

Особенности технологии

ультразвуковой сварки соединений силовых модулей

Основной тенденцией развития технологий силовых полупроводниковых модулей является непрерывное повышение плотности мощности и рабочей температуры кристаллов. Для достижения этих целей необходимы новые, более надежные способы соединения электрических проводников. Одним из наиболее современных приемов подключения выводов чипов является металлическая ультразвуковая сварка. В статье рассматриваются вопросы, касающиеся электрических и тепловых характеристик, а также надежности данного метода в сравнении с широко распространенными технологиями пайки мягкими припоями и микросварки. Анализируются проблемы стойкости соединений к тепловым ударам и вибрационным воздействиям. Для проведения испытаний использовался сканирующий электронный микроскоп, качество соединений оценивалось с помощью многократных измерений контактного сопротивления.

**Роман Ширбс
(Roman Tschirbs)**

**Георг Боргофф
(Georg Borghoff)**

**Томас Нубель
(Thomas Nübel)**

**Вильгельм Руше
(Wilhelm Rusche)**

**Гвидо Стротман
(Guido Strotmann)**

**Перевод:
Евгений Карташев**

Введение

Основные усилия разработчиков силовых полупроводниковых модулей направлены на поиск технологий, обеспечивающих повышение рабочей температуры без снижения надежности и уменьшения ресурса. Только так можно удовлетворить требования по повышению плотности тока в компактном конструктиве. Одним из наиболее уникальных решений, обеспечивающих существенное повышение токовой нагрузки соединения, стала технология прижимного контакта.

Подключение внешних терминалов тиристоров и диодов в дисковых корпусах (рис. 1) осуществляется с помощью прижима. Развитие этого метода привело к внедрению внутреннего прижимного контакта в мощных изолированных модулях, показанных на рисунке. Наиболее широко используемым способом

реализации внутренних связей до сих пор является пайка мягкими припоями, являющаяся вообще первой в мире технологией металлического соединения, придуманной более 5000 лет назад. При производстве силовых полупроводниковых модулей пайка используется с 1975 г., в последующие десятилетия этот процесс непрерывно совершенствовался. На рис. 2 показана конструкция широко известного модуля стандарта 62 мм, в котором все сигнальные и силовые связи выполнены путем пайки мягким припоем.

Энергия ультразвука была впервые использована в 1962 г. основателями Orthodyne Electronics Corporation (Orthodyne) для формирования промежуточных проводных соединений [1]. Начиная с этого времени ультразвуковая сварка алюминиевых проводников стала основным способом подключения силовых кремниевых чипов. Подобно пайке



Рис. 1. Биполярные дисковые силовые транзисторы с внешним прижимным контактом и биполярные изолированные модули с внутренним прижимным контактом

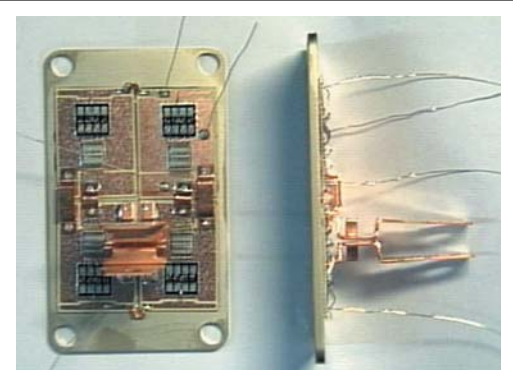


Рис. 2. Конструкция стандартного модуля 62 мм с паяными соединениями (1998 г.)

мягкими припоями, микросварка проводников требует применения дополнительных материалов (припой, проводов), через которые осуществляется связь кристаллов с внешними терминалами модуля (рис. 3).

