

ТЕХНИКА ПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

УДК 621.9.048.7:621.373.826

Ю.В.ЛАКИЗА, А.А.МАЛАЩЕНКО

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ
ДЛЯ ЗАЧИСТКИ МИНИАТЮРНЫХ ПРОВОДОВ
С ТЕПЛОСТОЙКОЙ ЭМАЛЕВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Представлены результаты разработки нового способа и специализированного технологического оборудования лазерной зачистки проводов с теплостойкой, высокопрочной эмалевой изоляцией.

Дана методика выбора режимов обработки. Приведены примеры внедрения зачистки концов мерных выводов, круглых и плоских кабелей.

Повышение качества и надежности изделий приборо- и машиностроения невозможно без применения более теплостойких, высокопрочных изоляционных материалов, используемых при изготовлении обмоточных и монтажных проводов; круглых, плоских и ленточных кабелей; гибких печатных плат.

Однако повышение теплостойкости и других эксплуатационных характеристик изоляционных материалов неизбежно затрудняет зачистку проводников от изоляции. В значительной мере это относится к проводам с высокопрочной эмалевой полиимидной изоляцией, температура разложения которой находится в пределах 600–800°C (при кратковременном нагреве), а эксплуатационный температурный индекс составляет 220–240°C (ПНЭТ-имид, ПЭТ-имид, МС I5–I3, МС I6–I7, МС I6–I2 и аналогичные).

Традиционные механические и химические способы удаления полиимидной изоляции малоэффективны, не обеспечивают необходимого качества зачистки. Поэтому их нельзя рекомендовать для использования в серийном производстве. Так, механическая зачистка приводит к повреждениям проводника из-за высокой прочности изоляции и повышенной адгезии к

металлическому проводнику. Химическим способом полиимидная изоляция может быть удалена только с применением химически активных, агрессивных веществ по сложной технологии, однако не исключаящей их попадания под изоляцию вне зоны зачистки и последующее разрушение проводника в процессе эксплуатации.

Известны также способы, основанные на нагреве изоляции и ее сжигании. В [1,2] описана технология лазерной зачистки проводов с использованием для нагрева изоляции излучения с длиной волны 10,6 мкм.

Эксперименты по исследованию возможности удаления полиимидной изоляции таким способом показали, что ее сжигание приводит к перегреву проводника, окислению и загрязнению его поверхности продуктами разложения изоляции, что затрудняет последующую сварку таких проводников и исключает возможность их пайки без дополнительной зачистки и применения активных флюсов [3].

В НИИКТ НПО "Северная заря" разработан и исследован новый способ удаления изоляции, заключающийся в том, что разрушение изоляции производят "взрывным" лазерным испарением тонкого слоя металла проводника [4] практически без ее нагрева и термического разложения. При этом возможно управляемое удаление различных технологических загрязнений или подслоя материала, нанесенного на поверхность основного проводника и препятствующего выполнению каких-либо последующих технологических операций.

Выбор необходимых параметров лазерного излучения при зачистке новым способом может производиться на основе расчета режима нагрева проводника и изоляции, а также проверяться экспериментально.

Ниже приводится методика расчета и выбора параметров режима лазерной обработки проводников, которая может применяться для любой изоляции, частично прозрачной для лазерного излучения, независимо от ее теплостойкости.

Основы расчета режимов облучения зачищаемых участков

Для реализации нового способа удаления изоляции должно выполняться условие минимального поглощения излучения в объеме изоляции и поглощения в тонком поверхностном слое металла проводника, что должно обеспечить интенсивное "взрывное" испарение микрослоя металла проводника, образование расширяющегося плазменного облака и отрыв за счет этого изоляции без нагрева ее до температуры разложения.

Это обуславливает установление для режима облучения граничных соотношений $\sqrt{a_1 t} \ll \delta$ для материала изоляции и $\sqrt{a_1 t} < 1$ мкм для металла проводника, где a - коэффициент температуропроводности; t - длительность облучения; δ - глубина проникновения излучения в материал. Используя известные формулы для расчета температуры на поверхности материала в центре зоны облучения [5], получены следующие выражения для расчета плотности мощности лазерного излучения в зоне обработки, обеспечивающей приращение температуры на поверхности проводника (ΔT_1) и изоляции (ΔT_2) до значений, определяющих, соответственно, интенсивное испарение тонкого слоя металла и разрушение изоляции для фиксированного времени нагрева:

$$q_1 = \frac{\Delta T \sqrt{\pi} \cdot \lambda_1}{2(1-R_2)(1-R_1) e^{-\alpha \delta} \sqrt{a_1 t}}; \quad (1)$$

$$q_2 = \frac{\Delta T_2 \cdot \delta_2 \cdot \lambda}{a_2 \cdot t (1-R_2)(1+R_1) e^{-2\alpha \delta}}, \quad (2)$$

