

УДК 655.225.6:773.92

## ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ФЛЕКСОГРАФСКИХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ ПЕЧАТНЫХ ФОРМ

С. К. ГРУДО\*, С. А. БАТАШЕВИЧ, Е. В. РУСАК

УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, 220050 г. Минск, Беларусь.

*В статье приведен способ получения цифровой флексографской фотополимерной печатной формы, в котором после дополнительного экспонирования производят облучение ультразвуком. Предложено ультразвуковое облучение, которое осуществляется позонно с акустическим контактом между ультразвуковым рабочим инструментом и печатной формой, что исключает повреждение растровой структуры. Определена величина позонного акустического контакта.*

### Введение

Повышение качества печати является одной из причин, по которой предъявляют требования к свойствам и использованию различных формных пластин во флексографской печати. С дальнейшим развитием флексографии появляются новые требования – в связи с расширением ассортимента печатной продукции увеличиваются требования к процессам эксплуатации и получения печатных форм, их тиражестойкости.

Основными характеристиками печатной формы являются толщина, жесткость и твердость, которые тесно взаимосвязаны. Твердость одного и того же материала при уменьшении его толщины, увеличивается. В то же время разные материалы одинаковой толщины могут иметь разную жесткость. Более тонкие и жесткие печатные формы лучше передают растровую точку, но с ними труднее работать, особенно при наладке печатной машины. Для гладкого запечатываемого материала при печати растровых изображений лучше использовать более жесткие формы, чем при печати штрихов и текста. В целом, чтобы получить высококачественную печатную продукцию, необходимо согласовать между собой определенные факторы, главным из которых является – выбор правильной печатной формы. Для этого необходимо гибко использовать разные типы формных пластин при изготовлении печатных форм.

Существует два типа формного материала для изготовления флексографских форм: резиновый и полимерный. Широкое распространение в настоящее время получили фотополимеризующиеся (фотополимерные) пластины в качестве

формного материала для флексографского способа печати. Они удобны при монтаже на формном цилиндре, обеспечивают лучший и равномерный переход краски на запечатываемый материал, более точную приводку красок (до 0,1 мм), воспроизводят высоколинейные изображения, линии толщиной от 0,1 мм, точки диаметром от 0,25 мм; текст как позитивный, так и негативный и растровые 5- и 95-процентные точки, а также сокращают и удешевляют технологический процесс их изготовления. Но стойкость их к растворителям и механическая прочность ниже, чем у резиновых форм [1].

Как правило, фотополимерные формы (ФПФ) изготавливаются двумя способами: аналоговым и цифровым. В настоящее время применяются водовывывной, термальный и смешанный способ. Основными преимуществами цифрового способа получения и широкого его распространения является то, что данный процесс характеризуется высокой точностью, так как каждая пластина является первой оригинальной копией, изготовленной на основе одних и тех же цифровых данных. Также возможно дистанционное управление, большая скорость изготовления, экологическая безопасность, наличие цифровых средств контроля. В результате удается повысить резкость точек, точность приводки и воспроизведения всего тонального диапазона исходного изображения, снизить растискивание растровой точки, а также значительно ускорить подготовительные и приладочные работы на печатной машине.

Известен цифровой (CIP) способ получения ФПФ, изложенный в источнике [2], включающий

создание маски, экспонирование УФ-источником формной пластины со стороны подложки и со стороны маски, удаление незаполимеризовавшихся молекул мономера, а затем дополнительное экспонирование. При помощи лазера удаляется маскирующий слой (черная, непрозрачная пленка), образуя на поверхности пластины негативное изображение. Негативное изображение (маска) необходимо для последующего экспонирования УФ-источником формной фотополимеризуемой пластины. Применение маскированных фотополимеров аннулирует этап изготовления фотоформ. Последующая обработка цифровых пластин после основного экспонирования принципиально не отличается от аналоговой и включает следующее: вымывание, сушка, дополнительное экспонирование, финишинг [2].

