

Трибологические исследования поверхностей олова на контактах для технологии соединений в электронике

С помощью статистического плана исследований из различных нормальных сил, скоростей и путей трения были получены факторы влияния на характеристики трения и сопротивления. На основе полученных данных можно сделать вывод, что контактная сила практически не оказывает влияния на коэффициент трения, однако значительно влияет на контактное сопротивление. Возрастающая скорость трения увеличивает контактное сопротивление, так же как это делает большой путь трения. Однако эти высказывания действительны только для проверенных сочетаний материалов.

Франк Остендорф
(Frank Ostendorf), к. т. н.

frank.ostendorf@weidmueller.de

Томас Вилш (Thomas Wielsch)
Михаэль Райнигер
(Michael Reiniger), к. т. н.

Перевод: Андрей Новиков

andrej.novikov@uni-rostock.de

Введение

Термин «трибологическая нагрузка» в соответствии со стандартом DIN 50320 обозначает нагрузку поверхности твердого тела при помощи контактного и относительного движения твердого, жидкого или газообразного сопряженного элемента. Учитывая то, что в общем технические поверхности представляют собой геометрическое ограничение тел, знания об атомных, молекулярных и механических взаимодействиях контактирующих поверхностей имеют особое значение [1–3]. Для технологии соединений в электронике, особенно в области разъемов, трибологическая нагрузка в виде трения и износа поверхностей контактов неизбежна при необходимости осуществить технически эффективное использование величин энергии, материала или сигналов.

Гальванически осажденные поверхности олова в области электроники и электротехники являются на сегодня одними из наиболее широко используемых контактных поверхностей и применяются в большом количестве электромеханических модулей, таких как системы разъемов, в качестве недорогих контактных поверхностей [4–6]. Наряду с большим числом показателей, при помощи которых описываются такие системы, как, например, допустимая нагрузка по току, контактное сопротивление, силы соединения и разъединения, трибологическим свойствам, то есть настоящим параметрам трения и износа, уделяется меньше внимания. Трибологические свойства поверхности из олова в системах разъемов сегодня чаще всего получают и анализируют эмпирически при помощи близких к настоящим применениям механических исследований срока службы, во время которых контактная система в своем рабочем положении многократно соединяется и разъединяется. Износ самих поверхностей контакта при этом часто описывается чисто феноменологически, анализ происходит либо на основании протертости поверхности контакта до базового материала, либо на основании превышения одного из электрических предельных значений.

Поэтому своевременное вовлечение трибологии в процесс разработки может позже сэкономить денежные средства и время, так как в области технического использования износ является важным фактором влияния на надежность и долговременные характеристики контактных систем технологии соединения в электронике. Так как износ приводит к повреждению материала, в триботехнических системах он может привести к выходу из строя всей системы в целом вследствие вызванных износом изменений материала и формы электронных модулей.

Специально разработанный трибометр позволяет получить в рамках описанных здесь исследований определенные величины, преимущественно в качестве функции времени, для анализа и описания нагрузок, сил трения и признаков износа. Наряду с важными характеристиками, полученными из механической нагрузки поверхностей материала трибологической системы, трения и износа, при помощи этого трибометра могут быть дополнительно измерены электрические величины. Так как трибологическая нагрузка представляет собой комплексный вид нагрузки, структурные характеристики участвующих компонентов и спектр нагрузок (то есть технические физические параметры нагрузки) должны быть точно описаны и зафиксированы. Проводимый в заключение анализ и оценка возникших следов износа при помощи микроскопического (РЭМ, Infinite Focus) и спектроскопического методов (рентгеноспектральный электрозондовый микроанализ) способствует лучшему пониманию задействованных механизмов износа. Такой подход дает возможность рассматривать фундаментальные трибологические свойства отдельно от продуктов и процессов.

Помимо этого, основанное на трибологии понимание взаимосвязи таких параметров, как коэффициент трения, геометрия и сила контакта, а также факторов влияния из структуры слоев системы контактов позволяет проводить целенаправленную и специализированную оптимизацию процесса износа. По существу при помощи отвечающего спросу

отбора исходных материалов и поверхностей из олова могут быть разработаны методы, которые не только ведут к повышению максимально возможного числа циклов соединения, но и могут повлечь за собой сокращение сил соединения и разъединения.

Метод испытания на износ

Методика анализа и оценка результатов исследования

Для проведения представленных здесь исследований был специально разработан трибометр, который настроен на то, чтобы фиксировать окончательные технические данные геометрии контактов систем электрических разъемов (рис. 1). Используемая здесь конструкция нужна для моделирования линейных относительных движений между двумя образцами испытания (контактных партнеров), так как они, например, проявляются в системе электрических разъемов при соединении и разъединении контактов. С такой структурой трибометра можно в одном цикле трения смоделировать пути от 1 мкм до 25 мм с разрешением в 0,1 мкм, при этом могут быть реализованы скорости перемещения от 1 мм/мин. до 1 м/с. Динамическая нагрузка нормальной силы составляет от 0,05 до 15 Н. Помимо максимально определяемой силы трения в 20 Н, в качестве еще одного вызванного трением эффекта измеряется сопротивление контактов в виде электрического параметра. В особенности сопротивление контакта как один из важнейших параметров технологии соединения в электронике позволяет сделать вывод о самостоятель-

но образующихся пограничных слоях между металлическими контактными партнерами во время трибологической нагрузки. При этом проводится измерение контактного сопротивления во время одного из таких циклов трения в соответствии с милливольтным методом.

