

Лазерная зачистка проводов — технология и применение

Технология лазерной зачистки (снятия изоляции) разработана агентством NASA в 70–80-х годах прошлого века в рамках программы по созданию космических кораблей шаттл (Space Shuttle). Изоляция проводов, применявшихся в шаттлах, была очень тонкой. Технология лазерной зачистки потребовалась из-за того, что опасность повреждения чувствительных проводников традиционными инструментами, предназначенными для механического удаления изоляции, оставалась слишком высокой. Эта оригинальная технология широко применяется и в современных лазерных установках, но уже в более экономичном сегменте.

Марат Саитгалеев

marat@clever.ru

Исследования в области лазерной зачистки начались в 1976 году, когда агентство NASA запустило программу по созданию улучшенного метода для снятия изоляции с проводов, чтобы преодолеть проблемы, возникшие при изготовлении систем проводной электрической коммутации при разработке шаттлов. Потребность в новом методе возникла из-за необходимости зачистки проводов с очень тонкой изоляцией, которые применялись в авиации и космических кораблях, где для уменьшения массы часто используются легкие провода малого диаметра. В результате появилась первая установка для лазерного снятия изоляции с проводов.

Специалисты NASA провели сравнение воздействия лазеров разных типов на изоляционные и проводящие материалы проводов и обнаружили, что наилучшим вариантом для решения поставленной задачи является углекислотный лазер. В процессе зачистки энергия (или излучение), испускаемая лазером, сильно поглощается материалом изоляции. По мере проникновения луча лазера в изоляцию он испаряет материал до проводника. Проводник в значительной мере отражает излучение при длинах волн углекислотного лазера, поэтому луч лазера не оказывает на него влияния. Поскольку в данных условиях металлический проводник, по сути, является зеркалом, процесс оказывается самоограничивающимся — то есть лазер испаряет весь материал изоляции до проводника и работа завершается. Соответственно, для предотвращения повреждения проводника не требуется каких-либо дополнительных мер.

Лазерная зачистка обладает множеством преимуществ по сравнению с традиционными способами:

- Отсутствие повреждения проводника — лазер не способен повредить металлический проводник, даже если он покрыт другим металлом, таким как олово или серебро. Это позволяет снизить требования к контролю качества и дает возможность конструкторам указывать более жесткие допуски и использовать провода с меньшей массой.

- Способность обрабатывать 99% типов изоляции — одна единица оборудования может справиться с большим разнообразием типов проводов и изоляций и обрабатывать целый спектр типов проводов, не прибегая к операциям перенастройки.
- Достижение более высокого качества зачистки гарантирует повторяемость результатов и увеличивает выход годных, что, в свою очередь, позволяет снизить затраты.
- Способность обрабатывать несколько проводов одновременно повышает производительность.
- Способность зачистки проводов различного диаметра: от 25 мкм до 25 мм (0,001"–1") — единый процесс обеспечивает снятие изоляции в огромном диапазоне диаметров проводов без их повреждения.
- Способность зачистки проводов различной формы — одна установка способна обрабатывать плоские, круглые, скрученные и экранированные кабели с минимальной заменой оснастки или вообще без ее замены, что повышает степень использования и производительность оборудования.
- Способность обеспечивать жесткие допуски ± 25 мкм (0,001") — для прецизионных задач.
- Возможность программирования различных конфигураций снятия изоляции для ее удаления в любом месте провода.

Поскольку лазерная зачистка является бесконтактным процессом, а управление лучом может осуществляться с высокой точностью, луч лазера допустимо направлять таким образом, чтобы получались различные конфигурации снятия изоляции, многие из которых практически не достижимы с помощью других методов, например:

- снятие изоляции с конца провода;
- поперечный разрез;
- поперечный и продольный разрез;
- перемычка;
- окна;
- мини-окна;
- разрезы под углом;
- программируемые конфигурации в любой точке провода или ленточного кабеля.