Недостатком цифрового получения фотополимерных ФПФ является то, что степень фотохимической реакции полимеризации уменьшается с увеличением глубины растровой структуры. Эта особенность фотохимической реакции, а также многофакторность самого технологического процесса получения ФПФ не позволяет повысить физико-механические и эксплуатационные свойства за счет более полной полимеризации и дополнительной сшивки полимерных цепочек.

Для решения данной проблемы, на основе проведенного анализа в работе [3] при поиске возможных способов модифицирования эксплуатационных свойств фотополимерного материала, авторами в [4] был предложен способ получения ФПФ, который включает стандартные операции изготовления ФПФ, где после дополнительного экспонирования производят операцию ультразвукового (УЗ) облучения с частотой 35–40 кГц, плотностью энергии 1,2 Вт/см<sup>2</sup> в течение 15–20 мин.

На основе ИК-спектроскопии исследуемых фотополимерных пластин фирмы Du Pont марки Cygel DPU (для цифрового экспонирования) в [3] было установлено, что основу фотополимерной композиции составляет соединение, которое представляет собой высокомолекулярный непредельный углеводород, молекулы которого содержат большое количество двойных π-связей, являющийся полимером изопрена (каучук).

Молекула каучука представляет собой длинную тонкую цепочку [5]. Звенья молекулы каучука могут вращаться не беспрепятственно в любом направлении, а ограничено – только вокруг осесимметричных σ-связей. Для того чтобы заставить молекулу мономера соединиться друг с другом, их необходимо предварительно возбудить, то есть привести их в такое состояние, когда они становятся способными, в результате раскрытия двойных связей, к взаимному присоединению. Это требует затраты определенного количества энергии или участия катализатора. В процессе полимеризации в изопрене раскрываются обе его

двойные связи, а в элементарном звене полимера двойная связь возникает на новом месте, т.е. свободные валентности средних углеродных атомов смыкаются и образуют двойные связи в середине молекул, ставших теперь уже звеньями растущей цепи. Затем к образовавшейся частице присоединяется следующая молекула изопрена. Подобный процесс продолжается и далее в течение всего экспонирования. Следовательно, в материале остается достаточное количество слабых двойных связей.

При воздействии ультразвуковой энергии на макромолекулы каучука в фотополимерных формах происходит разрыв π-связей и появляются свободные валентности, появившиеся макрорадикалы имеют в различных точках полимерной цепи незамещенные валентные связи, благодаря которым к основной цепи сможет присоединиться в виде боковой ветви новая макромолекула. За счет этого можно добиться дополнительной сшивки звеньев ФПФ, что позволяет улучшить ее физико-механические свойства [6]. Следует отметить, что особенностью данного процесса является то, что при этом молекулы исходного вещества или веществ, соединяющихся между собой, образуют полимер и не выделяют при этом каких-либо других веществ.

Так же в работе [3] авторами была определена зависимость передачи энергии при облучении ультразвуком ФПК печатных форм по формуле:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} M A^2 \omega^2, \quad (1)$$

где  $M$  – молярная масса вещества;  $A$  – амплитуда колебаний;  $\omega$  – частота колебаний.

И были выявлены энергетические пределы воздействия ультразвуковой энергии согласно условию:

$$266 \text{ кДж/моль} \leq \bar{E} \leq 348 \text{ кДж/моль}. \quad (2)$$

Однако полученная зависимость (1) не учитывает зависимость ультразвуковой энергии от свойств облучаемого материала, не позволяет определить энергетическое условие (2), и учитывает выделяемую энергию только за один период колебаний, а не за весь цикл ультразвукового воздействия.

В то же время, эффективность воздействия УЗ-колебаний на облучаемую среду зависит не только от удельной плотности облучаемой энергии и времени облучения, но и от акустического контакта ультразвукового инструмента с облучаемой средой. С одной стороны, увеличение контакта с фотополимерным слоем позволяет снизить потери ультразвуковой энергии в переходной зоне и тем самым повысить эффективность процесса облучения.