Кроме того, при помощи соответствующей методики анализа определяются и другие параметры трибологической системы испытаний, такие, например, как шероховатость и химический состав поверхности, а также величина износа. Для анализа топографии поверхности использовался оптический 3D-профилометр с высоким разрешением (InfiniteFocus компании Alicona, Graz), в то время как для отображения и оценки механизмов износа и химического состава поверхности применялся растровый электронный микроскоп (РЭМ) с анализом микрообластей (рентгеноспектральный электродондовый микроанализ) (Evo60 компании Zeiss, Oberkochen).

Для планирования и анализа трибологических испытаний использовались методы статистического планирования исследований. Благодаря этому подходу могут быть описаны даже частично очень сложные для трибологии взаимодействия многих независимых переменных при незначительных экспериментальных затратах, в отличие от традиционного метода лабораторных испытаний, при котором в общем возможно определение лишь конкретной трибологической измерительной и испытательной величины в качестве функции одной независимой переменной [1, 7, 8].

Трибологическая система испытаний

Как правило, триботехнические системы относительно своей функции и структуры характеризуются большим числом параметров и факторов. На рис. 2 изображены снимки основной части (рис. 2а) и сопряженной детали (рис. 2б). В качестве основной части используется покрытый оловом гнездовой контакт, а в качестве сопряженной детали — покрытый оловом контактный штифт, оба серийного производства. Механическое крепление основной части рассчитано таким образом, что само пружинящее действие контактного стержня приостанавливается за счет опоры на перемычку, которая согласована с геометрией контакта. Основная часть состоит из низколегированного медного материала,

на который в заключение был нанесен слой микролегированного расплавленного олова.

В области контакта находится глубоко-протянутая широкая выпуклость с радиусом $d = 4$ мм, так что при контактировании с плоским сопряженным элементом устанавливается определенная точечная область контакта. Контактная поверхность сопряженного элемента состоит из гальванически осажденной поверхности блестящего лужения, которая соединена с подслоем никеля, нанесенным на базовый материал — бронзу. Трибологические измерения проводились при нормальных лабораторных условиях (температура 22 °С; относительная влажность воздуха 50%), дополнительные промежуточные материалы не использовались.

Для представленных здесь экспериментов был составлен план испытаний, при котором параметры спектра нагрузок были выбраны и вырыровались следующим образом:

- Вид перемещения: скольжение.
- Направление перемещения: линейное.
- Процесс движения в целом: осциллирующий.
- Нагрузка F_N : 1 и 5 Н.
- Скорость: 60 и 600 мм/мин.
- Продолжительность нагрузки: 50 циклов.
- Путь трения: 0,2 и 2 мм.

Целью трибологических испытаний является отображение основного влияния и взаимодействия трех параметров нагрузки: силы контакта (F_N), скорости скольжения (v) и пути трения (s) на коэффициент трения (μ) и контактное сопротивление (R_d). При этом параметры нагрузки подразделяются на два уровня — высокий и низкий.

Результаты и обсуждение

После каждого испытания были измерены следы износа на контактных штифтах и на гнездовых деталях методом 3D-микроскопии и проведен детальный анализ поверхностей контактов с помощью оптической и электронной микроскопии и рентгеноспектрального электродондового микроанализа. На рис. 3 представлены снимки типичных следов износа, сделанные методом оптической микроскопии. Им противопоставляются следы износа, которые возникают после 50 циклов трения при контактной нормальной силе в 1 и 5 Н, при этом путь трения и скорость скольжения ($s = 0,2$ мм и $v = 60$ мм/мин.)

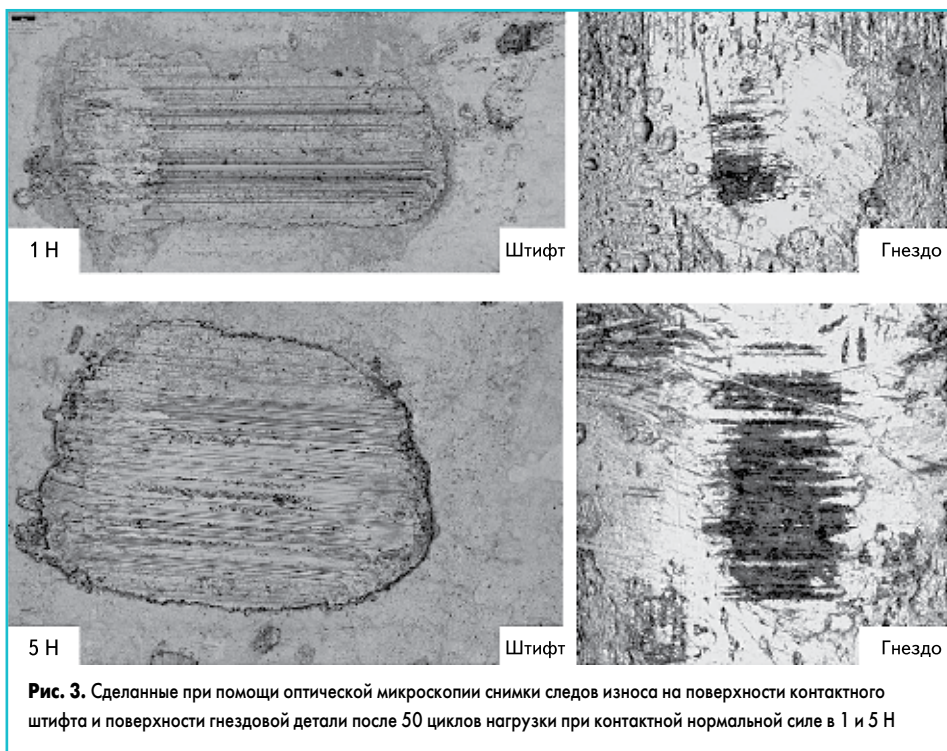


Рис. 1. Конструкция для моделирования линейного относительного движения между двумя образцами



