

УДК 621.791

А. И. Брицкий, И. В. Косяк, О. А. Токалин, О. А. Цубин
Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

Особенности ультразвуковой сварки оптических микропризменных элементов с дозированием энергии

Из-за проявления тепловых дефектов микроструктуры при ультразвуковой сварке оптических элементов на основе микропризм допустимый диапазон поглощенной энергии ультразвука существенно ограничен. Рассмотрены возможности управления дозированием энергии ультразвукового воздействия при сварке для повышения качества. Описано реализованное устройство для дозирования энергии за счет интегрирования данных о рабочем токе генератора ультразвуковой частоты, сравнения с регулируемым заданным уровнем и прерывания генерации. Представлены результаты экспериментов с использованием этого устройства, которые показали его возможности и практическую пользу. Установлены и обсуждены причины, ограничивающие точность дозирования энергии.

Ключевые слова: микропризмы, ультразвуковая сварка, тепловые дефекты микроструктуры, допустимый энергетический диапазон, дозирование энергии.

Введение

Практика использования микропризм и оптических устройств на их основе для лечения косоглазия [1] (корректирующих очков, компенсаторов косоглазия (КК) и др.) показала, что применение ультразвуковой сварки для фиксации и герметизации микропризм должно обеспечивать не только их надежное крепление, но и исключить побочные дефекты, проявляющиеся в виде нарушений микроструктуры. Проблемы такого рода возникают только при сварке жестких пластмасс, к которым относятся полимерные оптические материалы: полиметилметакрилат (ПММА) и поликарбонат (ПК) [2, 3]. Вследствие относительно хорошей проводимости ультразвука и интерференции волн Лэмба, возбуждаемых колебаниями наконечника полого сонотрода, значительная часть энергии ультразвука выделяется вне области сварного шва, который расположен в периферийной области микропризмы. В [4] получены оценки перераспределения упругой энергии, показы-

© А. И. Брицкий, И. В. Косяк, О. А. Токалин, О. А. Цубин

вающие, что энергия упругих колебаний в центральной области в несколько раз превышает энергию упругих колебаний на границе, то есть в области сварного шва. Из-за этой нелокальности выделения энергии ультразвука возможно появление тепловых дефектов микроструктуры преимущественно в центральной области микропризм. В результате сварка микропризм полым сонотродом характеризуется допустимым диапазоном поглощенной энергии ультразвука, нижняя граница которого соответствует энергии, необходимой для образования качественного сварного шва, а верхняя граница — появлению тепловых дефектов микроструктуры. Отличающиеся по степени превышения верхней границы дефекты микроструктуры показаны на рис. 1, на котором проиллюстрирована вариация возможных нарушений.