где q - плотность мощности лазерного излучения на поверхности материала в зоне обработки; R - коэффициент отражения; λ - коэффициент теплопроводности; α - линейный коэффициент поглощения изоляции; δ - толщина изоляции. Индексом 1 обозначены величины, соответствующие нагреву металла проводника, индексом 2 - материала изоляции. Приведенные формулы даны с учетом ослабления лазерного излучения слоем изоляции и отражения его металлом проводника.

Для того, чтобы поверхностный слой изоляции не начал разрушаться до окончания импульса излучения (или до отрыва изоляции от поверхности проводника), необходимо выполнить условие $q_2 > q_1$ при фиксированном значении t . Разность величин $q_2 - q_1$ определяет допустимый диапазон регулирования плотности мощности при фиксированном времени нагрева. Значение $q_2 - q_1 = 0$ определяет критическое максимально допустимое время нагрева (t_d), при котором обеспечивается испарение металла без термического разрушения изоляции. Выражение для t_d , полученное из (1) и (2) при условии $q_2 - q_1 = 0$ имеет вид

$$t_d = \left(\frac{\Delta T_1 \cdot \lambda_2 \cdot \delta_2 \cdot (1-R_1) e^{-\alpha \delta} \cdot \sqrt{a_1}}{\Delta T_2 \cdot \lambda_2 (1+R_1) e^{-2\alpha \delta} a_2} \right)^2. \quad (3)$$

Для практической реализации способа время нагрева (облучения) должно быть меньше t_0 , по крайней мере, настолько, чтобы диапазон регулирования плотности мощности превышал ее возможные флуктуации. Плотность мощности может регулироваться изменением мощности лазера или размера пятна излучения в зоне обработки.

Расчет режима облучения по (I-3) может быть выполнен для времени облучения от 10^{-9} до 10^{-7} с, что соответствует длительности импульсов излучения некоторых лазеров, работающих в режиме модулированной добротности (ЛТИ-205, ЛТИ-407, ЛТИ-501 и др.)

Зависимость $q_1(t)$ для меди и никеля и $q_2(t)$ для полиимида (рис.1), а также зависимость t_0 от толщины изоляции (рис.2) рассчитаны для приращения температуры на поверхности проводника на 7000 К (интенсивное испарение для плотности мощности излучения $10^8 - 10^9$ Вт/см²) и на 600 К на поверхности изоляции.

Анализ этих зависимостей показывает, что параметры режима облучения существенно зависят от теплофизических и оптических свойств материалов, а также от толщины изоляции. При наличии на медной жиле проводника слоя никеля, имеющего более низкие значения коэффициентов отражения, теплопроводности и температуропроводности, интенсивное испарение поверхностного слоя проводника обеспечивается излучением с меньшей плотностью мощности при более широком диапазоне ее регулирования для любого фиксированного времени облучения из области его допустимых значений. Так, при облучении защищаемых проводов излучением длиной волны 1,06 мкм и длительностью импульсов 10^{-8} с (для слоя изоляции 50 мкм) номинальное значение плотности мощности в 2 раза меньше, а диапазон ее регулирования в 10 раз больше для случая облучения провода с никелированной жилой, чем с чистой медной.

Удаление изоляции относительно больших толщин требует уменьшения длительности облучения, что усложняет процесс зачистки, поскольку уменьшается доля энергии лазерного излучения, расходуемая на отрыв изоляции. В ряде случаев целесообразно удалять часть слоя изоляции на защищаемом участке механическим способом, а затем использовать лазерное излучение. Для всех рассмотренных проводов следует использовать излучение с длиной волны 1,06 мкм.