Рис. 2. Снимки позолоченных образцов, а также исследованные конструкции контактов:

а) покрытый оловом гнездовой контакт (базовая деталь); б) покрытый оловом контактный штифт (сопряженная деталь); в) серийное состояние контактов изначальной геометрии



низмы износа, такие, например, как износ при скольжении и дроблении, являются частью процесса износа. Из-за пластичности поверхностей абразивный износ, а также сопротивление износу увеличиваются вместе с возрастающей контактной нормальной силой [1, 2].

Более того, исследования с помощью рентгеноспектрального электрозондового микроанализа изображенных на рис. 5 следов износа на поверхностях гнездовых деталей показали, что при контактной нормальной силе в 1 Н в центре следа износа заметно значительное скопление кислорода. В центре следа износа при контактной нормальной силе в 5 Н, напротив, определяется значительно меньшая концентрация кислорода. В принципе наличие кислорода на этих местах позволяет сделать вывод о трибохимической реакции и об окислении поверхности олова. Впоследствии окисляются и абразивные частицы износа. При достаточно высокой контактной нормальной силе в дальнейшем процессе нагрузки они постоянно сдвигаются в сторону края места контакта. Однако эти окисленные частицы при небольших контактных нормальных силах не могут быть удалены из мест контактов, так что большая часть находящихся в распоряжении контактных площадей покрыта окисью олова, и она по причине повышенного особого сопротивления окиси олова вызывает увеличение контактного сопротивления.

Во время отдельного испытания на трение все параметры всего спектра нагрузки и структуры триботехнической системы поддерживались в неизменном виде, так что проявляющиеся силы трения, коэффициенты трения и контактные сопротивления могут быть изображены в виде функции продолжительности нагрузки. Выборочно типичные диаграммы зависимости трения и времени проведенных исследований изображены на рис. 6. На этих диаграммах измеренные на всем пути трения силы трения и коэффициенты трения отдельного цикла и соответствующие переходные сопротивления обозначены усредненно в виде функции циклов трения.

На рис. 6а изображено изменение во времени коэффициента трения и контактного

были неизменными. Сравнение показывает, что, как и ожидалось, следы износа при контактной нормальной силе в 5 Н не только на контактном штифте, но и на гнездовой детали значительно более ярко выражены, чем при нагрузке в 1 Н. Детальный анализ следов износа с помощью 3D-микроскопии с высоким разрешением изображен на рис. 4.

Сравнение двух 3D-изображений следов износа показывает, что при нагрузке в 1 Н заметны лишь отдельные царапины в области контакта. При нагрузке в 5 Н, напротив, видны отчетливо выраженные царапины по всему следу износа. Дополнительно к этому четкому возникновению царапин по краю следа износа можно заметить скопление деформированного материала с максимальной высотой 5 мкм. В связи с ясно выраженным следом износа на гнездовом контакте и более глубоким следом износа на контактных штифтах можно предположить, что скопление материала по краю следа износа в целом возникает по причине его переноса с контактного

штифта на гнездовой контакт, а также из-за вытертого материала в зоне контакта.

В заключение возникшие следы износа были изучены при помощи РЭМ и рентгеноспектрального электрозондового микроанализа. Наряду с определением химических свойств, элементарных составов, а также химических связей поверхностей на основании внешнего вида следов износа было возможно определить действующие механизмы износа. Изменение внутренних и внешних пограничных слоев, то есть зоны деформации и упрочнения, скопления окиси, вид и форму возникших частиц износа, а также типичный внешний вид задействованных механизмов износа можно увидеть на рис. 5. Помимо типичных царапин и углублений здесь видны частицы, которые являются продуктами трибохимической реакции (прежде всего по краям), а также чешуйка и стружка, появившиеся вследствие абразивной нагрузки. На основании внешнего вида следов износа становится ясно, что все основные меха-