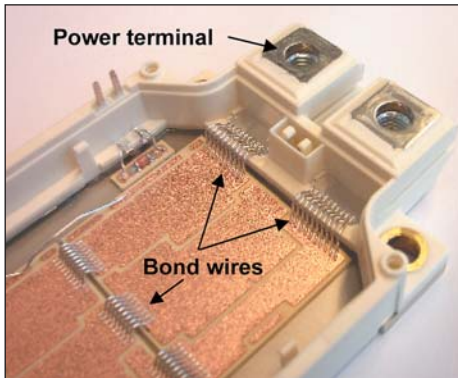


Рис. 3. Промежуточные соединения с помощью микросварки

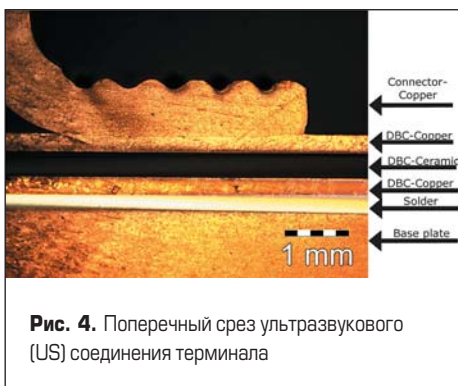


Рис. 4. Поперечный срез ультразвукового (УЗ) соединения терминала

Сравнение упомянутых выше технологий и анализ их экономической эффективности — применительно к массовому производству — позволяет (в рамках данной статьи) отказаться от дальнейшего рассмотрения прижимного способа соединения. Постоянный рост потребляемой мощности кремниевых чипов и увеличение предельного значения их рабочей температуры T_{VJOP} [2, 3] требует от технологов поиска более эффективных решений. Основным препятствием на пути повышения потребляемой мощности в настоящее время является именно надежность и ресурс силовых контактов. Для преодоления этой проблемы необходима высоконадежная технология соединений, в качестве которой может быть использована ультразвуковая металлургическая сварка.

Физические свойства ультразвукового сварного контакта

Ультразвуковая сварка является разновидностью полноценного сварочного процесса. Соединяемые элементы следует располагать близко друг к другу, причем один из них должен быть надежно закреплен. После этого сварочный аппарат создает механическое давление на второй, подвижный контакт и формирует поток ультразвуковой энергии. Колебательные движения соединяемых деталей приводят к удалению не-

однородностей и оксидных пленок с их поверхностей. Поверхности раздела кристаллов сближаются на атомное расстояние, что приводит к сильному притяжению поверхностных атомов и созданию сварного соединения без нагрева металлов до температуры плавления [4]. При этом не требуется применения расходных материалов, таких как припой или соединительные проводники. Исключается также технологический этап покрытия или очистки поверхности, таким образом УЗ-сварка является одним из самых экологически чистых способов соединения. Технология ультразвуковой сварки известна с 1952 года [4], она достаточно широко используется в автомобильной отрасли для формирования автомобильных монтажных жгутов, пружинных контактов реле и ряда других применений, в том числе и сварки проводников. Применение УЗ-технологии для соединения одинаковых материалов, например из меди марки OFHC, обеспечивает максимально возможную электропроводность контакта. Если свариваемые поверхности имеют одинаковый коэффициент температурного расширения (КТР), то исключается возможность расслоения соединения и обеспечивается долговременная стабильность его свойств.

Важнейшим параметром, позволяющим оценить пригодность технологии соединения для применения в силовой электронике будущего, является температурный диапазон, что естественным образом следует из тенденции повышения рабочей температуры чипов. Чтобы продемонстрировать достоинства УЗ-сварки для подключения медных терминалов, рассмотрим параметры материалов, участвующих в основных технологиях соединения: пайка мягкими припоями, микросварка алюминиевых проводников и ультразвуковая сварка меди (табл. 1).

Простое сравнение приведенных значений демонстрирует очевидные преимущества УЗ-технологии по всем рассматриваемым показателям. Мягкие припои имеют самую низкую температуру плавления, а у алюминиевых проводников наименьший предел текучести — параметр, от которого непосредственно зависит механическая прочность. Данные, показанные в таблице 1, подтверждают пригодность УЗ-процесса для образования медных соединений, работающих при высокой температуре. Кроме физических ограничений,

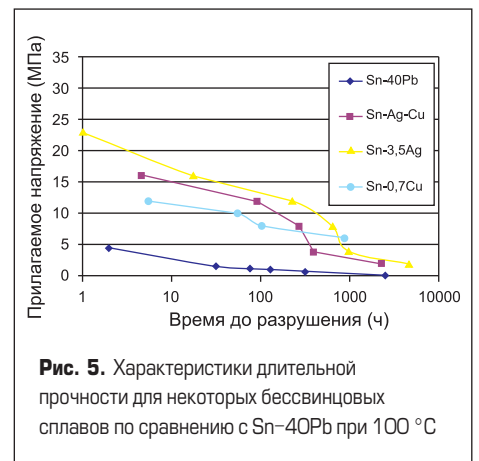


Рис. 5. Характеристики длительной прочности для некоторых бессвинцовых сплавов по сравнению с Sn-40Pb при 100 °C

упомянутых выше, все типы мягкого припоя обладают свойством текучести при постоянной нагрузке.