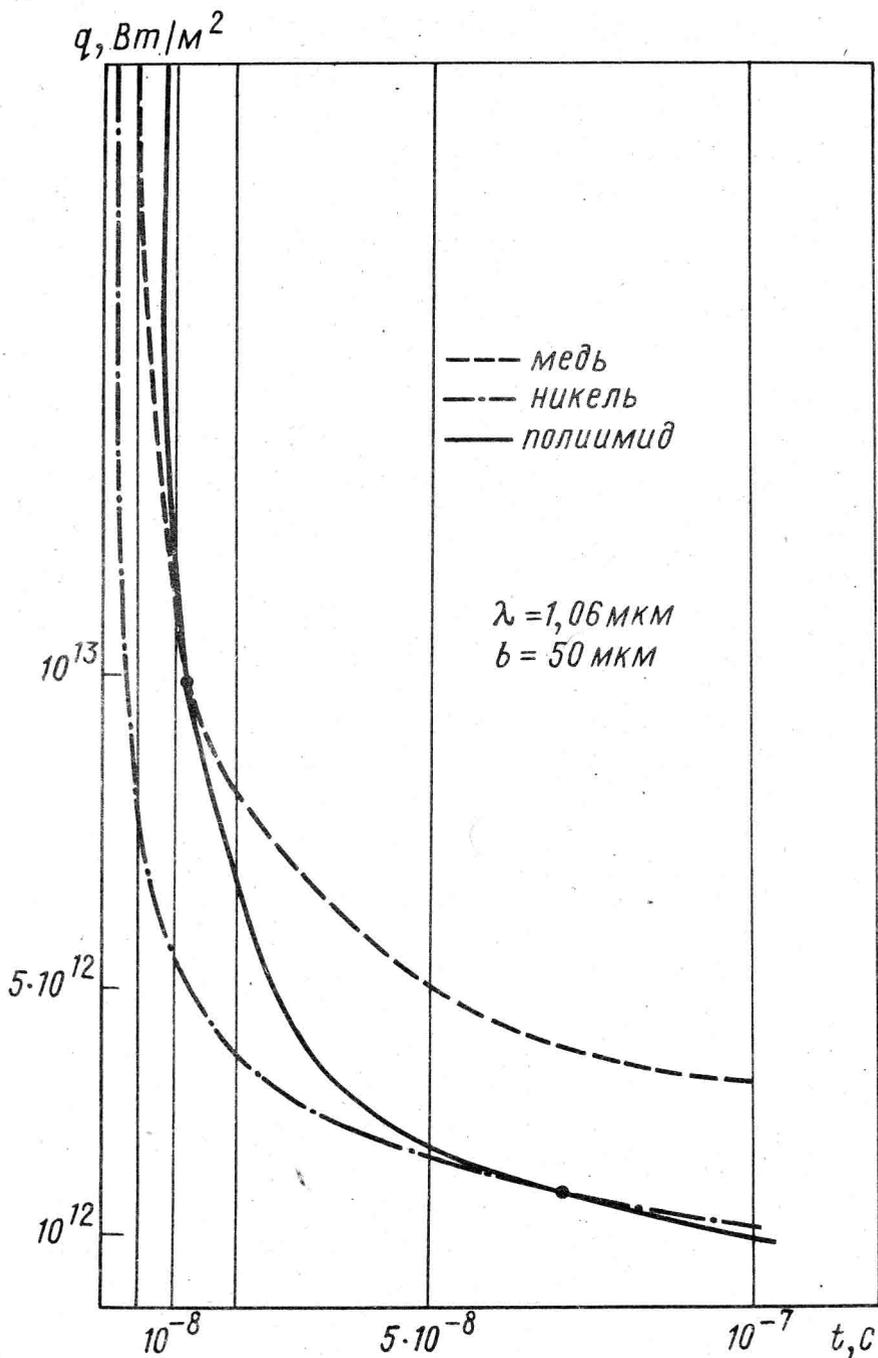


Рис. I. Расчетные зависимости плотности мощности лазерного излучения в зоне обработки (q), обеспечивающие нагрев тонкого слоя металла проводника до температуры интенсивного испарения (7000 К) и изоляции на 600 К от длительности облучения (t).