Методом лазерного снятия изоляции можно обрабатывать провода и кабели самых разнообразных типов и форм:

- одиночный провод;
- двойной провод;
- витая пара;
- многожильные кабели;
- экранированный провод/кабель;
- ленточный кабель;
- коаксиальный кабель;
- проводники со сложной формой в двух и трех измерениях, например спирали;
- ленточные и плоские кабели шириной до 285 мм (11,4").

Среди обрабатываемых составов изоляции можно отметить:

- Teflon/ПТФЭ (тефлон, политетрафторэтилен);
- силикон;
- ПВХ (поливинилхлорид);
- Каптон (каптон, полиимид);
- Mylar (майлар, полиэтилентерефталат);
- Kynar (кайнар, поливинилденфторид);
- стекловолокно;
- ML (полиимид);
- Nylon (нейлон, полиамид);
- полиуретан;
- Formvar (формвар, поливинилформальдегид);
- полиэфир;
- полиэфиримид;
- эпоксид;
- эмалевое покрытие;
- DVDF;
- Tefzel/ЭТФЭ (тефзел, этилентетрафторэтилен);
- Milene;
- полиэтилен;
- полиимид;
- ПВДФ (поливинилденфторид) и прочие твердые, мягкие и высокотемпературные материалы.

Насколько важны провода в современном мире? Посмотрите внутрь обычного домашнего или офисного электронного устройства, такого как телевизор, CD- или DVD-плеер, сотовый телефон, персональный компьютер, или любого другого электронного изделия. На первый взгляд вам покажется, что вы видите только печатные платы. Но приглядитесь внимательнее и вы заметите плоские кабели и отдельные провода, обеспечивающие огромное количество соединений. В современных электронных устройствах, так же как и в коммуникационных системах, соединяющих их, множество проводов. Они незаменимы для передачи сигналов и обеспечения питания — начиная с огромного количества шлейфов, по которым передаются данные локальных сетей, окружающих беспроводные системы коммуникаций, и заканчивая многими миллионами проводных соединений, обеспечивающих связь всех ответственных систем управления и коммуникации на бортах самолетов и других транспортных средств, и мельчайшими проволочками, которыми выполняются соединения в микросистемных системах или по которым передаются сигналы в медицинских имплантатах.

При традиционном механическом способе удаления изоляции применяются металлические лезвия, отрезающие изоляцию, позволяя стянуть ее с конца провода. И хотя для механической зачистки в современном оборудовании используются формованные лезвия, автоматическая манипуляция с проводами и прецизионное управление лезвиями, это оборудование все еще имеет одно общее свойство с ручным инструментом, предназначенным для снятия изоляции, — здесь необходимо повышенное внимание, чтобы не допустить повреждения провода.

Прежде разработчики и производители были вынуждены мириться с определенным уровнем повреждений проводников, вызванных применением механических лезвий для зачистки. А потому часто приходилось задавать электрическое сопротивление провода с более широким допуском, чем требовалось бы при другом раскладе. По сути, это означало, что проводники закладывались с большим диаметром. В результате провод в целом оказывался больше и дороже.

В ответственных производственных задачах такой подход неприемлем, и там, где первоочередную роль играет качество, должное признание получила лазерная зачистка. В самых современных изделиях крайне важно иметь возможность удалять изоляцию с провода с высокой точностью и без повреждения проводника. Оборудование для снятия изоляции, созданное на основе лазерной технологии, легко справляется с этим, полагаясь на способность света избирательно удалять неметаллические материалы изоляции, оставляя металлический проводник совершенно нетронутым.

Снятие изоляции — всего лишь удаление изоляции, покрывающей электропроводные жилы, для подготовки их к последующему монтажу. Традиционные способы данного процесса включают механический, абразивный, химический и термический методы. Но с каждым из этих методов связаны свои сложности, такие как повреждение проводника, малая скорость обработки и недостаточная точность либо низкое качество.