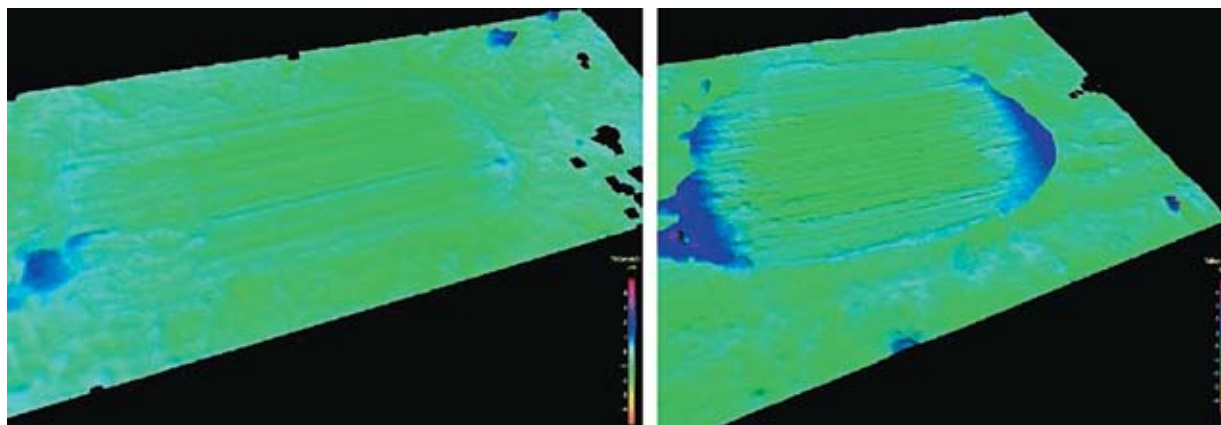


Рис. 4. 3D-изображения следов износа на двух поверхностях контактных штифтов, подвергнутых разной нагрузке. Сравняются следы износа при нагрузке в 1 и 5 Н. Для обоих снимков была использована одинаковая цветовая шкала для передачи информации о высоте. При нагрузке в 1 Н заметны лишь несильно выраженные царапины, в то время как при 5 Н видны четко выраженные царапины и деформация материала

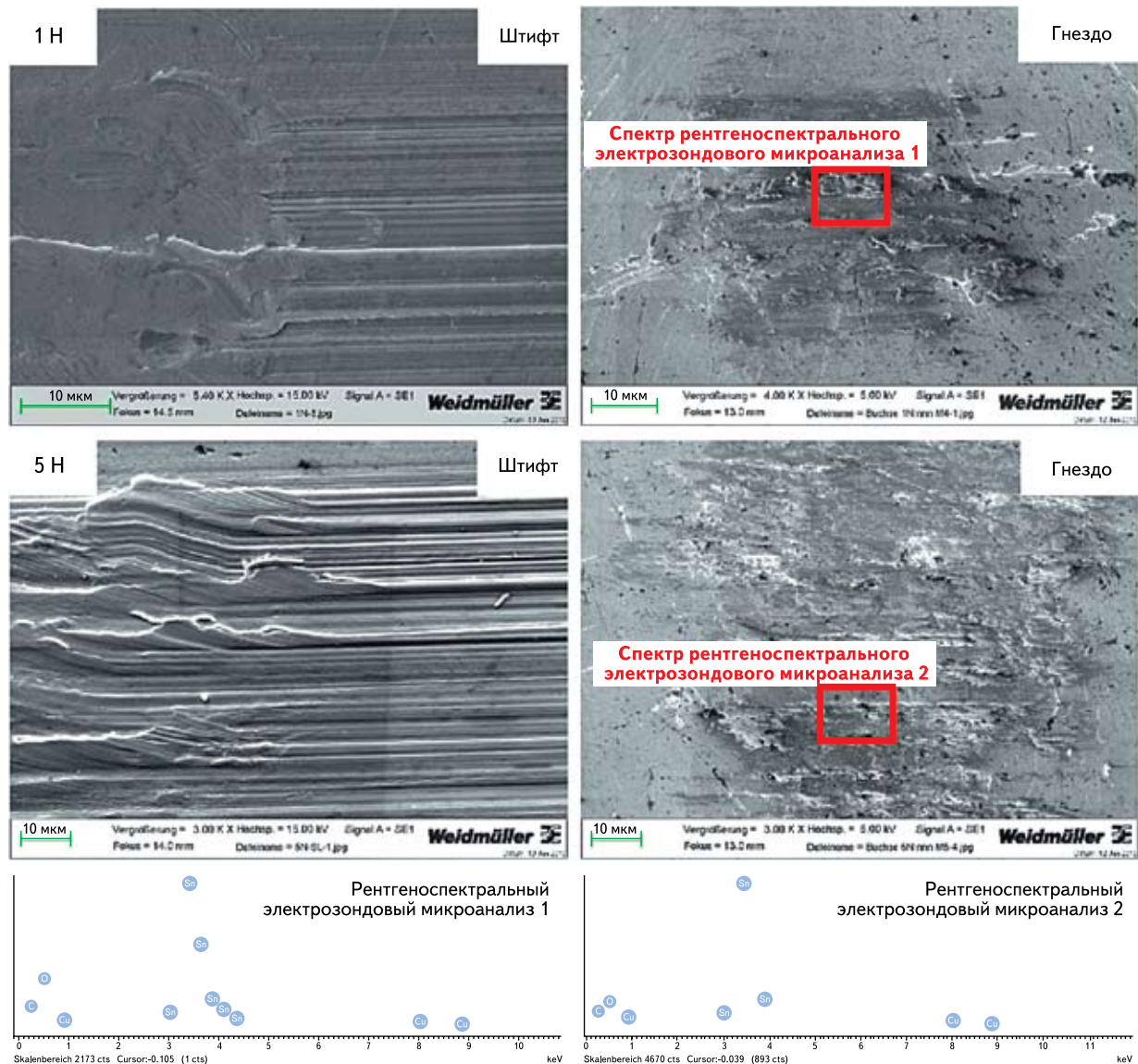


Рис. 5. Проведенные при помощи метода РЭМ и рентгеноспектрального электрозондового микроанализа исследования следов износа на поверхности контактного штифта и поверхности гнездовой детали

сопротивления при нагрузке в 1 Н, пути трения 0,2 мм и скорости скольжения 60 мм/мин. на протяжении 50 циклов трения. Измеренная сила трения составляет в данном исследовании 0,12 Н, а следующий отсюда коэффициент трения (при нормальной силе в 1 Н коэффициент трения и сила трения одинаковы) равен 0,12. Из-за присутствия предварительных фаз начала процесса сила трения и коэффициент на протяжении первых трех циклов немного завышены. Этот эффект наблюдался независимо от контактной силы и скорости во время всех проводимых исследований и объясняется начальной деформацией микрощероховатостей задействованных поверхностей олова в области контакта. Контактное сопротивление составляет в начале от 3 до 4 мОм и возрастает на протяжении первых 10 циклов до своего окончательного уровня: в среднем 5,29 мОм.