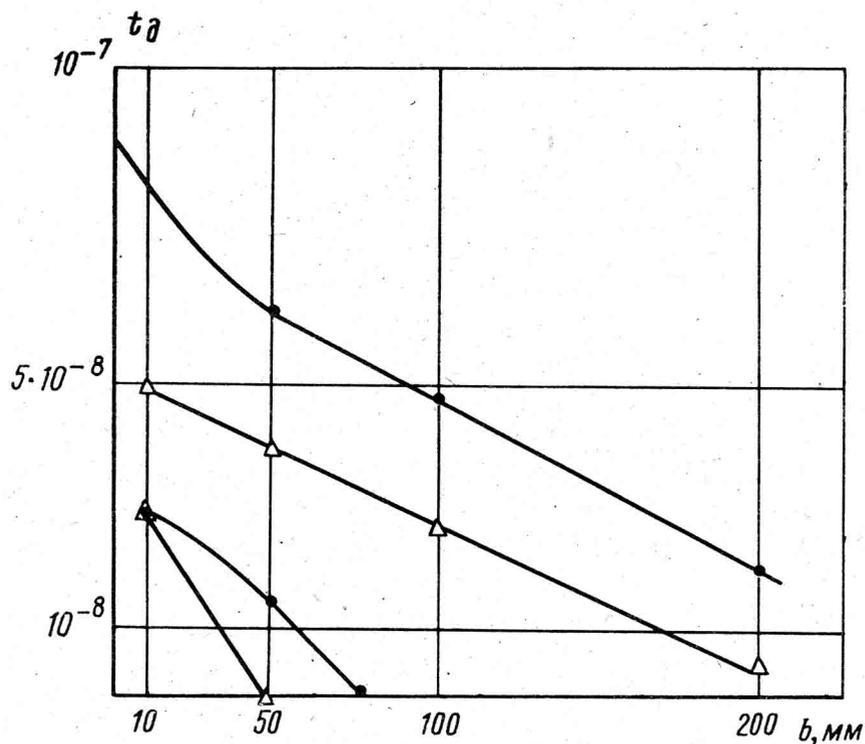


Рис.2. Расчетные зависимости допустимого времени облучения (t_d) от толщины изоляции (b) для длины волны излучения (λ) 1,06 мкм (—•—•—) и 0,53 мкм (—△—△—△—).

Экспериментальное исследование лазерной зачистки проводов

Исследования проводились на установке, оптическая схема которой показана на рис.3.

Установка работает следующим образом. Излучение лазера I (ЛТИПЧ-6, ЛТИ205) зеркалами 3 и 4 делителя 2 формируется в два пучка и направляется на объектив 5 под разными углами. Излучение, отраженное зеркалом 4, фокусируется объективом 5 на поверхность обрабатываемого провода 8. Излучение, отраженное зеркалом 3, проходит объективы 5 и