Ручной или полуавтоматический механический, химический или термический методы зачистки проводов обладают хорошо известными сложностями в обеспечении качества. Наиболее широко применяемый для зачистки проводов инструмент — механические лезвия. Они наилучшим образом подходят для прорезания изоляции проводов с простой круглой формой в сечении, то есть простых одинарных проводов. Но даже в этом случае возможно повреждение проводника при применении изношенных или не совсем подходящих к форме провода лезвий либо при недостаточно хорошем управлении процессом зачистки. Более того, механические методы плохо пригодны для зачистки витых или экранированных кабелей, сечение которых имеет не простую круглую форму.

Методы химического снятия изоляции страдают очень большой длительностью процесса и характеризуются трудностями, касающимися защиты окружающей среды. В таких

процессах часто применяется горячая серная кислота или перекись водорода, обращение и контроль которых затруднены. Кроме того, сами химические вещества достаточно активны и требуют очень большой аккуратности, а их утилизация должна выполняться в соответствии с действующим законодательством по охране окружающей среды.

Термические методы для поддержания качества предусматривают чрезвычайно точное управление процессом и частую калибровку, а также проведение вспомогательных операций для удаления остатков нитей изоляции вокруг проводника.

Лазерная зачистка, наоборот, обладает малым временем процесса, великолепной точностью и отличной управляемостью процесса. И, что особенно важно, при лазерной зачистке устраняется контакт с проводом, а за счет применения лазера подходящего типа можно полностью избежать повреждения проводника или экрана.

Рассмотрим несколько примеров конкретных применений установок лазерной зачистки.

В установках лазерной зачистки луч лазера фокусируется в пятно очень малого размера и проходит по проводу с заданной скоростью. Так лазер испаряет выбранный участок изоляции, удаляя ее по тонкой линии (рис. 1).

Как было отмечено ранее, лазер не повреждает проводник, поскольку металлические материалы сильно отражают луч углекислотного лазера, тогда как материалы изоляции в основном являются сильнопоглощающими энергией лазерного луча. По мере движения луча по проводу он с высокой точностью отрезает изоляцию подобно невидимому горячему ножу, проходящему сквозь масло, образуя аккуратный срез до проводника и позволяя затем легко удалить изоляцию. За счет комбинирования перемещений заготовки и луча возможно выполнение различных геометрических конфигураций зачистки в зависимости от требований конкретной задачи, таких как поперечные и продольные разрезы, окна и проч. (см. примеры выше).

Установки лазерной зачистки могут применяться либо в виде автономного оборудования, либо в составе автоматизированной системы. Если оборудование планируется использовать как автономное, провод обрабатывается в виде одной загрузки, выполняемой вручную оператором, по одному или в группах, собранных на оснастке. Групповая обработка ускоряет процесс и повышает производительность в тех случаях, когда ведется очистка проводов одного типа. После сборки группы оснастка загружается в установку снятия изоляции, в которой выполняется один или несколько проходов по проводам, и изоляция с них удаляется одновременно.

Подобные установки также используются системными интеграторами, которым может потребоваться встраивание их в более сложные системы автоматизации производства.

В некоторых задачах возникает необходимость применения лазеров других типов для работы либо с более сложными видами изоляции, либо с изделиями меньших размеров.