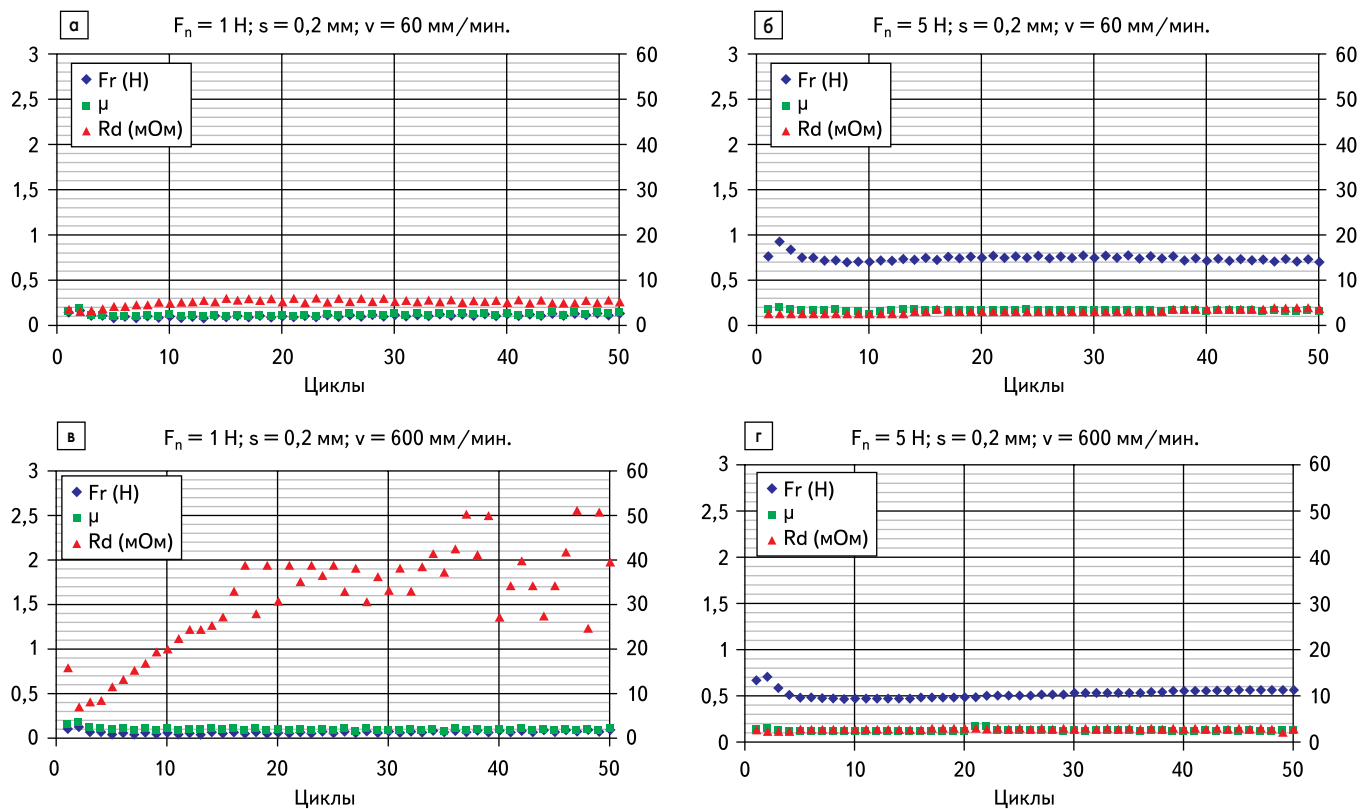
Если сравнить с этим рис. 6б, на котором изображена диаграмма трения/времени похожего испытания при контактной силе в 5 Н, то можно констатировать, что, несмотря на повышение контактной силы, устанавливается приблизительно такой же коэффициент тре-

ния — 0,15, это означает, что контактная нормальная сила не оказывает никакого влияния на коэффициент трения. Контактное сопротивление в начале составляет немного меньше 3 мОм и постоянно возрастает на протяжении 50 циклов до своего окончательного значения в 4 мОм.

Для создания диаграммы трения/времени на рис. 6в были использованы те же условия для исследования, что и для создания диаграммы на рис. 6а, лишь скорость скольжения была увеличена до 600 мм/мин. Диаграмма показывает, что и в данном случае, несмотря на повышение скорости скольжения, в среднем был получен постоянно низкий коэффициент трения, равный 0,08, при этом не учитывались короткие фазы начала процесса. Однако изменение во времени контактного сопротивления отчетливо демонстрирует другое поведение. На протяжении первых 15 циклов трения контактное сопротивление постоянно возрастает до значения почти в 30 мОм. Остальные циклы характеризуются нестабильным поведением сопротивления, которое достигает максимального значения в 50 мОм.