С другой стороны, молекулы каучука, хотя и имеют линейное строение, не вытянуты в линию,

\* Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: sergei.grudo@mail.ru.

а многократно изогнуты, как бы свёрнуты в клубки. При наложении определенных деформаций растягивания/сжатия такие молекулы изменяют свое положение, образец каучука от этого становится длиннее. Если же каучук растягивать или сжимать с достаточно большой силой, то произойдет не только вытягивание молекул, но и смещение их относительно друг друга – образец каучука может порваться, а уменьшение межмолекулярного расстояния не позволит УЗ-колебаниям передать энергию во внутренние слои материала.

Кроме того, учитывая, что воздействие на молекулы каучука происходит уже на готовой форме, чрезмерный прижим инструмента к ФПФ может привести к повреждению (заломы) растровой структуры. Это в результате приводит к браку и невозможности использования данной формы в флексографской печати.

**Цель работы** – модернизация технологии получения цифровых фотополимерных флексографских печатных форм за счет повышения эффективности воздействия ультразвуковых колебаний на облучаемую рабочую поверхность формы и снижение энергоемкости процесса.

#### Результаты исследования и их обсуждения

Как известно, ФПФ имеет печатную растровую структуру, разнящуюся количеством печатных элементов на единицу площади. Авторами предложен способ получения цифровых фотополимерных ФПФ (заявка № а20130009; заявл. 03.01.2013), в котором ультразвуковое облучение осуществляют при акустическом контакте между инструментом и печатной формой, не превышающем  $0,6 \text{ Н/мм}^2$ . А величину позонного акустического контакта инструмента с печатной формой определяют как произведение среднего значения относительной площади растровой точки каждой зоны на максимальную величину контакта.

Способ изготовления флексографских ФПФ реализуется в следующей последовательности:

- исходя из анализа цифровых файлов каждой цветоделенной печатной формы, определяется количество зон, подвергаемых УФ-излучению, причем величина зоны выбирается таким образом, чтобы растровые структуры, находящиеся в данной зоне, были близки по относительной площади растровой точки;

- для достижения максимальной эффективности воздействия ультразвуковых колебаний на облучаемую поверхность формы и исключения повреждения растровой структуры формы, площадь инструмента ультразвукового облучения выбирается равная облучаемой зоне, а величина усилия акустического контакта инструмента с зоной печатной формы определяется, исходя из среднего значения относительной площади растровых точек этой зоны, путем умножения последней на максимальную величину акустического контакта по формуле:

$$F = \Delta SP_{\max} / 100, \quad (3)$$

где  $\Delta S$  – среднее значение относительной площади растровых точек, %;  $P_{\max}$  – максимальное значение акустического контакта,  $\text{Н/мм}^2$ .

При распространении ультразвука в материале происходит затухание колебаний в соответствии с коэффициентом поглощения ультразвука  $\alpha$ , определяемый как обратная величина того расстояния, на котором амплитуда звуковой волны уменьшается в  $e$  раз [7].

Простейший закон затухания амплитуды с учетом коэффициента затухания и величины сжатия материала  $x$  под действием усилия прижима  $P$  рабочего инструмента представлен формулой:

$$A = A_0 / \exp(\alpha x), \quad (4)$$

где  $A_0$  – максимальная амплитуда звуковой волны;  $\alpha$  – коэффициент поглощения ультразвука;  $x$  – величина сжатия.

Имеющиеся данные позволяют преобразовать формулу (1), используя закон затухания амплитуды колебаний (4) и величину сжатия материала  $x$ , которая определяется по формуле:

$$x = -P/c, \quad (5)$$

где  $c$  – жесткость материала, определяемая из выражения:

$$c = E_{\text{упр}} S / x, \quad (6)$$

где  $E_{\text{упр}}$  – модуль упругости;  $S$  – облучаемая площадь поверхности материала.