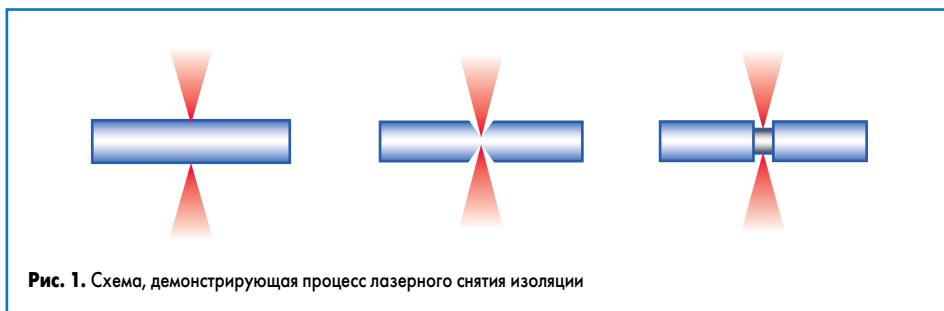


Рис. 1. Схема, демонстрирующая процесс лазерного снятия изоляции

На рис. 1 (слева направо): лазерный луч фокусируется в малое пятно и испаряет или расплавляет пластиковую изоляцию с двух сторон. Затем области разреза смыкаются, образуя непрерывный кольцевой разрез. Процесс самоограничивающийся, поскольку лазер отражается от расположенного под изоляцией проводника, не нанося ему повреждений.

Обычно луч лазера направляют на провод с нескольких сторон (как правило, достаточно двух), чтобы обрезать изоляцию по всей окружности провода. Это позволяет затем стянуть отрезанную часть изоляции (в форме трубки), оголив тем самым проводник. Столь оригинальный подход, разработанный NASA, является наиболее распространенным вариантом лазерной зачистки проводов. Однако все меняется. Теперь существует возможность выполнять в изоляции окна, отрезать металлические экраны и снимать современные высокотемпературные полимеры, которые не удается правильно удалить с помощью традиционных подходов.

Для большинства проводов достаточно просто убрать с проводника один слой пластиковой изоляции. Ее часть необходимо снять с конца провода, чтобы обеспечить возможность электрического соединения с печатной платой или разъемом. Обычно удаляется изоляция с части провода длиной от 1 до 10 мм — например, выполняется разрез в виде одной линии. Этот «поперечный» разрез (рис. 2б) отсоединяет часть изоляции на конце провода, позволяя его стянуть, — таков простейший и самый распространенный способ лазерного снятия изоляции.

В случае кабелей с несколькими слоями изоляции и металлическими экранами нередко необходимо оголить часть экрана вдоль провода, чтобы соединить его с общей шиной. Для чего делается вырез в изоляции в виде «окна» (рис. 2). Это отличная задача для лазера, поскольку провести операцию механическим способом очень сложно. Чтобы раскрыть окно, в изоляции выполняется два поперечных разреза на каждом конце окна, затем вдоль провода — продольный разрез, соединяющий два поперечных. Данная процедура предполагает перемещение пятна лазера в двух направлениях: поперек и вдоль провода.

Все описанные варианты лазерной зачистки основаны на возможности стягивания или снятия изоляции с проводника. Однако на некоторых кабелях, в частности на тонких эмалированных проводах, изоляция прикреплена очень прочно. Для того чтобы обеспечить зачистку, необходимо многократно про-

ходить пятном лазера по изоляции провода, подобно штриховке. Таким образом изоляция под лучом полностью испаряется, оставляя проводник чистым (рис. 3).

Пятно лазера должно сканировать поверхность изоляции достаточно быстро. Обычно требуется скорость, в десять раз превышающая скорость при разрезании изоляции по одной линии. И с этой операцией способны справиться только самые быстрые установки для снятия изоляции, предназначенные для сканирования.

Разрезание экрана коаксиальных кабелей, в особенности микрокоаксиальных, — ключевая задача для лазерной зачистки. Существует два метода, основанных на одном и том же принципе. В первом методе экранированные проводники погружаются в ванну припоя, чтобы на экране образовался целостный, но хрупкий слой. По облуженному экрану на большой скорости проходит импульсный лазер с длиной волны 1 мкм (ближний ИК-диапазон). Свет с данной длины волны сильно поглощается металлическим экраном, и в нем вырезается небольшая канавка, достаточная, чтобы образовалась линия разлома, по которой и может быть стянут экран, а внутренние изолированные проводники оголены. Данный процесс напоминает резку стекла стеклорезом. Во втором методе используется подобный лазер, непосредственно разрезающий изоляцию. Этот так называемый способ бесприпойного скрайбирования (solderless



Рис. 2. Схема, показывающая различные геометрические конфигурации снятия изоляции: а) окно с удаленной из окна изоляцией; б) поперечный разрез; в) окно

scribing) обладает множеством производственных преимуществ, поскольку позволяет отказаться от ручной операции погружения конца кабеля в припой (рис. 4).