Изменение контактной нормальной силы до 5 Н приводит к коэффициенту трения, который находится также на низком уровне и равен в среднем 0,1, что можно увидеть на рис. 6г. Однако заметно, что значение силы трения, в среднем равное 0,5 Н, по сравнению с тем, что приведено на рис. 6б, приблизительно на 30% ниже. Возможную причину нужно искать в динамических эффектах, которые происходят на более высоких скоростях. Можно предположить, что отдельные частицы заняты в процессе качения в качестве так называемых третьих тел и ведут к сокращению силы трения [1, 2]. При сравнении рис. 6б с рис. 6в можно заметить, что увеличение контактной нормальной силы при высокой скорости скольжения ведет к уменьшению контактного сопротивления до значения, в среднем равного 2,88 мОм.

На основе статистического планирования испытаний из трех варьируемых в данном исследовании параметров нагрузки (контактная сила, скорость скольжения и путь трения) был создан план испытаний с 23 факторами [1, 7]. На основе обобщения отдельных этапов про-


Рис. 6. Типичная диаграмма трения/времени

Пояснение к диаграммам а и б: при нормальной силе в 1 Н коэффициент трения и сила трения одинаковы

Таблица 1. Влияния основного воздействия и взаимодействия на коэффициенты трения

Тест	Уровень (F_N, v, s)	$X_{\text{рег}} \mu$	Основное воздействие			Взаимодействие		
			$\Delta\mu (F_N)$	$\Delta\mu (v)$	$\Delta\mu (s)$	$\Delta\mu (F_N, v)$	$\Delta\mu (F_N, s)$	$\Delta\mu (v, s)$
1	(ннн)	0,12	-0,12	-0,12	-0,12	+0,12	+0,12	+0,12
2	(внн)	0,15	+0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	+0,15
3	(нвн)	0,078	-0,078	+0,078	-0,078	-0,078	+0,078	-0,078
4	(ввн)	0,105	+0,105	+0,105	-0,105	+0,105	-0,105	-0,105
5	(ннв)	0,54	-0,54	-0,54	+0,54	+0,54	-0,54	-0,54
6	(внв)	0,48	+0,48	-0,48	+0,48	-0,48	+0,48	-0,48
7	(нvv)	0,239	-0,239	+0,239	+0,239	-0,239	-0,239	+0,239
8	(vvv)	0,357	+0,357	+0,357	+0,357	+0,357	+0,357	+0,357
Результат		$\Sigma/8$	$\Sigma/4$	$\Sigma/4$	$\Sigma/4$	$\Sigma/4$	$\Sigma/4$	$\Sigma/4$
		0,259	0,0287	-0,127	0,29075	0,04375	0,00025	-0,0842
Влияние на μ			0	---	+++	+	0	--

Примечание. н — низкий уровень, в — высокий уровень;

+ — небольшое увеличение; ++ — увеличение; +++ — значительное увеличение;

-- — небольшое снижение; --- — снижение; ---- — значительное снижение; 0 — не имеет значения.

Таблица 2. Влияния основного воздействия и взаимодействия на контактное сопротивление

Тест	Уровень (F_N, v, s)	$X_{\text{рег}} R_d$	Основное воздействие			Взаимодействие		
			$\Delta R_d (F_N)$	$\Delta R_d (v)$	$\Delta R_d (s)$	$\Delta R_d (F_N, v)$	$\Delta R_d (F_N, s)$	$\Delta R_d (v, s)$
1	(ннн)	5,29	-5,29	-5,29	-5,29	+5,29	+5,29	+5,29
2	(внн)	3,08	+3,08	-3,08	-3,08	-3,08	-3,08	+3,08
3	(нвн)	67,35	-67,35	+67,35	-67,35	-67,35	+67,35	-67,35
4	(ввн)	2,88	+2,88	+2,88	-2,88	+2,88	-2,88	-2,88
5	(ннв)	90,49	-90,49	-90,49	+90,49	+90,49	-90,49	-90,49
6	(внв)	2,66	+2,66	-2,66	+2,66	-2,66	+2,66	-2,66
7	(нvv)	172,5	-172,5	+172,5	+172,5	-172,5	-172,5	+172,5
8	(vvv)	3,87	+3,87	+3,87	+3,87	+3,87	+3,87	+3,87
Результат		$\Sigma/8$	$\Sigma/4$	$\Sigma/4$	$\Sigma/4$	$\Sigma/4$	$\Sigma/4$	$\Sigma/4$
		43,521	-80,797	36,282	47,742	-35,777	-47,457	5,3525
Влияние на R_d			---	++	++	--	--	0

Примечание. н — низкий уровень, в — высокий уровень;

+ — небольшое увеличение; ++ — увеличение; +++ — значительное увеличение;

-- — небольшое снижение; --- — снижение; ---- — значительное снижение; 0 — не имеет значения.

