 0,180 | 0,177 | 0,175 | 0,171 | 0,168 | 0,165 |
| Веретенное масло . . . . .  | —               | 0,144 | 0,142 | —     | 0,140 | —     | 0,136 |
| Велосит . . . . .           | —               | 0,144 | 0,141 | —     | 0,139 | —     | 0,134 |
| Красное масло . . . . .     | —               | 0,141 | 0,139 | —     | 0,137 | —     | 0,132 |
| Даутерм . . . . .           | —               | 0,137 | 0,133 | 0,128 | 0,125 | 0,121 | 0,118 |

Таблица III-12

Теплопроводность газов  $\lambda \cdot 10^3$ , *вт/(м·град)*,  
при различных температурах

| Газы                     | Температура, °К |      |      |      |      |
|--------------------------|-----------------|------|------|------|------|
|                          | 273             | 373  | 473  | 573  | 673  |
| Аргон . . . . .          | 16,5            | 21,1 | 25,6 | 30,0 | 34,0 |
| Гелий . . . . .          | 143             | 179  | 213  | 245  | 276  |
| Азот . . . . .           | 24,3            | 31,4 | 38,5 | 45,0 | 50,7 |
| Водород . . . . .        | 172             | 220  | 264  | 307  | 349  |
| Кислород . . . . .       | 24,7            | 33,0 | 40,7 | 48,0 | 55,2 |
| Воздух (сухой) . . . . . | 24,4            | 32,1 | 39,3 | 46,2 | 52,2 |
| Окись углерода . . . . . | 23,3            | 30,1 | 36,5 | 42,7 | 48,6 |
| Аммиак . . . . .         | 21,1            | 33,9 | 48,8 | 65,7 | 84,0 |
| Углекислый газ . . . . . | 14,2            | 22,8 | 30,9 | 39,1 | 47,3 |

Таблица III-13

Физико-механические свойства некоторых фрикционных  
материалов при различных температурах

| Марка материала | Теплопроводность $\lambda$ ,<br><i>вт/(м·град)</i> |      |      |      | Твердость НВ·10 <sup>-2</sup> , <i>н/мм<sup>2</sup></i> |      |      |      |
|-----------------|--|------|------|------|---|------|------|------|
|                 | 313  | 373  | 423  | 573  | 293   | 363  | 473  | 573  |
| ФК-16Л          | 0,60   | 0,48 | 0,45 | 0,40 | 3,69  | 2,78 | 1,88 | 2,02 |
| ФК-24А          | 0,57   | 0,47 | 0,44 | 0,39 | 3,13  | 2,52 | 1,86 | 1,82 |
| 7КФ-31          | 0,56   | 0,48 | 0,45 | 0,40 | 1,96  | 1,22 | 1,02 | 0,90 |
| 6КХ-1           | 0,37   | 0,31 | 0,28 | —    | 2,45  | 2,11 | 1,78 | —    |
| 6КВ-10          | 0,54   | 0,49 | 0,44 | —    | 2,32  | —    | 1,86 | —    |

Таблица III-14

Теплопроводность полимеров

| Марка полимера  | Теплопроводность $\lambda_{\text{изв}}$ ,<br><i>вт/(м·град)</i> | Температурные пределы применения, °К |
|---|---|--------------------------------------|
| Фенолформальдегидный полимер Р-21 . . . . .                                       | 0,205   | 293—383                              |
| Кремнийорганический полимер КМ-9 . . . . .  | 0,2   | 293—383                              |
| Эпоксидная смола ЭД-5 . . . . .   | 0,170   | 383—443                              |
|   | 0,133   | 293—343                              |
|   | 0,183   | 343—443                              |
|   | 0,144   | 293—393                              |
| Полиамидная смола Б4 . . . . .  | 0,192   | 293—443                              |
| Фирфурил-фенолформальдегидная смола Ф-10  |   |                                      |
| Эпоксидная смола, модифицированная кремний-органическим полимером ТФЭ-9 . . . . . | 0,192   | 293—443                              |
| Продукт совмещения смол ЭД-5 и ПИИ . . . . .                                      | 0,214   | 293—393                              |
| Эпоксидный клей ВК-1 . . . . .  | 0,198   | 213—423                              |