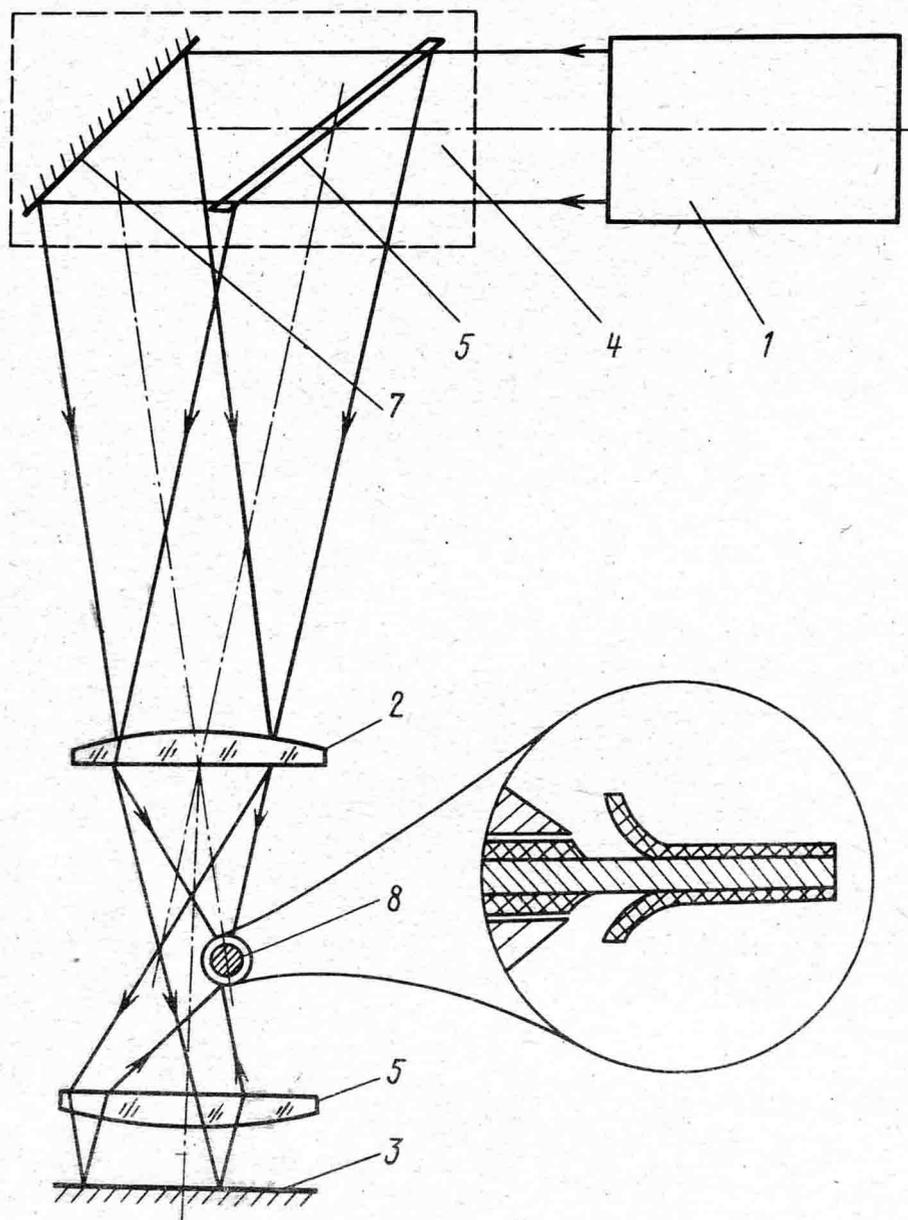


Рис.3. Схема экспериментальной установки.

6, отражается от зеркала 7 и объективом 6 фокусируется на поверхность провода 8 с противоположного направления. Такой способ облучения обрабатываемого участка провода позволяет повысить эффективность использования лазерного излучения. В установке возможно сфокусировать лазерное излучение на зачищаемом участке провода с противоположных направлений в пятна с размерами, меньшими, чем диаметры зачищаемых проводов. При этом теплостойкая изоляция (обмоточных и тонких монтажных проводов) с высокими механическими свойствами может отрываться продуктами испарения тонкого слоя проводника не только в месте воздействия лазерного излучения, но и за зоной облучения, что позволяет удалять изоляцию со всей поверхности провода по длине зачищаемого участка, облучая локальные, неперекрывающиеся зоны зачищаемого участка провода. Таким образом повышается производительность процесса обработки. При удалении изоляции с тонких обмоточных проводов зеркало 3 делителя убирается в тех случаях, когда диаметр пятна излучения в зоне фокусировки превышает диаметр провода, а уменьшение диаметра пятна излучения связано с потерями энергии лазерного излучения. В этом случае обрабатываемый провод является делителем пучка лазерного излучения, сфокусированного в зоне обработки. Часть излучения, прошедшая проводник, объективом 6 и зеркалом 7 перефокусируется на провод с противоположного направления, что позволяет повышать долю полезно используемого излучения.

Зачищаемые провода закреплялись в оснастке на координатном программно-управляемом столе. Кроме того, исследовался конструктивно-технологический вариант соединения обмоточного провода с выводом катушки, по которому лазерная зачистка обмоточного провода производится уже после предварительной его намотки на вывод и полное удаление изоляции обеспечивается за счет превышения ее прочности над адгезией к проводнику.

При зачистке монтажных проводов использовали ограничительные экраны (трубочки), располагаемые над незачищаемым участком изоляции с минимальным зазором, что обеспечивало уменьшение или исключение разрывов, расслоения, вспучивания и разломачивания изоляции на краю незачищаемого участка провода.

Качество зачистки оценивалось после облуживания зачищенных участков с применением флюсов и припоев, используемых в серийном производстве. Кроме того, определялись относительное удлинение и усилие разрыва обмоточных проводов до и после удаления изоляции.

Результаты эксперимента приведены на рис. 4, 5. Выявлено, что уда-

ление полиимидной изоляции проводов лазерным излучением с длиной волны 1,06 мкм и длительностью облучения 10 нс обеспечивает удовлетворительное качество зачистки, позволяющее выполнять лужение зачищенных участков с применением флюсов, используемых на производстве. При обработке проводов диаметром более 30 мкм не замечено существенных изменений механических свойств проводов. Однако в случае меньших диаметров наблюдается заметное ухудшение механических свойств зачищаемых участков: при сохранении величины усилия разрыва в пределах, допустимых по ТУ на провода, относительное удлинение снижается ниже допустимого уровня и составляет не более 2%. Это требует установления режима облучения, обеспечивающего потерю адгезии изоляции к проводнику с минимально возможной для этого плотностью мощности.

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы:

1. Удовлетворительное качество лазерной зачистки обмоточных и монтажных проводов от эмалевой частично прозрачной изоляции независимо от ее теплостойкости возможно при разрушении изоляции или нарушении ее адгезии к проводнику лазерным "взрывным" испарением тонкого слоя металла проводника без нагрева изоляции до температуры ее разложения.