цесса статистического плана испытаний была создана общая матрица, которая представлена в таблицах 1 и 2. Эти таблицы демонстрируют, как в восьми испытаниях три независимых параметра нагрузки — F_N, v и s , каждый из которых варьируется на двух уровнях, влияют на расчет измеряемых величин (коэффициент трения, контактное сопротивление). Для определения влияний на коэффициенты трения и контактное сопротивление средним значениям испытания для каждого фактора был присвоен знак. Для верхнего уровня был выбран знак (+), для нижнего (-). Разница этих средних значений представляет собой меру для оценки влияния того или иного фактора. Результат представлен в виде среднего значения четырех комбинаций испытаний на низком и высоком уровне. Зависимость влияния одного фактора на значения измеряемой величины при учете других факторов описывается так называемое взаимодействие. Входит ли фактор влияния в расчет положительно или отрицательно, зависит от знака отдельного уровня фактора для каждого испытания. Для определения влияний взаимодействий при умножении знаков получается соответствующая величина влияния.

Влияния основного воздействия и взаимодействия могут быть интерпретированы на основании значений из таблицы 1 следующим образом:

- Влияние контактной силы на средний коэффициент трения незначительно.
- С увеличением скорости средний коэффициент трения значительно уменьшается.
- Увеличение пути трения ведет к значительному повышению коэффициента трения.

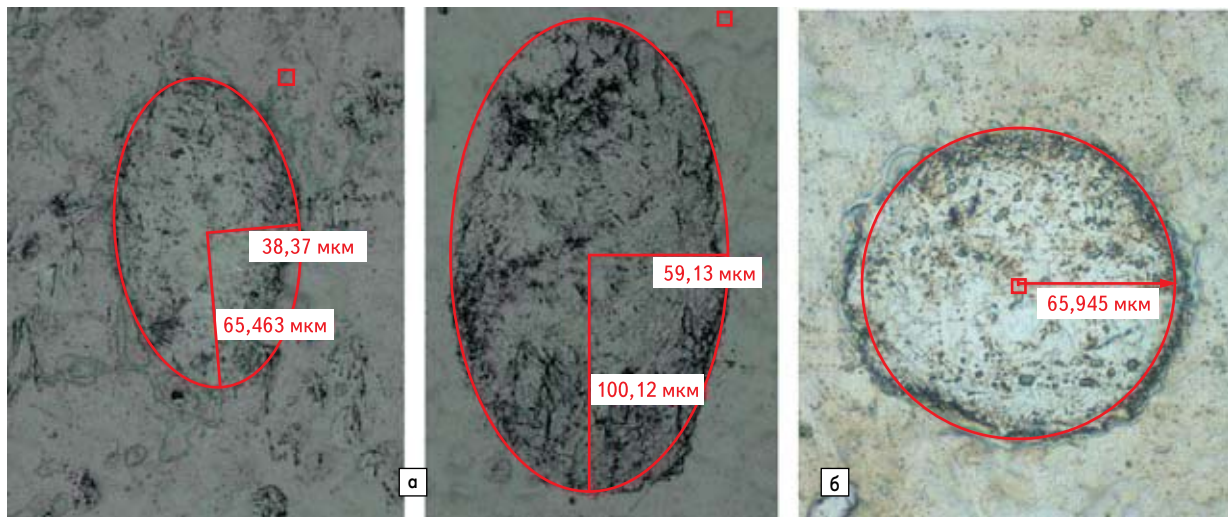


Рис. 7. Сравнение типичных отпечатков контакта после одноразовой нагрузки: а) гнездового контакта контактной силой в 1 Н; б) поверхности контактного штифта силой в 5 Н

- Дополнительное влияние скорости немного усиливает влияние контактной силы на коэффициент трения.
- Комбинированное влияние контактной силы и пути трения незначительно.
- Дополнительное влияние пути ослабляет влияние скорости на коэффициент трения. Влияния основного воздействия и взаимодействия могут быть интерпретированы на основании значений из таблицы 2 следующим образом:
- Как и ожидалось, с увеличением контактной силы значительно сокращается среднее значение контактного сопротивления.
- С увеличением скорости повышается влияние взаимодействия.
- С увеличением пути трения повышается среднее значение контактного сопротивления.
- Дополнительное влияние скорости ослабляет влияние контактной силы на контактное сопротивление.
- Дополнительное влияние пути трения ослабляет влияние контактной силы на контактное сопротивление.
- Дополнительное влияние пути на оба уровня скорости незначительно.

Анализ влияния основного воздействия и взаимодействия, как и ожидалось, показал, что по мере увеличения контактной силы снижается среднее контактное сопротивление. С контактно-физической точки зрения такое поведение возможно, так как при изменении контактной нормальной силы изменяется количество, величина и распределение микроплощадей, которые способствуют контактному сопротивлению [2, 6]. Как раз в связи с этим напряжением поверхности является характерным параметром, который должен учитываться при описании контактного сопротивления. Для определения напряжения поверхности оба контактных партнера (штифт и гнездовая деталь) подверглись одноразовой нагрузке контактной нормальной силой в 1 Н и 5 Н. Возникшие при этом контактные поверхности были измерены с помощью оптической микроскопии (рис. 7).

Анализ каждого из пяти отпечатков показал, что увеличение в пять раз контактной нормальной силы в среднем ведет лишь к удвоению

контактной поверхности и, таким образом, к увеличению приблизительно в три раза напряжения поверхности. Следующим важным параметром для описания трибологических свойств электрической контактной системы является твердость используемой системы слоев. Исследуемые в данной работе поверхности олова имеют толщину от 4 до 6 мкм, так что изначальное измерение твердости по методу Виккерса было невозможно из-за большой глубины проникновения измерительной пирамиды, даже при очень маленькой нагрузке. В связи с этим измерения твердости проводились по методу Бринелля. При помощи стального (100Cr6) шарика диаметром 3 мм при контактной нормальной силе в 5 Н был сделан отпечаток на поверхности и в заключение измерен при помощи трехмерной микроскопии. Преимуществом этого метода является малая глубина проникновения шарика в поверхность. В данном случае глубина проникновения составляла менее 500 нм. Полученные из геометрических измерений величины твердости в среднем равнялись приблизительно 32 Н/мм².