Соотношение между единицами массовой теплоемкости

| Единицы        | ккал/кг·град          | кал/г·град            | дж/кг·град | кдж/кг·град | эрг/г·град         | БЕТ/фунт·°F           | Шт/фунт·град          |
|----------------|-----------------------|-----------------------|------------|-------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 ккал/кг·град | 1                     | 1                     | 4 187      | 4,187       | $41,87 \cdot 10^6$ | 1                     | 1                     |
| 1 кал/г·град   | 1                     | 1                     | 4 187      | 4,187       | $41,87 \cdot 10^6$ | 1                     | 1                     |
| 1 дж/кг·град   | $0,239 \cdot 10^{-3}$ | $0,239 \cdot 10^{-3}$ | 1          | 0,001       | $10^4$             | $0,239 \cdot 10^{-3}$ | $0,239 \cdot 10^{-3}$ |
| 1 кдж/кг·град  | 0,239                 | 0,239                 | 1 000      | 1           | $10^7$             | 0,239                 | 0,239                 |
| 1 эрг/г·град   | $23,9 \cdot 10^{-9}$  | $23,9 \cdot 10^{-9}$  | $10^{-4}$  | $10^{-7}$   | 1                  | $23,9 \cdot 10^{-9}$  | $23,9 \cdot 10^{-9}$  |
| 1 БЕТ/фунт·°F  | 1                     | 1                     | 4 187      | 4,187       | $41,87 \cdot 10^6$ | 1                     | 1                     |
| 1 Шт/фунт·град | 1                     | 1                     | 4 187      | 4,187       | $41,87 \cdot 10^6$ | 1                     | 1                     |

1 ккал/кг·град = 4186,8 дж/кг·град = 4,1868 кдж/кг·град =  $41,868 \cdot 10^6$  эрг/г·град.  
 1 дж/кг·град =  $0,238846 \cdot 10^{-3}$  ккал/кг·град =  $0,238846 \cdot 10^{-3}$  БЕТ/фунт·°F.  
 1 БЕТ/фунт·°F = 4186,8 дж/кг·град.

Соотношение для единиц измерения коэффициентов теплоудачи (х) и теплопередачи (к)

| Единицы                         | ккал/(м <sup>2</sup> ·ч·град) | кал/(см <sup>2</sup> ·сек·Х град) | вт/м <sup>2</sup> ·град | квт/м <sup>2</sup> ·град | вт/см <sup>2</sup> ·град | эрг/см <sup>2</sup> ·сек·Х град | БЕТ/фут <sup>2</sup> ·ч·°F |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1 ккал/м <sup>2</sup> ·ч·град   | 1                             | 27,8·10 <sup>-6</sup>             | 1,16                    | 1,16·10 <sup>-2</sup>    | 116·10 <sup>-8</sup>     | 1,16·10 <sup>3</sup>            | 0,205                      |
| 1 кал/см <sup>2</sup> ·сек·град | 36 000                        | 1                                 | 4,187·10 <sup>4</sup>   | 41,87                    | 4,187                    | 41,87·10 <sup>6</sup>           | 7,37·10 <sup>3</sup>       |
| 1 вт/м <sup>2</sup> ·град       | 0,860                         | 23,9·10 <sup>-6</sup>             | 1                       | 10 <sup>-3</sup>         | 10 <sup>-4</sup>         | 10 <sup>3</sup>                 | 0,176                      |
| 1 квт/м <sup>2</sup> ·град      | 860                           | 23,9·10 <sup>-3</sup>             | 10 <sup>3</sup>         | 1                        | 0,1                      | 10 <sup>3</sup>                 | 176                        |
| 1 вт/см <sup>2</sup> ·град      | 8 600                         | 0,239                             | 10 <sup>4</sup>         | 10                       | 1                        | 10 <sup>7</sup>                 | 1,76·10 <sup>3</sup>       |
| 1 эрг/см <sup>2</sup> ·сек·град | 860·10 <sup>-6</sup>          | 23,9·10 <sup>-9</sup>             | 10 <sup>-2</sup>        | 10 <sup>-6</sup>         | 10 <sup>-7</sup>         | 1                               | 176·10 <sup>-6</sup>       |
| 1 БЕТ/фут <sup>2</sup> ·ч·°F    | 4,89                          | 135,6·10 <sup>-6</sup>            | 5,68                    | 5,68·10 <sup>-3</sup>    | 568·10 <sup>-6</sup>     | 5,68·10 <sup>3</sup>            | 1                          |