2. Удаление теплостойкой полиимидной изоляции обеспечивается при использовании излучения лазеров, работающих в режиме модулированной добротности с длительностью импульсов излучения менее 10-15 нс и длиной волны излучения 1,06 мкм.

Технологическое оборудование для лазерной зачистки

Для использования в серийном производстве монтажных проводов с полиимидной изоляцией разработаны два варианта лазерной зачистки монтажных проводов и технологического оборудования.

В первом варианте (рис.6) провод сматывается из катушки, зачищается на заданных участках, затем надрезается на мерные выводы. Автоматизированная установка обеспечивает изготовление мерных выводов длиной 10...100 мм со скоростью зачистки 10...100 мм/мин.

По второму способу (рис.7) концы кабеля укладываются в кассету, обеспечивающую возможность одновременного закрепления 32 проводов, которая устанавливается затем на координатный стол для последующей поочередной зачистки. Длина зачищаемых концов 2-20 мм при скорости

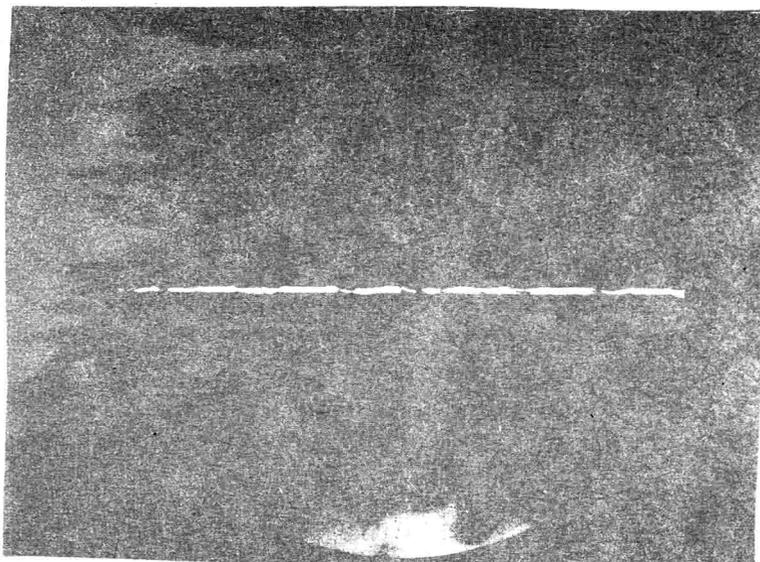


Рис.4. Внешний вид обмоточного провода ПЭТ-имид, облученного на дискретных участках излучением различной интенсивности, обеспечивающей отрыв изоляции без ее термического разложения.

зачистки 10...100 мм/мин в зависимости от диаметра провода.

Указанные установки снабжены оптико-механическим блоком, обеспечивающим облучение зачищаемых участков проводов с четырех противоположных направлений одновременно.

Технико-экономическая эффективность новой технологии зачистки достигается за счет более высокой надежности процесса удаления изоляции по сравнению с традиционными методами и возможности его полной автоматизации. Кроме того, только использование рассмотренной технологии позволяет широко применять монтажные и обмоточные провода с максимально возможной прочностью и теплостойкостью эмалированной изоляции.