Относительно отдельного микроконтакта для отпечатка контакта существует критическая величина, при которой происходит переход из упругой в пластическую деформацию [6]. Однако эта величина зависит от таких параметров материала, как микротвердость, модуль упругости, топографические параметры высоты, вертикальные углы и радиус выпуклости микровершин, а также от температуры и структуры кристалла. Доли упругой и пластической деформации определяются, с одной стороны, с помощью этих величин, а с другой — с помощью множества и пространственной плотности точек контакта обоих контактных партнеров. Обычно при соприкосновении контактных материалов получающие первыми нагрузку вершины были бы подвергнуты сначала упругой, а затем в большинстве случаев пластической деформации, что приводит к наклепу. Однако олово относится к тем немногим материалам, с которыми наклеп не происходит при комнатной температуре. За счет деформации первых вершин с микроконтактами обе контактные площадки могут и дальше сближаться, так что

остальные вершины достигают соприкосновения. Этот процесс продолжается до тех пор, пока система не достигнет равновесия между внешними и внутренними силами, а механическая нагрузка контакта не будет исключительно упругой [6].

Обычно в исследуемой здесь контактной системе имеется износ, обусловленный скольжением, который возникает из-за трения скольжения обоих контактных партнеров при соединении и разъединении системы. Находящиеся на подверженных нагрузке контактах признаки износа вызваны четырьмя основными механизмами износа, такими как разрушение поверхности, абразия, адгезия и трибохимическая реакция. В то время как механизмы износа — разрушение поверхности и абразия — в основном вызваны контактной механикой, то есть силами, напряжениями и деформациями, то в случае с механизмом износа — адгезией — важную роль играют взаимодействия материала на атомном и молекулярном уровне. Трибохимические реакции отличаются тем, что подвергающиеся нагрузке поверхности реагируют с окружающей средой и, таким образом, при относительном движении постоянно возникают и изнашиваются новые продукты реакции [1].

Макроскопические фрикционные свойства в первую очередь определяются топографией поверхности. Высокие силы трения вызываются соединением неровностей поверхностей материалов, которые в процессе испытания достаточно быстро ведут к износу в области нескольких микрометров. Из-за микросоединения и увеличивающегося движения увеличивается деформация микровыступов. В дальнейшем процессе из-за увеличивающейся деформации это приводит местами к отказу материала и к разрыву и отрыву микровыступов. Оторвавшиеся выступы становятся свободными частицами, которые ложатся во впадины и ниши поверхности и таким образом уменьшают неровность поверхности контакта. При определенных условиях свободные частицы деформируются и приближаются по своему контуру к шарообразной форме и в дальнейшем могут действовать в роли ро-

лико- или шарикоподшипника. Результатом этого динамического процесса может быть и зависимость скорости силы трения. Можно предположить, что при высоких скоростях оторвавшиеся частицы участвуют в процессе качения в качестве так называемых третьих тел и вызывают сокращение коэффициента трения. При соответствующих небольших контактных нормальных силах эти динамические эффекты ведут к увеличению контактного сопротивления, так как невозможно больше проникнуть сквозь возникшие оксидные слои из-за их малого напряжения поверхности.

Заключение

Путем изменения нормальных сил, скоростей и путей трения можно было при помощи статистического планирования исследований вычислить параметры влияния, которые постоянно воздействуют на процесс трения и сопротивления.

Основываясь на этом анализе, можно сделать следующие выводы:

- Относительно среднего коэффициента трения влияние контактной силы незначительно, в то время как влияние контактной силы на среднее контактное сопротивление очевидно.
- Увеличивающаяся скорость трения сокращает средний коэффициент трения, однако приводит к повышению контактного сопротивления.
- С увеличением пути трения увеличиваются средний коэффициент трения и контактное сопротивление.

Из-за степени сложности трения и износа относительно электрической характеристики контакта эти результаты в настоящий момент касаются лишь исследуемой в данной работе пары материалов. Перенос на общепринятую модель трения, износа и контактного сопротивления для поверхностей олова является итеративным процессом, в котором необходимо разработать еще более глубокое понимание взаимодействия силы, геометрии и поверхности в электрической системе разъемов. ■

Примечание. Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen. 2010. № 5. Германия).

Литература

1. Czichos H., Habig K. H. Tribologie-Handbuch. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2003.
2. Popov V. L. Kontaktmechanik und Reibung. Berlin — Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
3. Santner E. Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen. Renningen: Expert Verlag, 2004.
4. Knoblauch G. Steckverbinder. Renningen: Expert Verlag, 2002.
5. Knoblauch G. Steckverbinder II. Renningen: Expert Verlag, 2004.
6. Vinaricky E. Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Berlin – Heidelberg: Springer Verlag, 2002.
7. Kleppmann W. Taschenbuch Versuchsplanung. München – Wien: Carl Hanser Verlag, 2008.
8. Jünemann H. Tribometrie. Renningen: Expert Verlag, 1997.