На рис. 5 приведены графики, показывающие время до разрушения для различных типов припоев в условиях реальной механической нагрузки при температуре 100 °C [6]. Очевидно, что для увеличения срока службы паяного соединения необходимо сводить к минимуму уровень механической нагрузки. Механический стресс может создаваться в результате внешнего воздействия или (что гораздо более опасно) может быть вызван неудачным дизайном самого силового модуля. Воздействие термоциклов при различающихся значениях КТР создает наиболее сильные внутренние механические напряжения. Общеизвестно, что самый сильный стресс испытывает паяное соединение базовой платы и изолирующей керамической DBC-подложки, которое и разрушается первым в условиях термоциклирования [7]. Чтобы избежать эффекта механической релаксации или текучести, наведенной термомеханическим стрессом, паяные соединения по возможности должны быть заменены на другие, более надежные.

В высокоточных применениях становятся очевидными ограниченные возможности сварных соединений алюминиевых проводников. Для повышения токовой нагрузки и снижения температуры контакта используется параллельное включение нескольких проводов, как показано на рис. 2. Для иллюстрации электротепловых преимуществ ультразвуковой сварки по сравнению с данным видом соединения были проведены многочисленные

Таблица 1. Свойства материалов применительно к основным технологиям соединения

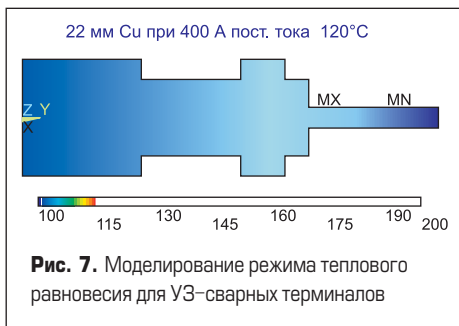
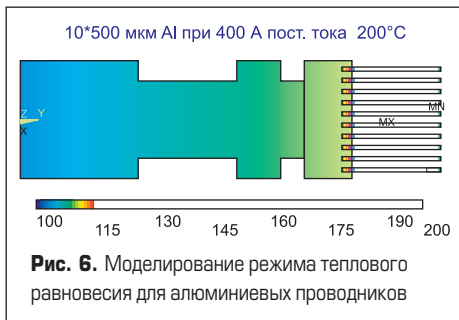
Технология	Температура плавления, °C	Модуль упругости, ГПа	Предел текучести (смещение 0,2%), МПа	Предел прочности на разрыв, МПа
Мягкий припой (SnAg 3,5)	221	50	23	27
Микросварка (алюминиевый проводник)	660	68	12	47
УЗ-сварка (медь)	1083	126	340	351

Таблица 2. Электротепловые свойства материалов мягкого припоя, алюминия и меди

Технология	Удельное электрическое сопротивление, 10 ⁻⁶ Ом·см	Теплопроводность, Вт/м·К
Мягкий припой (SnAg 3,5)	13,1	53
Микросварка (алюминиевый проводник)	4,3	240
УЗ-сварка (медь)	1,9	390

расчеты и моделирование, основанное на характеристиках материалов (табл. 2) в применении к силовым терминалам, показанным на рис. 2.

При моделировании были использованы одинаковые граничные условия: температура 100 °С нижнего слоя DBC-платы и 110 °С в зоне подключения внешнего терминала. Как показано на рис. 6, при протекании постоянного тока 400 А максимальный перегрев алюминиевых проводников достигает 200 °С.



В тех же условиях температура ультразвукового сварного соединения не превышает 120 °С (рис. 7). Приведенные данные соответствуют случаю выбора минимально допустимого суммарного сечения проводников для заданной плотности тока. Очевидно, что при увеличении площади перегрев будет еще ниже. Соответствующее моделирование было проведено и для 10 проводников сечением 500 мкм, при этом температура перегрева достигла 148 °С.