Для обработки различных материалов требуются разные источники лазера, поскольку не все материалы одинаково поглощают свет определенного цвета. Существует огромный набор различных оптических свойств, которые требуют внимания, — не только цвет лазера. Для зачищаемого провода каждого типа, кроме длины волны лазера, необходимо принять во внимание как минимум следующие параметры:

- мощность лазера;
- длительность импульса и частоту лазера (либо возможность применения непрерывного лазерного излучения);
- размер пятна лазера;
- скорость движения пятна лазера относительно материала;
- количество проходов.

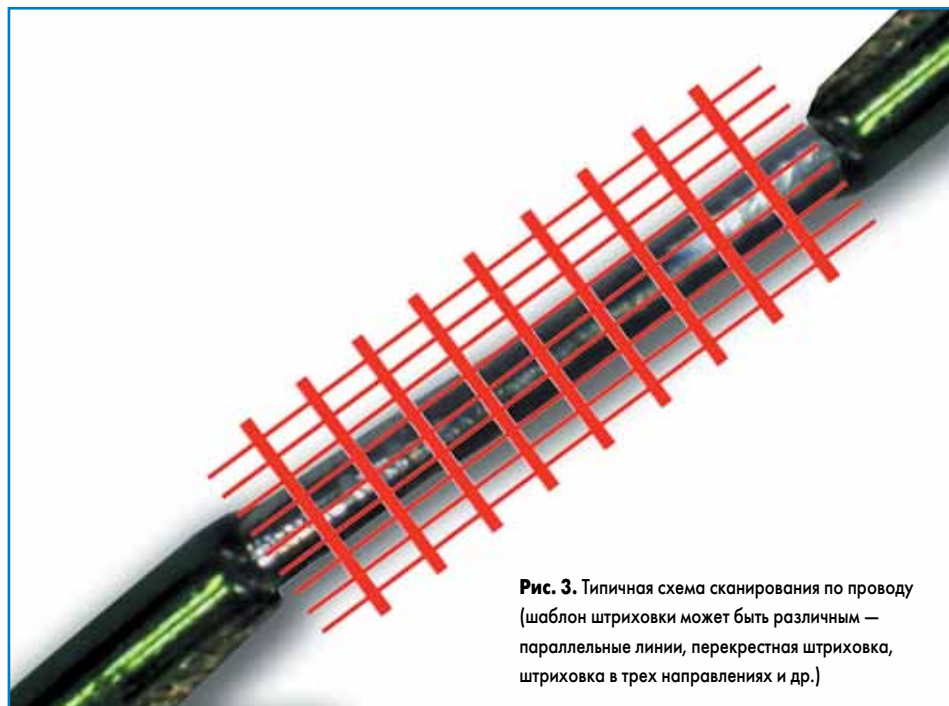


Рис. 3. Типичная схема сканирования по проводу (шаблон штриховки может быть различным — параллельные линии, перекрестная штриховка, штриховка в трех направлениях и др.)

Кроме того, очень важно, чтобы выбранный лазерный источник обладал следующими свойствами:

- надежной промышленной конструкцией;
- длительным сроком службы;
- малым объемом или полным отсутствием необходимости в обслуживании;
- стойкостью к воздействиям производственной среды, таким как пыль, колебания температуры и вибрация.

В качестве иллюстрации можно привести ряд распространенных вариантов выбора лазера:

- Снятие полимерной изоляции: углекислотный лазер с непрерывным излучением.
- Снятие экрана: лазер с длиной волны 1 мкм и наносекундной длиной импульса.
- Эмалированный или тонкий провод: УФ-лазер с наносекундной длиной импульса.