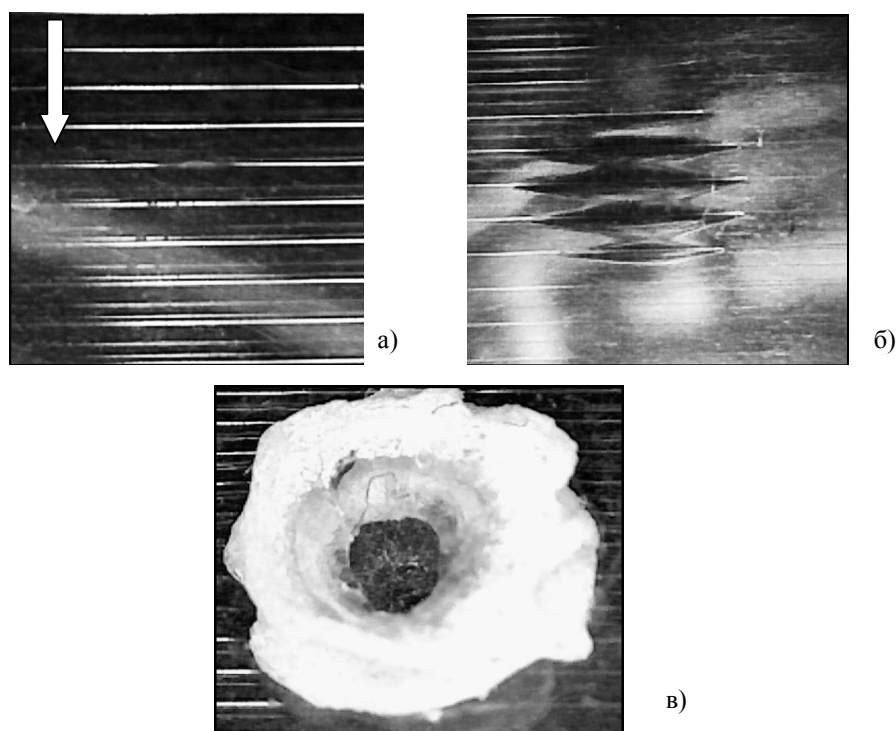


Рис. 1. Тепловые дефекты микроструктуры после сварки компенсаторов косоглазия с разной степенью превышения критического уровня поглощенной энергии ультразвука: а) оплавление ребра при минимальном превышении; б) оплавление пяти ребер; в) полное расплавление центральной области микропризмы и образование отверстия

Как показывает практика, допустимый диапазон поглощенной энергии ультразвука оказывается малым по сравнению со средними затратами энергии на качественную сварку микропризменных оптических элементов.

Из-за резонансного характера работы ультразвуковой сварочной установки и высокой чувствительности генератора высокого напряжения ультразвуковой частоты к изменениям параметров нагрузки, которые возникают, например, за счет изменения физических свойств материалов при разогреве и образовании сварного шва, а также и других случайных факторов, это приводит к нестабильности вы-

ходной мощности генератора. Обычно при сварке генератор ультразвуковых колебаний работает в импульсном режиме, управление которым осуществляется при помощи внешнего устройства, например, реле времени. Поглощаемая энергия дозируется выбором фиксированной длительности импульса активной фазы работы генератора, во время которой высокое напряжение подается на пьезоэлектрический преобразователь. Неконтролируемые изменения выходной мощности генератора во время импульса приводят к неконтролируемым изменениям поглощенной энергии и при превышении верхней границы оказываются причиной описанных тепловых дефектов. Вышеизложенное указывает на необходимость точного дозирования энергии ультразвукового воздействия при сварке оптических элементов на основе микропризм с учетом нестабильности его интенсивности, которое невозможно достигнуть только регулировкой длительности воздействия.

Анализ состояния проблемы

Необходимо отметить, что ультразвуковые сварочные установки с дозированием энергии сваривания существуют и производятся в широком ассортименте [5]. Проблема состоит в их стоимости, которая составляет \$5000–20000 [5], а устройства дозирования энергии сварки являются промышленными секретами. Простые же ультразвуковые сварочные установки имеют стоимость около \$500. Поэтому представляется целесообразным усовершенствование таких сварочных установок дозаторами энергии ультразвукового сваривания.

Целью статьи является изложение результатов разработки и экспериментальных исследований простых устройств ультразвукового сваривания с предложенными устройствами дозирования энергии.

Изложение основного материала

Разработка устройствами дозирования энергии ультразвукового сваривания для конкретного сварочного аппарата и конкретного сонотрода основана на простых соображениях, суть которых состоит в следующем.

Электрическая энергия, затраченная на сваривание, пропорциональна механической энергии колебаний сонотрода:

$$E_{el} = kE_{mech}, \quad k \geq 1,$$

где E_{el} и E_{mech} — электрическая и механическая (колебательная) энергии сваривания, которые преобразуются в теплоту, необходимую для образования сварного шва. При постоянной амплитуде колебаний выходного напряжения генератора ультразвуковой частоты $U_a \cong \text{const}$, механическую (колебательную) энергию сваривания можно представить в виде интеграла

$$E_{mech}(t) = k_G \int_0^t i_G(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где i_G — рабочий ток генератора; $k_G = U_a/k$ — коэффициент преобразования для конкретного сварочного аппарата, сонотрода и свариваемых элементов. Поэтому

интеграл от тока сварочного аппарата можно рассматривать как меру механической (и соответственно тепловой) энергии ультразвукового сваривания и использовать для управления процессом сваривания.

Для оптимального решения проблемы дозирования энергии предложено дополнить существующую ультразвуковую сварочную установку устройством управления (рис. 2), которое позволяет дозировать количество энергии в процессе сварки. Устройство управления состоит из следующих узлов: датчика тока, интегратора, компаратора (схемы сравнения), полупроводникового реле.