Принимая во внимание, что число колебаний определяется как  $N = ft$  зависимость (1) примет вид:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} MNA_0^2 \omega^2 \exp(-2\alpha x - 2\alpha x P / ES), \quad (7)$$

Полученная математическая модель позволяет рассчитать необходимые усилия прижима рабочего инструмента ультразвуковой установки для модифицирования ФПФ, что дает возможность сделать данную установку универсальной и повысить возможности ее использования. Используя математическую зависимость (7), можно исследовать не только зависимость  $E(P)$ , но и зависимость полной энергии от частоты колебаний  $E(\omega)$  и зависимость полной энергии от максимальной амплитуды колебаний  $E(A_0)$ , что позволит определить расчетные граничные значения переменных  $P$ ,  $\omega$  и  $A_0$ , чтобы полученная зависимость удовлетворяла энергетическому условию (2).

Для этого необходимо подставить численные значения в зависимость (7), где в качестве переменной величины служит  $P$ ,  $\omega$  или  $A_0$ , а все остальные величины являются постоянными.

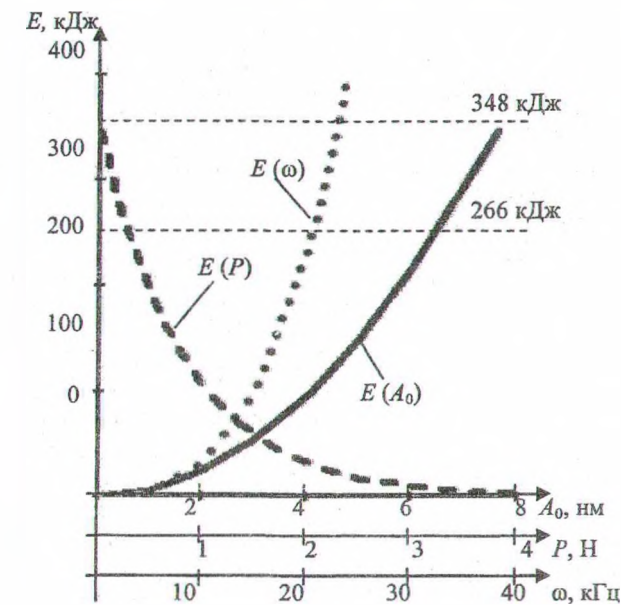


Рис. 1. Зависимости полной энергии от максимальной амплитуды  $E(A_0)$ , усилия прижима  $E(P)$ , от частоты  $E(\omega)$

На рис. 1 видно, что значение полной энергии возрастает от амплитуды по параболической зависимости с учетом коэффициента поглощения и свойств материала и падает с увеличением величины прижима  $P$ , поскольку, чем сильнее осуществляется прижим рабочего инструмента УЗ-установки к фотополимеру, тем плотнее располагаются звенья макромолекул друг по отношению друга и тем сильнее поглощается ультразвуковая энергия.

Также на рис. 1 показано изменение полной энергии от частоты колебаний, где с увеличением частоты энергия изменяется по гиперболической зависимости.

В [3] были приведены результаты опытных испытаний по оценке влияния УЗ-колебаний на степень сшивки фотополимерной композиции и установления влияния сшивки на изменение физико-механических свойств флексографских ФПФ. Однако в статье [3] не был проведен статистический анализ этих величин. Поэтому авторами данной статьи полученные результаты были обработаны в программной среде *Mathcad*.

В *Mathcad* имеются специальные функции, позволяющие вычислять обобщенные (статистические) характеристики случайных величин. Для получения уравнения регрессии в виде полинома в пакете *Mathcad* предусмотрено две функции: *regress* и *interp*, которые используются совместно [8]. Если же данные не связаны единой полиномиальной зависимостью, то для получения лучшего результата можно воспользоваться функцией *loess*, которая выполняет локальное квадратичное приближение данных, т.е. будут созданы различные полиномы второго порядка в зависимости от расположения на кривой.