Соотношение между единицами теплопроводности

| Единицы           | ккал/м·ч·град | кал/см·сек·Х град      | вт/см·град             | вт/м·град | квт/м·град             | БЕТ/фут·ч·°F         | БЕТ/дюйм·ч·°F          |
|-------------------|---------------|------------------------|------------------------|-----------|------------------------|----------------------|------------------------|
| 1 ккал/м·ч·град   | 1             | 2,778·10 <sup>-3</sup> | 11,63·10 <sup>-3</sup> | 1,163     | 1,163·10 <sup>-2</sup> | 672·10 <sup>-3</sup> | 56·10 <sup>-3</sup>    |
| 1 кал/см·сек·град | 360           | 1                      | 4,187                  | 418,7     | 418,7·10 <sup>-3</sup> | 242                  | 20,2                   |
| 1 вт/см·град      | 86,0          | 0,239                  | 1                      | 100       | 0,1                    | 57,8                 | 4,815                  |
| 1 квт/м·град      | 0,860         | 2,39·10 <sup>-3</sup>  | 0,01                   | 1         | 0,001                  | 0,578                | 48,15·10 <sup>-3</sup> |
| 1 вт/м·град       | 860           | 2,39                   | 10                     | 1 000     | 1                      | 578                  | 48,15                  |
| 1 БЕТ/фут·ч·°F    | 1,488         | 4,134·10 <sup>-3</sup> | 17,3·10 <sup>-3</sup>  | 1,73      | 1,73·10 <sup>-3</sup>  | 1                    | 83,3·10 <sup>-3</sup>  |
| 1 БЕТ/дюйм·ч·°F   | 17,86         | 49,6·10 <sup>-3</sup>  | 0,208                  | 20,8      | 20,8·10 <sup>-3</sup>  | 12                   | 1                      |



## ЛИТЕРАТУРА

1. Ott Z., Untersuchungen zur Frage der Erwärmung elektrischer Maschinen, Mitt. über Forschungsarbeiten, II, 35/36, 1906.
2. Jacobs R. B. a. Starr C., Thermal conductance of metallic contacts, The Rev. of Scientific Instruments, 1939, v. 10, № 4.
3. Kouwenhoven W. B. a. Potter J. H., Thermal resistance of metal contacts, The J. of the American Welding Society, 1948, v. 27, № 7.
4. Brunol A. W. a. Buckland F., Thermal contact resistance of laminated and machined joints, Trans. ASME, 1949, v. 71, № 4.
5. Weills N. D. a. Ryder E. A., Thermal resistance measurements of joints formed between stationary metal surfaces, Trans. ASME, 1949, v. 71, № 4.
6. Celincale T. N. a. Fischenden M., Thermal conductance of metal surfaces in contact, Proc. of the Generale Discussion on Heat Transfer, 1951.
7. Швец И. Т., Дыбан Е. П. и Кондак Н. М., Исследование по контактному теплообмену между деталями тепловых машин, Труды Института теплоэнергетики АН УССР, вып. 12, 1955.
8. Швец И. Т., Дыбан Е. П., Воздушное охлаждение роторов газовых турбин, изд-во Киевского университета, 1959.
9. Капинос В. М., Ильченко О. Т., Тепловая проводимость слоя, образованного выступами шероховатости, Известия вузов, «Энергетика», 1958, № 9.
10. Капинос В. М., Ильченко О. Т., К вопросу определения контактного термического сопротивления смешанных пар, Труды Харьковского политехнического института имени В. И. Ленина, «Машиностроение», 1959, т. XIX, вып. 5.
11. Ильченко О. Т., Капинос В. М., Термическое сопротивление контактного слоя, Труды ХПИ имени В. И. Ленина, «Машиностроение», 1959, т. XIX, вып. 5.
12. Демкин Н. Б., Фактическая площадь касания твердых поверхностей, Изд-во АН СССР, 1962.
13. Боуден Ф. П., Тейбор Д., Площадь контакта между твердыми телами, «Прикладная механика и машиностроение», 1952, № 2.
14. Шлыков Ю. П., Гагин Е. А., Контактный теплообмен, Госэнергоиздат, 1963.
15. Заваридный Н. В., Тепловое сопротивление соприкасающихся поверхностей при высоких температурах, ЖТФ, 1951, т. XXI, вып. 4.
16. Шлыков Ю. П., Гагин Е. А., Демкин Н. Б., Исследование контактного теплообмена, «Теплоэнергетика», 1960, № 6.