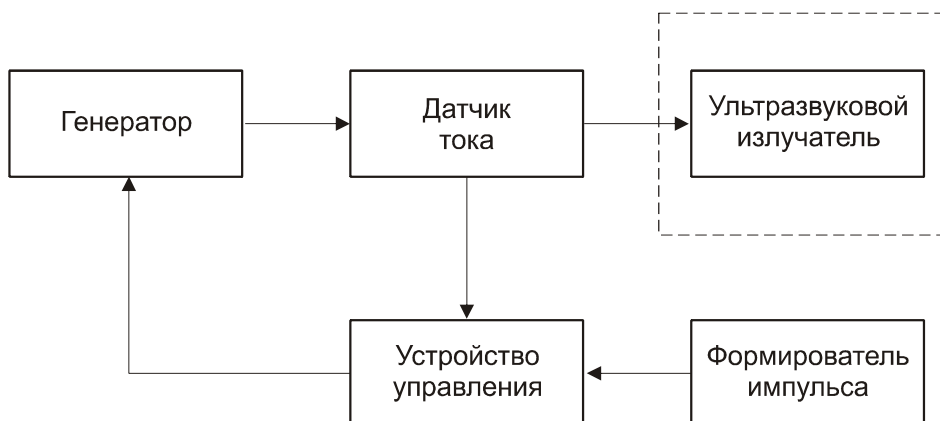


Рис. 2. Блок-схема ультразвуковой сварочной установки с дозирующим устройством

Принцип действия устройства основан на преобразовании входного электрического сигнала с датчика тока, в качестве которого используется датчик Холла, в сигнал прямоугольной формы, который подается на интегратор. На выходе интегратора образуется сигнал пропорциональный интегралу по времени от сигнала на входе. Электронная схема аналогового интегратора построена на операционном усилителе. Напряжение на конденсаторе приблизительно равно выходному напряжению. При воздействии постоянного входного напряжения $U_{ВХ}$ напряжение на выходе интегратора является линейной функцией времени:

$$U_{ВЫХ} = -\frac{U_{ВХ}t}{RC}. \quad (2)$$

Изменение выходного напряжения во времени представляет собой наклонную прямую. Постоянная времени RC -цепи интегратора выбрана 0,5 с.

На рис. 2 показана блок-схема усовершенствованной ультразвуковой сварочной установки. Устройство работает следующим образом. Задающий одновибратор (формирователь импульса) формирует импульс постоянной длительности ≈ 500 мс, который одновременно поступает на схему управления и через нормально замкнутые контакты полупроводникового реле на ультразвуковой генератор. При этом генератор начинает работать, пока на управляющем входе полупроводникового реле нет сигнала. Как только сигнал с выхода интегратора превысит заданный уровень на выходе схемы сравнения, вырабатывается сигнал управления, включающий полупроводниковое реле, которое размыкает свои нормально

замкнутые контакты, тем самым отключая генератор. При изменении амплитуды колебаний на выходе ультразвукового генератора достижение выходным напряжением интегратора $U_{ВЫХ}$ заданного уровня на схеме сравнения будет меняться согласно (2), что изменит время отключения генератора. За счет этого можно управлять количеством энергии, которое поступает в область сварного шва, независимо от изменения амплитуды колебаний на выходе ультразвукового генератора.

Испытания дозирующего энергию устройства производились на действующей сварочной установке, смонтированной на базе установки BRANSON 901, укомплектованной пьезоэлектрическим преобразователем (ПП) и высоковольтным генератором ультразвуковой частоты Cheersonic Ultrasonic с сонотродом собственной разработки и изготовления. Максимальная длительность сварки задавалась при помощи реле времени ВЛ-83 в пределах 0,3...0,5 с, давление в пневматической системе статического прижима сонотрода варьировалось в пределах 80...300 кПа. Сигналы датчика Холла, пропорциональные рабочему току генератора, регистрировались двухканальным цифровым осциллографом Hantek DSO10062. Выходная мощность генератора варьировалась встроенным в генератор 6-ступенчатым аттенуатором. Для исключения систематических отклонений при испытаниях каждая серия экспериментов проводилась с выборками из партий однотипных микропризм, характеризующихся номиналом и датой изготовления. С ростом отклоняющей способности (номинала) микропризм вероятность образования тепловых дефектов снижается, поэтому для испытаний использовались микропризмы малых и средних номиналов.

Как показали результаты испытаний, при холостом запуске установки без контакта наконечника сонотрода со свариваемыми элементами импульс сигнала рабочего тока имеет прямоугольную форму с δ -образным скачком переднего фронта, который объясняется емкостной природой ПП. Длительность импульса близка к задаваемой величине. Осциллограмма импульса показана на рис. 3.