Аналогичное моделирование было проведено для сравнения токонесущей способности микросварного соединения алюминиевых проводников и УЗ-сварных соединений. Расчетное значение мощности рассеяния проводников (рис. 6), пропорциональное омическому сопротивлению, использовалось как референтная величина. При заданных граничных условиях возможное увеличение тока терминала составляет 62% при понижении температуры на 31%. Этим наглядно подтверждается тот факт, что допустимая токовая нагрузка силовых модулей может быть повышена за счет применения УЗ-сварных соединений. Следует отметить, что паяное соединение обеспечивает аналогичные токовые характеристики за счет очень тонкого слоя пайки и большой площади паяного контакта.

Эксперименты показали, что ультразвуковая сварка обеспечивает и лучшие прочностные характеристики по сравнению с пайкой. Как было отмечено выше, паяным соединениям свойственен эффект текучести, особенно проявляющийся с течением времени. Результаты краткосрочных испытаний на растяжение за счет смещающей нагрузки (2 мм/мин) показаны на рис. 8. Кривые зеленого цвета, соответствующие паяным соединениям, показывают неожиданное разрушение в результате небольшого смещения. Синие кривые, напротив, демонстрируют медленное отслаивание УЗ-сварки в тех же условиях. Причем электрический контакт не нарушается при смещении до 0,5 мм.

В 1860 г. немецкий ученый Август Велер, исследующий усталостные процессы в осях железнодорожных вагонов, пришел к выводу, что циклические нагрузки влияют на срок службы в большей мере, чем пиковые. Он определил, что именно параметры циклических стрессов определяют предел выносливости железнодорожных осей. С тех пор специалисты по материаловедению занимаются изучением усталостных процессов вследствие циклических нагрузок и их влияния на локальные структурные повреждения материалов. Оказалось, что

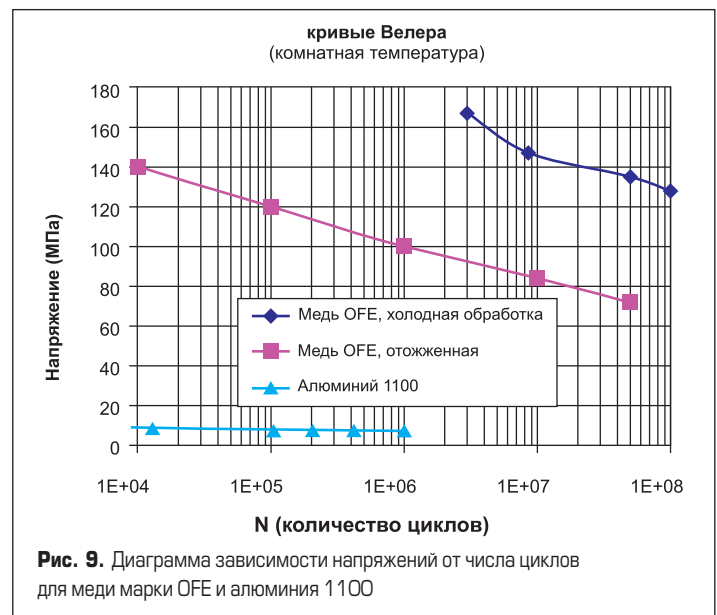
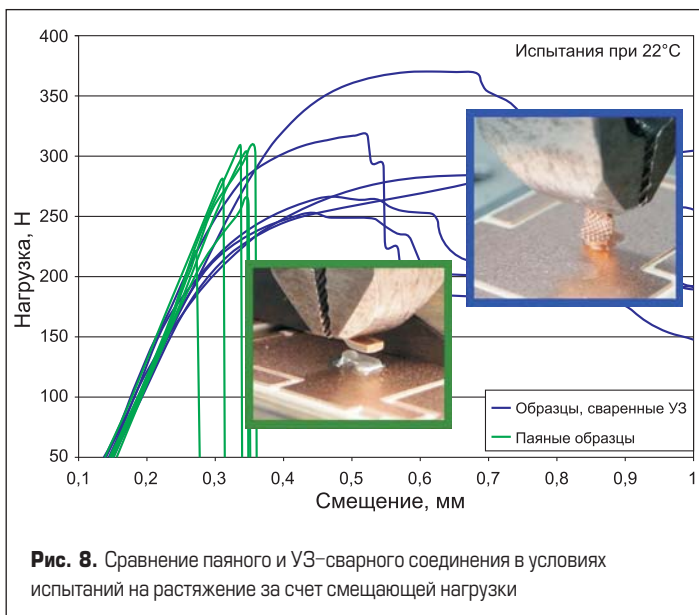
срок службы в основном ограничивается «многоцикловою усталостью», а для оценки устойчивости материала к термоциклированию используются так называемые «кривые усталости» (S-N curve), известные также как «кривые Велера». Они представляют собой графики зависимости циклических напряжений (S) от числа циклов (N) в логарифмическом масштабе (рис. 9).