В данном случае в качестве переменной ве-

личины служат значения временных интервалов проведения опытов с определенным шагом, а измеренные величины – значения износостойкости  $b$  и набухания  $Q$ . Результаты полиномиальной регрессии представлены на рис. 2 для  $b(t)$  и рис. 3 для  $Q(t)$ .

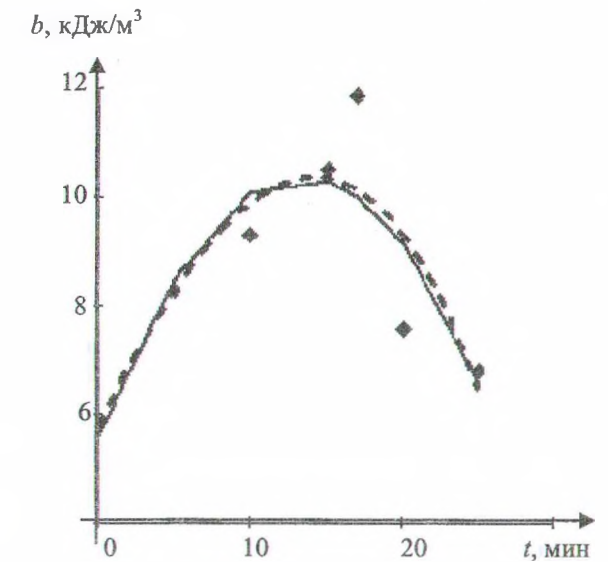


Рис. 2. Полиномиальная регрессия  $b(t)$

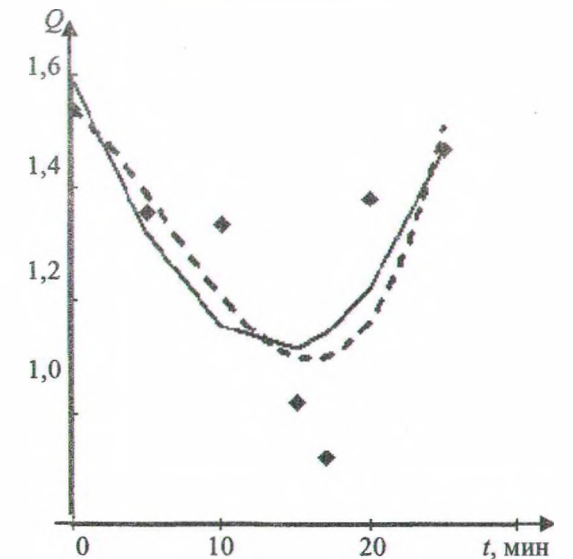


Рис. 3. Полиномиальная регрессия  $Q(t)$

На рисунках прямой линией представлено локальное квадратичное приближение, а пунктирной – полином 3-го порядка.

Анализ графиков показывает, что наиболее близко описывает искомые зависимости полином 3-го порядка, который отличается высокой гладкостью кривой. Однако этого порядка не достаточно, чтобы отразить точку перегиба графиков согласно описанным опытным данным.

Поэтому для описания более сложной зависимости между данными необходимо использовать уравнение регрессии в виде линейной комби-

нации известных функций

$$y(x) = a_0 f_0(x) + a_1 f_1(x) + \dots + a_n f_n(x), \quad (8)$$

где коэффициенты  $a_0, a_1, \dots, a_n$  подлежат определению. Первая задача может быть решена с использованием встроенной в пакет *Mathcad* функции *linfit*, а для решения второй задачи можно воспользоваться функцией *genfit*.

Наиболее близко описывает искомые функции полином 6-го порядка для износостойкости образцов, формула (9), и для набухания образцов в зависимости от времени, формула (10):

$$b(t) = -2,756 \cdot 10^{-8} t^6 + 0,263t + 6,49, \quad (9)$$

$$Q(t) = 2,885 \cdot 10^{-9} t^6 - 0,029t + 1,522, \quad (10)$$

Графически полученные функции представлены на рис. 4 и рис. 5.