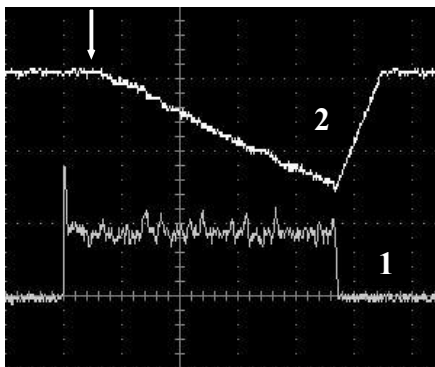


Рис. 3. Осциллограммы импульса сигнала рабочего тока (1) и его интеграла (2). Стрелкой отмечено начало интегрирования сигнала. Развертка 80 мс на деление, чувствительность 1 В на деление, установка длительности сварки по реле времени 0,4 с

При сварке нагрузка генератора изменяется, что влечет изменение величины и формы импульса рабочего тока. Качественно и количественно эти изменения варьируются от случая к случаю даже для однотипных образцов, что иллюстрируют представленные осциллограммы (рис. 4). На осциллограммах показано также изменение интеграла сигнала рабочего тока и момент прерывания импульса.

Длительность импульса воздействия ультразвука при сварке с дозирующим устройством определяется величиной заданного порогового напряжения на ком-

параторе, которое определялось экспериментальным путем. Ввиду того, что амплитуда сигнала (а следовательно и интенсивность воздействия ультразвука при сварке) зависит как от типа свариваемых элементов (разнотолщинности комбиниз или компенсаторов косооности), так и от режимов сварки (давления прижима сонотрода, уровня ослабления выходной мощности) и ограниченности пределов аппаратного интегрирования, в дозирующем устройстве предусмотрено ступенчатое переключение диапазонов с изменением чувствительности. Испытания по сварке комбиниз показали, что зависимость длительности импульса от порога срабатывания компаратора близка к линейной во всех диапазонах с разным наклоном.

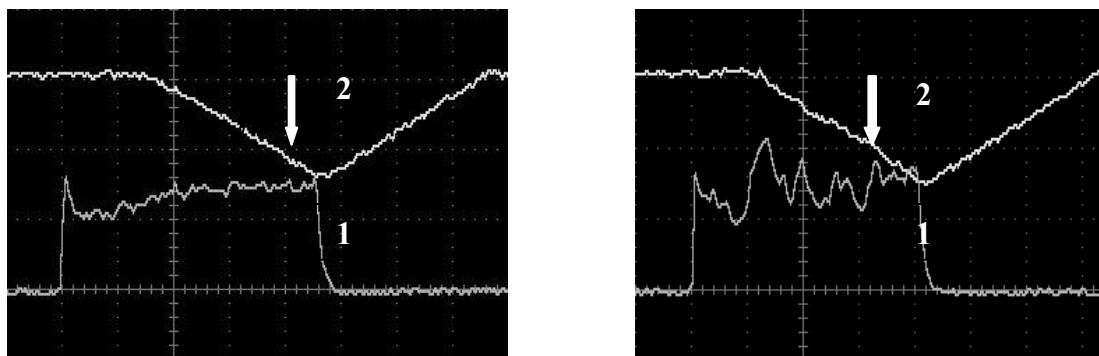


Рис. 4. Осциллограммы сигналов рабочего тока (1) и его интеграла (2), полученные при сварке КК из одной партии микропризм (отклоняющая способность 3 Дп) при неизменном режиме: давление прижима сонотрода 150 кПа, установка длительности по реле времени 0,4 с, уровень ослабления аттенюатора 6. Стрелкой отмечен момент прерывания воздействия. Развертка 20 мс на деление, чувствительность 1 В на деление

Характерной особенностью работы дозирующего устройства является задержка времени начала интегрирования, величина которой составляет 25...35 % от длительности импульса, что снижает точность дозирования энергии. Корреляцию между временем задержки иртегрирования и длительностью импульса иллюстрирует рис. 5, из которого видно, что связь между ними близка к линейной, но вместе с тем присутствует раброс данных относительно статистически усредненной зависимости, что вносит дополнительную погрешность дозирования энергии.