В отличие от стали, алюминиевые и медные сплавы не имеют предела усталости, однако их структура также может повреждаться при воздействии повторяющейся нагрузки. Для сравнения с «эквивалентным» значением предела усталости разработчики обычно используют термин «усталостная прочность» за 10⁸ циклов. Рис. 9 демонстрирует, что этот показатель для меди гораздо выше, чем для алюминия, что является еще одним поводом подумать о замене алюминиевых проводников для формирования связей на DBC-подложке.

Основными параметрами, влияющими на усталостную прочность и ограничиваемый ею срок службы, являются амплитуда механического напряжения, качество поверхностей и размер частиц материалов, а также рабочая температура.

Вопросы устойчивости силовых модулей к вибрационным воздействиям все больше интересуют разработчиков, причем это касается не только транспортных применений. Для оценки устойчивости УЗ-сварных соединений к вибрациям проведены ускоренные испытания по стандарту IEC 60068-2-64 (рис. 10, 11). Этот стандарт в первую очередь относится к изделиям, работающим в таких вибронегруженных применениях, как транспорт, авиация, космос. В ходе тестов, продолжающихся 94 часа, изделие подвергается случайной вибрации в диапазоне частот 10–2000 Гц при ускорении 177 м/с², что в 18 раз превышает ускорение свободного падения и в 2 раза больше ускорения пилотируемого космического корабля.

Не менее важным является анализ влияния тепловых стрессов (TST — thermal shock



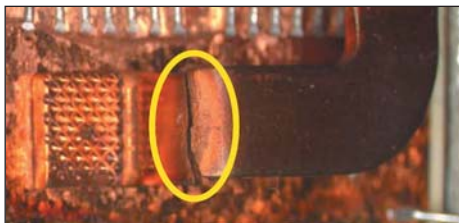


Рис. 10. Состояние отказа при ускоренных испытаниях на вибрацию

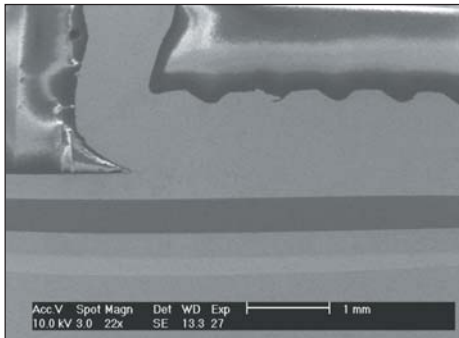


Рис. 11. Изображение, полученное с помощью SEM (сканирующий электронный микроскоп) и подтверждающее отсутствие дефектов после вибрационного теста

test) на срок службы полупроводниковых модулей. Были проведены соответствующие испытания с градиентом $-40 \dots 125 \text{ }^\circ\text{C}$, позволяющие сравнить устойчивость УЗ-сварных и паяных соединений на воздействие TST. В левой части рис. 12 показаны испытываемые модули, собранные с применением этих двух технологий: верхний — с ультразвуковой сваркой терминалов, нижний — с паяным соединением.

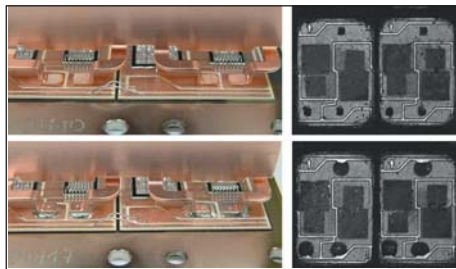


Рис. 12. Сравнительные испытания УЗ-сварки и мягкого припоя; изображение, полученное с помощью USM после 100 циклов тепловых ударов

Для оценки качества соединения до и после тестов (100 циклов) использовался ультразвуковой микроскоп (USM). Результаты анализа представлены в правой части рис. 12: верхний рисунок (УЗ-сварка) показывает отсутствие изменений относительно начального состояния. В отличие от этого рисунка внизу демонстрирует отслоение паяного соединения (светлые зоны) от DBC-платы в зоне контакта. Качество соединения также оценивалось по изменению контактного сопротивления, создающего падение напряжения, например, последовательно с прямым напряжением диода V_F . Как показано на рис. 13, изменения контактного сопротивления выявлено не было.