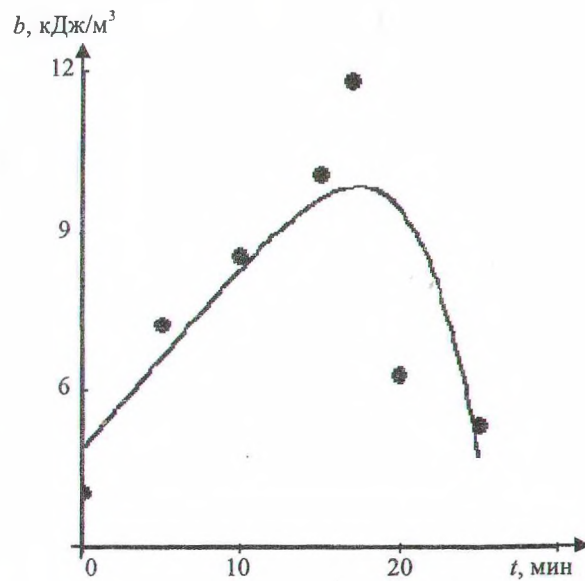


Рис. 4. Зависимость износостойкости  $b(t)$

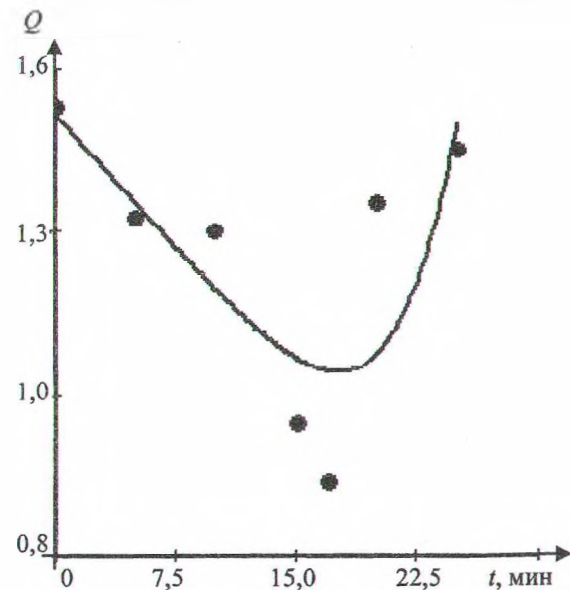


Рис. 5. Зависимость набухания  $Q(t)$

Как видно из графиков, момент времени 17 мин является критической точкой, облучение свыше 17 мин приводит к деструкции (разрушению) полимерных цепей.

Это объясняется тем, что количество передаваемой энергии ультразвуковых колебаний увеличивается, превышая граничные условия воздействия ультразвуковой энергии на полимерные связи, что приводит к разрушению не только  $\pi$ -связей, но и  $\sigma$ -связей, т.е. полимерные молекулы становятся короче, а устойчивость к истиранию материала уменьшается.

Для обработки опытных данных можно также воспользоваться следующими встроенными функциями пакета *Mathcad*:

– *mean* ( $t$ ) – функцией для расчета математического ожидания;

– *stdev* ( $t$ ) – функцией для расчета среднеквадратического отклонения;

– *var* ( $t$ ) – функцией для расчета дисперсии случайной величины.

В данном случае, как видно из формулы (7) экспериментально исследуемый процесс зависит не только от процесса «сшивки» молекул, а и от многих других факторов. Поскольку некоторая связь между опытными данными найдена по формулам (9) и (10), то для оценки взаимодействия можно вычислить парные коэффициенты корреляции, т.е. имеется ли корреляционная зависимость (взаимодействие).