Кроме того, в результате исследований было установлено, что максимальное значение величины интеграла сигнала рабочего тока генератора, соответствующее порогу срабатывания дозатора, для разных значений выходной мощности не остается постоянной при одной и той же заданной величине порога срабатывания. То есть, по сути, величина дозы энергии воздействия ультразвука изменяется при изменении его мощности, хотя и в существенно меньшей степени, чем в случае дозирования фиксацией времени воздействия. Впоследствии схема дозирующего устройства была доработана для подавления эффекта влияния мощности на дозирование энергии, что позволило частично понизить его влияние. Результаты обработки осциллограм, полученных в серии экспериментов по сварке КК при

неизменных режимах до и после доработки дозирующего устройства по уменьшению этого эффекта представлены на рис. 6.

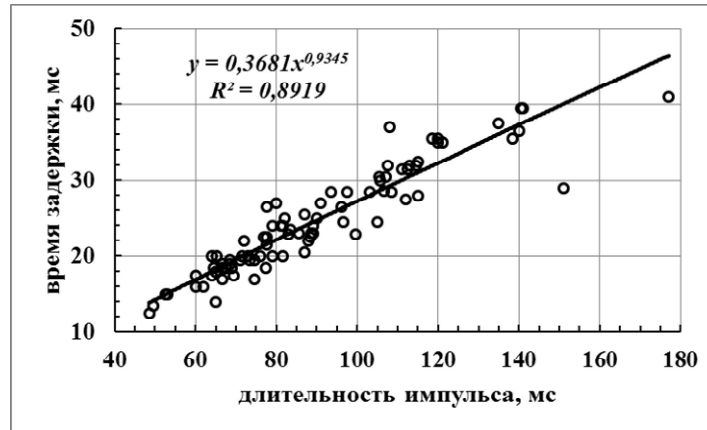


Рис. 5. Корреляционная связь между временем задержки интегрирования и длительностью импульса сварки КК

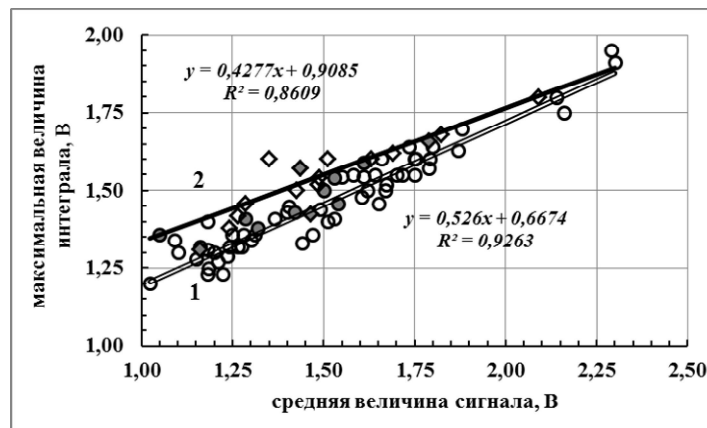


Рис. 6. Корреляция между максимумом интеграла рабочего тока генератора и средней величиной рабочего тока в импульсе до (кривая 1, круги) и после (кривая 2, ромбы) доработки схемы интегрирования в дозаторе. Светлые точки соответствуют порогу срабатывания 1 В, темные — порогу срабатывания 1,1 В. Снижение чувствительности дозы к мощности воздействия, определяемое по наклону аппроксимирующих зависимостей, составляет 20,5 %

При ультразвуковой сварке поглощение энергии ультразвука зависит от множества факторов, учесть которые должным образом не представляется возможным. Поэтому параметры процесса можно рассматривать с позиций теории вероятностей, а сам процесс сварки — в терминах случайных процессов. Наиболее просто измеряемым параметром при сварке с использованием дозирующего устройства является длительность импульса сварки. Кроме того, длительность импульса характеризует энергию ультразвукового воздействия во время сварки, поэтому она использовалась для статистических оценок процесса.