17. Шлыкков Ю. П., Ганин Е. А., Термическое сопротивление контакта, «Атомная энергия», 1960, т. 9, вып. 6.
18. Шлыкков Ю. П., Ганин Е. А., Экспериментальное исследование контактного теплообмена, «Теплоэнергетика», 1961, № 7.
19. Шлыкков Ю. П., Ганин Е. А., Thermal resistance of metallic contacts, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1964, v. 7.
20. Крагельский И. В., Демкин Н. Б., Определение фактической площади касания, сб. «Трение и износ в машинах», XIV, Изд-во АН СССР, 1960.
21. Греберг Г., Эрк С., Григуль У., Основы учения о теплообмене, Изд-во иностр. лит., 1958.
22. Фенеч, Розенов. Теплопередача (русский перевод), 1963, № 1.
23. Миллер В. С., Сб. трудов ИТЭ АН УССР, вып. 18 и 20, 1960.
24. Миллер В. С., Особенности контактного теплообмена в теплообменных элементах реактора, Известия вузов, «Энергетика», 1962, № 3.
25. Миллер В. С., Эффективный способ уменьшения контактного термического сопротивления, ИФЖ, 1963, № 4.
26. Хижняк П. Е., Исследование контактного термического сопротивления, Труды ГОСНИИ ГВФ, вып. 39, 1963.
27. Хижняк П. Е., К вопросу об определении составляющих контактного термического сопротивления, Известия вузов, «Авиационная техника», 1965, № 1.
28. Фрид, Костелло, Проблема теплового контактного сопротивления в конструкциях космических кораблей, «Ракетная техника» (журнал американского ракетного общества, русский перевод), 1962, № 2.
29. Хольм Р., Электрические контакты. Изд-во иностр. лит., 1961.
30. Клаузинг А. М., Чао Б. Т., Термическое сопротивление контакта в вакууме, Теплопередача, Труды Американского об-ва инж.-механиков (русский перевод), 1965, № 2.
31. Roess L. C., Theory of spreading conductance, Appendix A. of an unpublished report of the Beacon Laboratories of Texas Company, Beacon, New York, 65.
32. Timoshenko S. and Goodier J. N., Theory of elasticity, McGraw-Hill Book Co., Inc., N. Y., 1951.
33. Дженг, Термическое сопротивление контакта в вакууме, Теплопередача, Труды Американского об-ва инж.-механиков (русский перевод), 1967, № 3.
34. Каганер М. Г., Жукова Р. И., Определение термического сопротивления в вакууме контактов между металлическими поверхностями с различной степенью шероховатости, ИФЖ, 1966, № 3.
35. Згура А. А., Тайц Н. Ю., Определение контактного термического сопротивления при нестационарном теплообмене между соприкасающимися телами, ИФЖ, 1967, № 6.
36. Иванцов Г. П., ЖТФ, 7, вып. 10, 1937.
37. Бухотел Ф., О возможности улучшения теплоотдачи при контакте урановых и алюминиевых поверхностей, Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. 1955, т. 9, доклад Р-947.