Заключение

Для изучения свойств ультразвуковых сварных соединений были проведены тесты на воздействие вибраций и тепловых ударов. Результаты испытаний оценивались с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) и измерения контактного сопротивле-

ния. Многочисленные тесты подтвердили, что использование УЗ-сварки при сборке силовых модулей позволяет увеличить срок их службы, поскольку ультразвуковые сварные соединения в отличие от пайки не подвержены воздействию усталостных эффектов.

Литература

1. <http://www.orthodyne.com>
2. Hierholzer M., Laska Th., Münzer M., Pfirsich F., Schäffer C., Schmidt Th. 3rd Generation of 1200V IGBT-Modules. PCIM Proc. 1999.
3. Bässler M. et al. 1200V IGBT4-High Power new Technology Generation. PCIM Proc. 2006.
4. <http://www.amtechultrasonic.com>
5. Database for Solder Properties; National Institute of Standards and Technology & Colorado School of Mines
6. Grud A. Lead free solders in electronics. Heraeus Inc.
7. Lefranc G., Licht T., Mitic G. Properties of solders and their fatigue in power modules. ESREF 2002 Proceedings.
8. Copper Data Sheet for Cu-OFE, Deutsches Kupferinstitut.
9. Smith R., Hirschberg M., Manson S. Fatigue behaviour of materials under strain cycling in low and intermediate life range. NASA technical note D-1574.
10. Feldvoß M., Miller G. A new modular concept of solderable modules simplifies Inverter engineering and logistics. PCIM Proc. 1996. Nuremberg [11] Patent specification DE 3241061: Elastischer Einpressstift für lötfreie Verbindung, Fa. ERNI

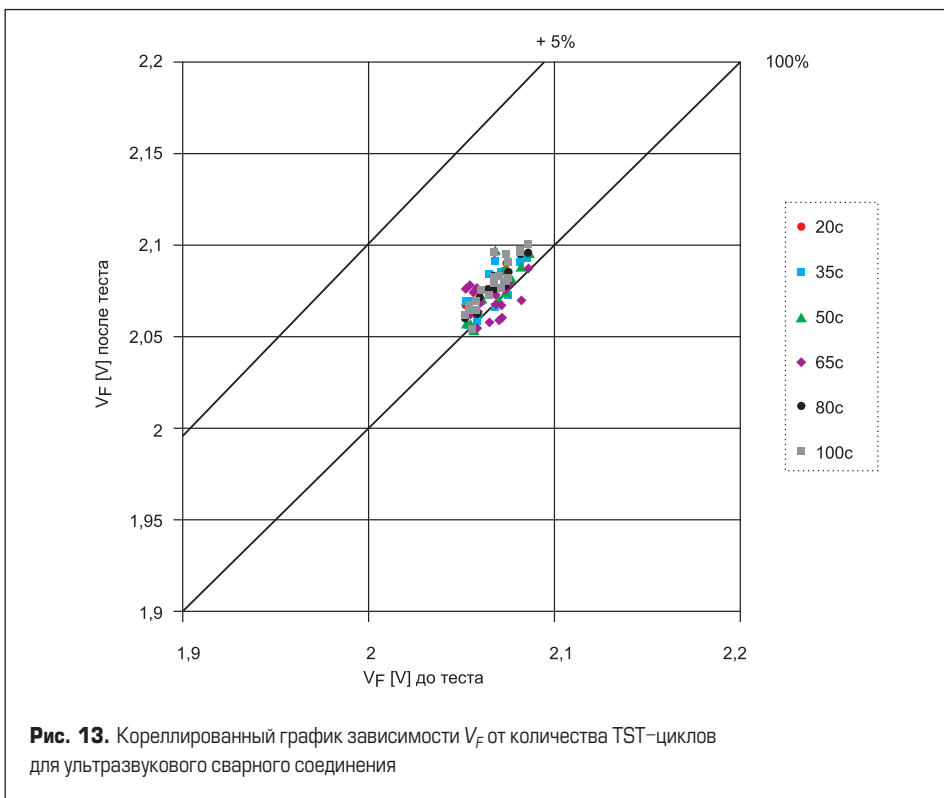


Рис. 13. Коррелированный график зависимости V_F от количества TST-циклов для ультразвукового сварного соединения