Результаты обработки зарегистрированных в серии испытаний осциллограмм представлены на рис. 7 в виде выборочных функций вероятности и плотности вероятности для длительности импульса сварки. Рассчитаны также среднее значение, дисперсия и среднеквадратичное отклонение (СКО), а также для аппроксимации экспериментальных данных полиномом 6-й степени оценен размах функции плотности вероятности на полувысоте распределения. Качественно схожие результаты получаются также и при использовании других режимов сварки и номиналов микропризм. Как оказалось, величина разброса параметров ультразвуковой сварки сравнима с величиной допустимого энергетического диапазона (в процентном отношении), поэтому нельзя исключить вероятность отрицательного результата (брака) в отдельных случаях. При испытаниях также было установлено, что при оптимальных режимах сварки случайное появление термодефектов наблюдалось в основном, когда регулируемая длительность сварки не превышала среднюю величину для серии испытаний. По-видимому, это связано с влиянием мощности на дозу поглощенной энергии, как это было показано на рис. 6, так как мощность и поглощенная энергия для кратковременных импульсов больше, чем в случае долговременных, и вероятность выхода за границы допустимого диапазона энергии выше. Можно отметить, что указанный недостаток присущ подавляющему большинству аналоговых дозиметров и дозирующих устройств. Наряду с инерционностью, проявляющейся в виде задержки интегрирования, это ограничивает точность дозирования энергии. Тем не менее, использование данного дозирующего устройства позволило существенно снизить процент брака при сварке микропризм. Модифицированная ультразвуковая сварочная установка с дозирующим поглощенную энергию устройством в настоящее время практически используется при сварке компенсаторов косоглазия.

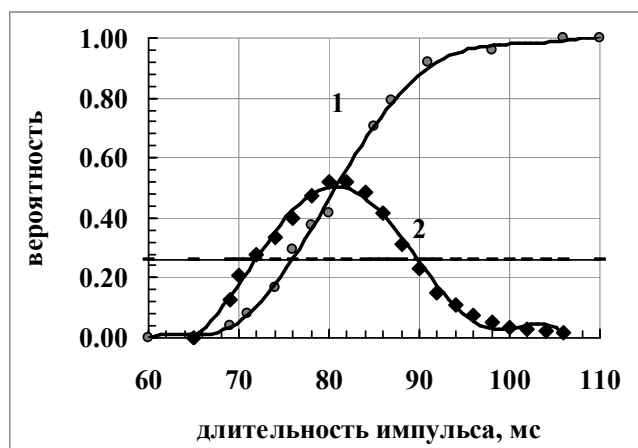


Рис. 7. Функции вероятности (1) и плотности вероятности (2) для длительности импульса сварки, полученные по результатам обработки 25-ти осциллограмм. Выборочное среднее значение длительности импульса 82,3 мс, выборочная дисперсия 8,35 мс (относительное СКО 10,2 %), размах плотности вероятности на полувысоте составляет 18 мс (22 %). Использованы микропризмы номиналом 3 Дп, сварка для каждого образца проводилась при максимальном ослаблении выходной мощности аттенюатором при давлении прижима сонотрода 150 кПа

Выводы

Предложено дополнить простые ультразвуковые сварочные аппараты устройствами дозирования механической энергии сваривания. При этом используется косвенное измерение энергии сваривания посредством интегрирования тока сварочной установки.

Калибровка устройств дозирования механической энергии сваривания должна производиться для конкретной сварочной установки, сонотрода и типа свариваемых элементов из условия получения удовлетворительных сварочных швов и отсутствия тепловых дефектов микроструктуры.

В перспективе планируется исследовать цифровые устройства дозирования энергией сваривания на основе микропроцессорных устройств.

Авторы выражают благодарность Ю.А. Бородину за фото тепловых дефектов микропризм.

1. Antonov E.E., Kryuchyn A.A., Minglei Fu, Petrov V.V., Shanoilo S.M., Zichun Le. MICROPRIISMS: optical parameters and monitoring. Kiev, 2015. 146 p.
2. Волков С.С., Черняк Б.Я. Сварка пластмасс ультразвуком. Москва, 1986. 256 с.
3. Шестопап А.Н., Васильев Ю.С., Минеев Э.А., Тарасенко О.В., Тарногородский В.П. Справочник по сварке и склеиванию пластмасс/под общ. ред. А.Н. Шестопапа. Киев, 1986. 192 с.
4. Токалин О.А. Особенности распределения энергии в микропризмах при сварке ультразвуком. *Ресстрація, зберігання і оброб. даних*. 2015. Т. 17. № 2. С. 3–13.
5. Оборудование для ультразвуковой сварки пластмасс. ТОО «ПУТЕК». URL: <http://www.ultrasonic.com.ua/rus/equipment/weldingplastic.htm>

Поступила в редакцию 05.12.2016