Метод передачи лазерного излучения на провод — ключевой вопрос, определяющий стоимость и характеристики установки лазерного снятия изоляции.

Существует два основных метода:

- Метод с подвижной оптикой — самый простой способ передачи излучения. На один или два линейных манипулятора устанавливается последовательность зеркал и линз. Эти манипуляторы перемещают по проводу оптические компоненты и пятно лазера. Поскольку такая оптика обладает относительно большим весом, скорость снятия изоляции ограничена величиной около 300 мм/с (12"/с).
- При применении метода сканирования нет линейных манипуляторов. Луч лазера посылается в гальванометрический сканер, где имеется два зеркала, установленных на высокоскоростные двигатели поворота по углу. Управление углом поворота обоих зеркал осуществляется с высокой скоростью и точностью, благодаря чему свет направляется в требуемую точку. Поскольку зеркала очень легкие, скорость снятия изоляции может достигать 7000 мм/с (275"/с).

Области применения

Аэрокосмическая и оборонная техника

В аэрокосмическом и оборонном секторах используются провода разнообразных структур, которые отлично подходят для снятия изоляции лазером. Самые распространенные типы изоляции, такие как ПТФЭ, ЭТФЭ, полиэтилен и каптон, легко удалить с помощью технологии на основе углекислотного лазера.

Для зачистки различных проводов и кабелей, используемых в аэрокосмическом и оборонном секторах, очень хорошо подходит лазерное снятие изоляции (рис. 5).

Медицинская техника

Существует огромный список задач для лазерного снятия изоляции в рамках рынка медицинской электроники. Специализированные провода, предназначенные для устранения помех, — типовой элемент блоков управления и отображения. Когда зонды должны вводиться в человеческое тело, в устройствах, подобных катетерам, применяются очень тонкие провода.



Рис. 4. Микроаксиальный кабель, отрезанный с помощью бесприпойного скрайбирования:

- кабель подготовлен путем снятия внешнего слоя изоляции (выполняется либо надрезом и стягиванием, либо сканированием с помощью высокоскоростной установки для снятия изоляции);
- лазер с длиной волны 1 мкм отрезает экран сверху и снизу;
- экран стягивается, оголяя внутренние изолированные проводники;
- лазером снимается изоляция с внутренних проводников, после чего они готовы к соединению

Наконец, компоненты, используемые внутри организма, могут требовать снятия покрытия для создания контакта, — например, электроды кардиостимуляторов.

Микроаксиальные кабели

В медицинской электронике используется большое количество типов проводов, имеющих и в обычных, в том числе потребительских, электронных устройствах. Основными областями применения являются микроаксиальные кабели для передачи данных, а также экранированные ленточные кабели.

Тонкие эмалированные провода

Сегодня из-за растущей потребности в удобстве все шире применяются провода малого диаметра. Так, уже становится обычным размер 50 AWG. Эти провода, имеющие один или два проводника, покрыты изоляцией из ПТФЭ, полиимида или сочетаний полиимидов и полиамидов.

Потребительская электроника

Потребительская электроника — основная область применения технологии лазерного снятия изоляции. Потребности крупносерийного

производства ноутбуков, КПК и мобильных телефонов в сочетании с микроминиатюризацией делают технологию лазерного снятия изоляции единственным возможным решением.

Плоские гибкие кабели

Эти кабели еще более компактные, что позволяет поместить больше соединений в меньшем пространстве.

Тонкие обмоточные провода

Рост удельной мощности диктует потребность в эмалированных проводах, обладающих повышенными температурными характеристиками и предназначенных для использования в катушках и миниатюрных двигателях. Это могут быть миниатюрные катушки индуктивности и дроссели, антенны радиочастотных меток (RFID), а также миниатюрные двигатели.