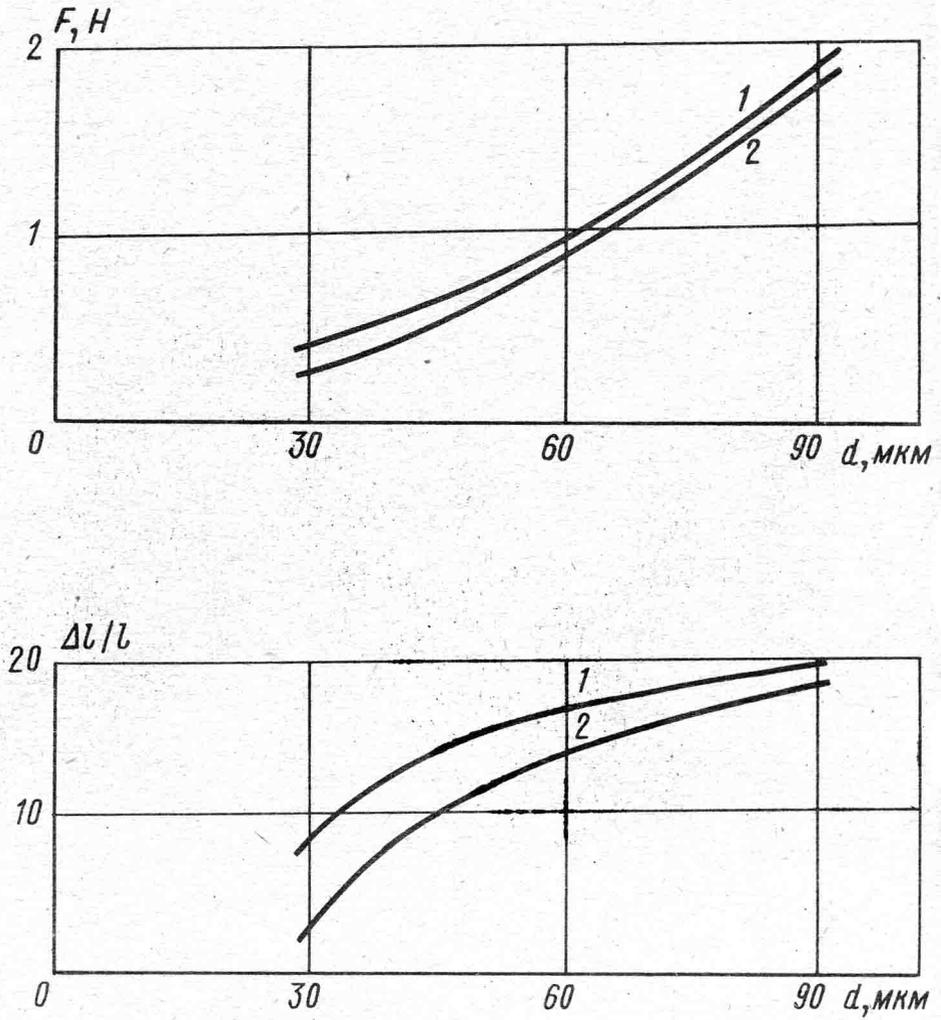


Рис.5. Зависимость усилия разрыва (F) и относительного удлинения ($\frac{\Delta l}{l}$) от диаметра провода для проводов с полиимидной изоляцией (1) и после лазерной зачистки (2).