38. Skipper R. G. S., Wootton K. J., Thermal resistance between uranium and can, Second United Nat. Int. Confer. on the Peaceful Uses of A. E., 1958.
39. Brutto E., Casagrande J., Perona G., Thermal contact resistance between cylindrical metallic surfaces, *Energia Nucleare*, 1959, v. 6, № 8.
40. Sanderson P. D., Heat transfer from the uranium fuel to the magnox can in a gas-cooled reactor, *International Development in Heat Transfer*, pt I, 1961.
41. Rapier A. C., Jones T. M. a. Mecintosh J. E., The thermal conductance of uranium dioxide stainless steel interfaces, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1963, v. 6.
42. Barzeley M. E., Kin Nee Tong a. Holloway G. F., Effect of pressure on thermal conductance of contact joints, *NACA*, TN 3295, 1955.
43. Rogers G. F. G., Heat transfer at the interface of dissimilar metals, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1961, v. 2, № 1/2.
44. Joon Sang Moon a. Norris Keeler, A theoretical consideration of directional effects in heat flow at the interface of dissimilar metals, *Int. J. Heat Mass Transfer*, October 1962, v. 5.
45. Льюис Д. В., Перкинс Х. С., Теплообмен на границе раздела нержавеющей стали и алюминий, «Тепло- и массоперенос», т. 11, 1968, № 9.
46. Alcock J. F., Commentary on review of recent progress in heat transfer, *Proc. I. Mech. E.*, 1943, v. 149.
47. Graff W. J., Thermal conductance across metal joints, *Machine Design*, 1960, v. 32, № 9.
48. Швец И. Т., Дыбан Е. П., Теплообмен при контакте плоских металлических поверхностей, *ИФЖ*, 1964, № 3.
49. Шлыков Ю. П., Расчет термического сопротивления контакта обработанных металлических поверхностей, «Теплоэнергетика», 1965, № 10.
50. Шлыков Ю. П., Исследование контактного теплообмена, Автореферат докторской диссертации, Ленинград, 1965.
51. Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М., Теория тепло- и массообмена, Госэнергоиздат, 1961.
52. Дьяченко П. Е., Вайнштейн В. Э., Розенбаум Б. С., Количественная оценка неровностей поверхностей, Изд-во АН СССР, 1952.
53. Дьяченко П. Е., Вайнштейн В. Э., «Стандартизация», 1960, № 4.
54. Проект ГОСТ. Основные формы цилиндрических поверхностей, «Стандартизация», 1959, № 2.
55. Левин Г. Л., «Стандартизация», 1959, № 11.
56. Якобсон М. О., Шероховатость, наклеп и остаточные напряжения при механической обработке, Машгиз, 1956.
57. Дьяченко П. Е., Применение метода микротвердости для определения глубины наклепанного слоя, Труды совещания по микротвердости, Изд-во АН СССР, 1951.
58. Дьяченко П. Е., Толкачева Н. Н., Андреев Г. А., Карпова Т. М., Площадь фактического контакта сопряженных поверхностей, Изд-во АН СССР, 1963.

59. Верховский А. В., Явление предварительного смещения при трогании несмазанных поверхностей с места, ЖПФ, 1926, № 3, вып. 3—4.

60. Крагельский И. В., Трение несмазанных поверхностей. Автореферат докторской диссертации, М., 1943.

61. Lodge A. S., Howell H. G., Proc. Phys. Soc., 1954, v. 67, № 410. Ser. B, pt II, p. 89.

62. Ильченко О. Т., Определение площади контакта двух плоских тел, «Вестник машиностроения», 1958, № 10.

63. Крагельский И. В., Дерягин Б. В., О зависимости коэффициента сухого трения от нагрузки и шероховатостей, сб. «Трение и износ в машинах», Труды II Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. т. I. Изд-во АН СССР, 1947.

64. Крагельский И. В., Трение покоя двух шероховатых поверхностей, Изв. АН СССР, ОТН, 1948, № 10.

65. Дьяченко П. Е., Толкачева И. Н., Горюнов К. П., Определение площади фактического контакта поверхностей, сб. «Изучение износа деталей машин при помощи радиоактивных изотопов», Изд-во АН СССР, 1957.

66. Гогоберидзе Д. Б., Твердость и методы ее измерения, Машгиз, 1952.

67. Рыжов Э. В., Контактная жесткость деталей машин, изд-во «Машиностроение», 1966.

68. Демкин Н. Б., Контакт твердых тел при статическом нагружении и трении, сб. «Теория трения и износа», Машгиз, 1965.

69. Крагельский И. В., Трение и износ, Машгиз, 1962.

70. Костерин Ю. И., Реологические свойства контакта двух твердых тел, сб. «Теория трения и износа», Машгиз, 1965.

71. Лютцау В. Г., Исследование релаксации напряжений в металлах при комнатной температуре методами измерения поперечной деформации и рентгеноанализа, Автореферат канд. диссертации, 1957.

72. Ролинский Б. М., К вопросу о механизме релаксации напряжений в металлах, Изв. АН СССР, ОТН, 1954, № 2.

73. Эванс Ю. Р., Коррозия и окисление металлов, Машгиз, 1962.