Автомобильная электроника

Со многих автомобильных проводов и кабелей изоляция снимается с помощью автоматизированных механических систем, которые также выполняют оконцовку и даже установку разъемов.



Рис. 5. Примеры зачистки кабелей, используемых в аэрокосмическом и оборонном секторах

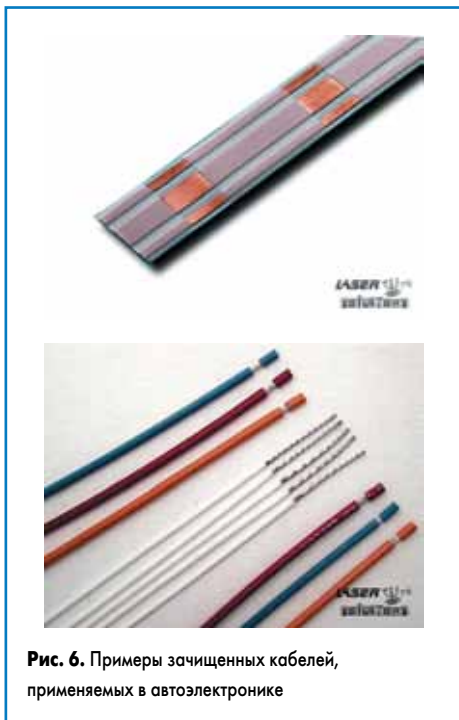


Рис. 6. Примеры зачищенных кабелей, применяемых в автоэлектронике

Однако в автомобильной промышленности находят все более широкое применение специальные типы проводов, для зачистки которых необходимы решения на основе лазера.

Данной задаче наилучшим образом соответствуют установки, дополняющие автоматизированные системы, где лазер, снимающий

изоляцию, используется в сочетании с автоматическим замером и нарезкой. Это позволяет значительно повысить производительность при изготовлении кабелей с лазерной зачисткой (рис. 6).

В связи с большими объемами и низкой стоимостью автомобильной проводки максимальный выигрыш при выполнении большинства задач с применением лазерной зачистки можно получить благодаря автоматической подаче провода.

Многослойная изоляция

В некоторых специальных кабелях имеет несколько проводников и слоев изоляции, что делает их непригодными для автоматизи-

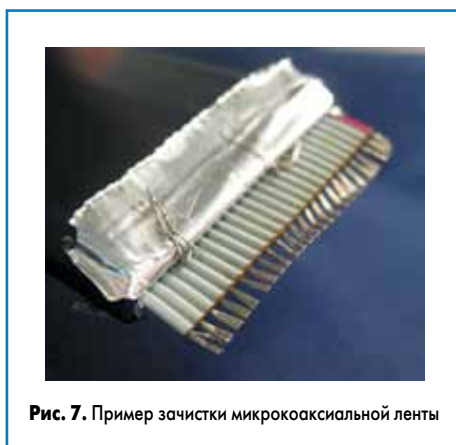


Рис. 7. Пример зачистки микроаксиальной ленты

рованного удаления изоляции механическим способом.

Телекоммуникационные и информационные системы

Телекоммуникации и информационные системы — отличный рынок для применения лазерного снятия изоляции. Многожильные экранированные кабели с несколькими слоями изоляции — распространенное решение, позволяющее осуществлять передачу данных на высоких скоростях без помех.

Экранированные кабели для передачи данных

Экранированные кабели данных могут иметь различную структуру, включая экранированные ленточные кабели, экранированные плоские гибкие кабели, а также экранированные многожильные кабели. Технология лазерного снятия изоляции отлично подходит для всех этих структур.

Микроаксиальные ленты

Микроаксиальные ленты — распространенное решение для высокоскоростной передачи данных на дисплеи. Эти кабели представляют особую проблему с точки зрения зачистки — когда приходится снимать оболочки и внутреннюю изоляцию, а также проводить припойное и бесприпойное скрайбирование экранов (рис. 7).