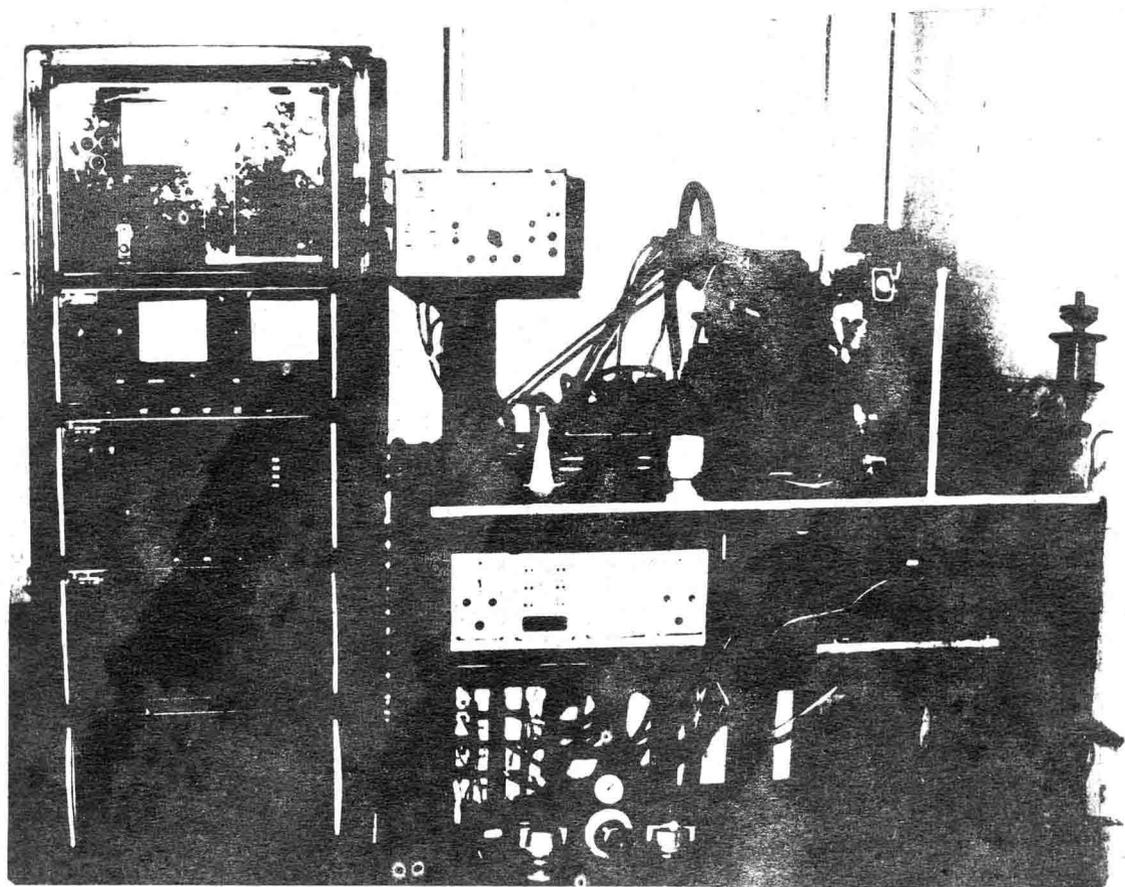


Рис.6. Установка для изготовления мерных выводов с лазерной зачисткой.

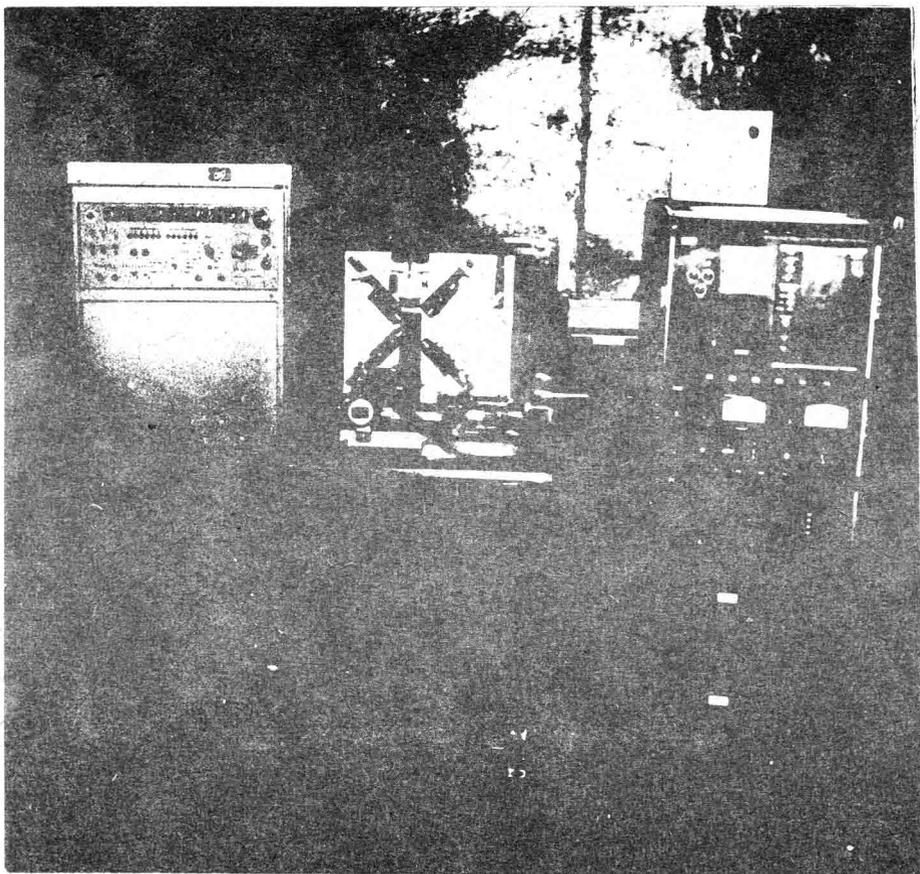


Рис.7. Установка лазерной зачистки концов кабелей

ЛИТЕРАТУРА

1. Володькина В.Л., Либенсон М.Н., Прокопенко В.Т., Сурменко Л.А. Резка тонкослойных материалов излучением CO_2 -лазера. - Л.:ЛДНТП. - 1973.

2. Применение лазера для зачистки проводов//Электроника. - 1976.- №19.

3. Лакиза Ю.В., Малащенко А.А., Мезенов А.В. Лазерная зачистка микропроводов с твгlostойкой изоляцией. - М: ВНИИПРИБОР. - 1983.

4. А.С. 949746 СССР. Способ удаления изоляции с провода/ Ю.В.Лакиза, А.А.Малащенко. - Оpubл. в Б.И., 1982, №29.

Б. Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка.-
Лениздат. - 1973.

Статья поступила в ноябре 1991 г.