74. Семенов А. П., Схватывание металлов, Машгиз, 1958.

75. Айбиндер С. Г., Клокова Э. Ф., О возникновении сцепления металлов при совместной пластической деформации, МТФ, т. XXV, вып. 13, 1955.

76. Pearson J. A., Thermal resistance of the joint between a nuclear fuel and its cladding material, Nuclear Energy, December 1962.

77. Михеев М. А., Основы теплопередачи, Госэнергоиздат, 1956.

78. Clausing A. M. и Chao B. T., Thermal contact resistance in a vacuum environment, Univ. of Illinois Eng. Exp. Sta., Report ME-TN-242-1, August 1963.

79. Айбиндер С. Б., Холодная сварка металлов, Изд-во АН Латв. ССР, 1957.

80. Биллик Ш. М., Макрогеометрия деталей машин, Машгиз, 1962.

81. Маталли А. А., Рыцова В. С., Чистота поверхностей деталей, подвергаемых покрытиям, Машгиз, 1952.

82. Аршинов В. А., Алексеев Г. А., Резание металлов, Машгиз, 1953.
83. Дульнев Г. Н., Теплообмен в радиоэлектронных устройствах, Госэнергоиздат, 1963.
84. Демкин Н. Б., Ланков А. А., Определение фактической площади касания двух твердых тел при помощи угольных пленок, «Заводская лаборатория», 1965, № 6.
85. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М., Справочник по теплопередаче, Госэнергоиздат, 1959.
86. Чиркин В. С., Теплопроводность промышленных материалов, Машгиз, 1962.
87. Варгафтик Н. Б. и др., Теплофизические свойства веществ, Госэнергоиздат, 1956.
88. Справочник по машиностроительным материалам, Машгиз, т. I и II, 1959.
89. Справочник по свойствам сталей, применяемых в котлотурбостроении, Машгиз, 1958.
90. Химущин Ф. Ф., Нержавеющие стали, изд-во «Металлургия», 1967.
91. Машиностроительные стали, Машгиз, 1962.
92. Laming L. C., Thermal conductance of machined metal contacts, International Developments in Heat Transfer, 1961, pt. I.
93. Ascoli A., Germagnoli E., Misura sulla resistenza termica di contatto tra superficie piane di uranio e alluminio, Energia nucleare, 1956, v. 3, № 1.
94. Месерович И. Г., Мучник Г. Ф., Нестационарные процессы в контактных сопротивлениях и тонких пленках, Доклад на II Всесоюзном совещании по тепло- и массообмену, Минск, 1964.
95. Cordier H., Etude experimentale des resistances thermiques de contact influence de la pression, Annales de physique, 1961, t. 6, № 1—2.
96. Stohr J. A., Caillat R., Gauthron M., Second United Nat. Internat. Conference on the Peaceful Uses of A. E., Paper № 15/p-1167, 1958.
97. Резников А. П., Теплообмен при резании и охлаждение инструментов, Машгиз, 1963.
98. Voeschten F. a. Van der Held E. F. M., Physica, 1957, v. 23, № 1.
99. Певский Б. А., Методика построения номограмм, Изд-во техн. лит., 1937.
100. Попов В. М. и др., Установка для измерения тепловой проводимости в зоне контакта тел при стационарном и нестационарном тепловых режимах, ПИТПО, ГОСИНТИ, М., 1967.
101. Попов В. М. и др., Повышение тепловой проводимости клеевых соединений, ВТЭИ, № 5, М., 1967.
102. Попов В. М. Методы снижения тепловой нагрузки мощных полупроводниковых приборов, ПИТПО, ГОСИНТИ, М., 1967.
103. Попов В. М. Токарные резцы с внутренним охлаждением, Машиностроитель, № 3, 1969.
104. Попов В. М., Лазарев М. С. Метод скоростного определения термического сопротивления и температуры в зоне контакта поверхностей твердых тел. Измерительная техника № 4. 1969.
105. Попов В. М. Повышение стойкости сборных токарных резцов с механическим креплением ножа-вставки, сб. НИИМАШ

«Металлорежущий и контрольно-измерительный инструмент», № 10, 1969.

106. Попов В. М. К вопросу определения термического сопротивления контакта плоско-шероховатых поверхностей при различных видах деформации неровностей, ИВУЗ, «Энергетика», № 4, 1970.

107. Попов В. М. Методы измерения термического сопротивления и температуры клеевых соединений, ИВУЗ, «Приборостроение», т. XIII, № 6, 1970.

108. Попов В. М., Янин Л. Ф. К вопросу о влиянии времени приложения нагрузки на термическое сопротивление контакта, ИФЖ, т. XIX, № 4, 1970.

109. Попов В. М. Исследование тепловых свойств клеевых швов методом нестационарного температурного режима, Пластические массы, № 6, 1970.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |            |
|---|------------|
| Предисловие . . . . .   | 3          |
| Условные обозначения . . . . .  | 5          |
| <b>Глава первая. Общие сведения о контактном теплообмене</b>  | <b>7</b>   |
| 1-1. Основные понятия о контактном теплообмене . . . . .  | 7          |
| 1-2. Обзор экспериментально-теоретических работ по<br>контактному теплообмену . . . . .   | 11         |
| <b>Глава вторая. Физико-механические свойства поверхностей<br/>твердых тел и взаимодействие их при контактировании</b>  | <b>44</b>  |
| 2-1. Физико-механические и геометрические свойства<br>поверхностного слоя твердого тела . . . . .   | 44         |
| 2-2. Взаимодействие поверхностей при механическом<br>контакте . . . . .   | 56         |
| <b>Глава третья. Теплообмен в зоне контакта твердых тел<br/>с различными поверхностями</b>  | <b>77</b>  |
| 3-1. Теплообмен при контактировании плоско-<br>параллельных поверхностей . . . . .  | 77         |
| 3-2. Теплообмен при контактировании поверхностей<br>с волнистостью и макронеровностями . . . . .  | 93         |
| 3-3. Теплообмен при длительном статическом приложе-<br>нии нагрузки . . . . .   | 97         |
| <b>Глава четвертая. Экспериментальное определение тер-<br/>мического сопротивления в зоне контакта при стационар-<br/>ном и нестационарном тепловых режимах</b> | <b>98</b>  |
| 4-1. Методы исследования и экспериментальные уста-<br>новки . . . . .   | 98         |
| 4-2. Определение температуры в зоне контакта методом<br>«естественной термометрии» . . . . .  | 111        |
| <b>Глава пятая. Результаты экспериментов и их анализ</b>  | <b>115</b> |
| 5-1. Термическое сопротивление контакта плоско-<br>параллельных поверхностей при начальном и после-<br>дующем приложениях нагрузки . . . . .                    | 115        |
| 5-2. Термическое сопротивление контакта поверхностей<br>с волнистостью и макронеровностями . . . . .  | 121        |
| 5-3. Влияние времени выдержки под нагрузкой и окис-<br>ных пленок на теплообмен в зоне контакта . . . . .   | 127        |
|   | 215        |

|   |            |
|---|------------|
| 5-4. Нестационарная теплопроводность твердых тел, находящихся в контакте . . . . .  | 132        |
| 5-5. Методы искусственного изменения термического сопротивления в зоне контакта . . . . .   | 135        |
| <b>Глава шестая. Примеры применения экспериментальных результатов и методов расчета контактного теплообмена</b>   | <b>152</b> |
| 6-1. К вопросу повышения износостойчивости сборных токарных резцов . . . . .  | 152        |
| 6-2. К вопросу интенсификации процессов охлаждения радиоэлектронных устройств . . . . .   | 159        |
| 6-3. Определение фактической площади контакта поверхностей твердых тел при различных термических условиях методом контактной теплопроводности . . . . . | 162        |
| 6-4. Вопросы повышения тепловой проводимости клеевых соединений . . . . .   | 166        |
| 6-5. К вопросу о тепловых контактах в измерительной технике . . . . .   | 172        |
| 6-6. К вопросу повышения термического сопротивления контакта в целях создания надежной тепловой защиты объекта . . . . .                                | 179        |
| <i>Приложение I. Примеры расчета теплообмена через зону контакта</i> . . . . .  | 185        |
| <i>Приложение II. Таблицы расчетных и опытных данных</i> . . . . .  | 192        |
| <i>Приложение III. Справочные таблицы</i> . . . . .   | 202        |
| <i>Литература</i> . . . . .   | 209        |