Для вычисления коэффициента корреляции используется выборочное среднее:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k, \quad (11)$$

и выборочная дисперсия:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2, \quad (12)$$

где  $S = \sqrt{S^2}$  – выборочное среднеквадратичное отклонение. Тогда для расчета выборочного коэффициента корреляции используется выражение:

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{(n-1)S_x S_y}, \quad (13)$$

Выполнив математические действия в пакете *Mathcad*, получаем следующие коэффициенты:  $r_{t,b} = 0,012$  и  $r_{t,Q} = -0,131$ .

Полученные коэффициенты принимают значение не близкие к  $\pm 1$ , следовательно, зависимости износостойкости и набухания образцов от времени облучения недостаточно, необходимо проводить дополнительные опыты для более полного выявления всех параметров ультразвукового воздействия.

## Заключение

Авторами в данной работе предложен способ получения цифровых флексографских ФПФ, который позволяет снизить энергоемкость процесса их получения за счет повышения эффективности воздействия УЗ-колебаний на облучаемую рабочую поверхность формы, а также исключает возможность повреждения растровой структуры при облучении ультразвуком.

На основе проведенного статистического анализа следует, что необходимо проведение экспериментальных исследований для подтверждения представленной математической модели.

## Обозначения

*CtP* – технология «Computer-to-Plate»; ФПФ – фотополимерная форма; ФПК – фотополимерная композиция;  $M$  – молярная масса вещества;  $A$  – амплитуда колебаний;  $\omega$  – частота колебаний;  $\Delta S$  – среднее значение относительной площади растровых точек, %;  $P_{\max}$  – максимальное значение акустического контакта, Н/мм<sup>2</sup>;  $A_0$  – максимальная амплитуда звуковой волны;  $\alpha$  – коэффициент поглощения ультразвука;  $x$  – величина сжатия;  $c$  – жесткость материала;  $t$  – время ультразвуковой обработки;  $E_{\text{упр}}$  – модуль упругости;  $S$  – облучаемая площадь поверхности

материала;  $\sqrt{S^2}$  – выборочное среднеквадратичное отклонение.

## Литература

1. Аверьянова, Н. Фотополимерные пластины – история и реальность / Н. Аверьянова, Д. Токманцев // Журнал «Pakkograft». – 2000. – № 5. – С. 64–66.
2. Надирова, Е.Б. Цифровые технологии в формных процессах глубокой и флексографской печати: учеб. пособие / Е.Б. Надирова – М.: Изд-во МГУП, 2006. – С. 42, 50–66.
3. Медведев, С.В. Повышение эксплуатационных характеристик флексографских фотополимерных печатных форм воздействием ультразвуковых колебаний / С.В. Медведев, С.А. Барташевич, Ж.С. Шашок // Труды БГТУ. Сер. IX, Издат. дело и полиграфия. – 2011. – С.61–66.
4. Способ получения цифровых фотополимерных флексографских печатных форм / Положительное решение по заявке № а 20110679 от 07.09.2012 G03F 7/20.
5. Тагер, А.А. Физикохимия полимеров. – М.: Химия, 1978. – 544 с.
6. Грудо, С.К. Особенности выбора и расчета акустических параметров ультразвуковой системы процесса модификации фотополимерных печатных форм / С.К. Грудо, С.А. Барташевич, Е.В. Русак // Труды БГТУ. – 2012. – № 9 (156): Издательское дело и полиграфия. – С. 37–42.
7. Голямина, И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И.П. Голямина. – М.: «Советская энциклопедия», 1979. – С. 257–263.
8. Долгова, Т.А. Методы моделирования полиграфических процессов: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений по полиграфическим специальностям / Т.А. Долгова. – Минск: БГТУ, 2009. – 166 с.

Grudo S. K., Bartashevich S. A., and Rusak Y. V.

Features of ultrasonic modernization of process for the reception of flexographic photopolymeric printing form.

The article presents the way of reception digital flexographic photopolymeric printing form, in which after additional exposure make irradiation by ultrasound. The ultrasonic irradiation which is carried out in a certain zone with acoustical contact between the ultrasonic working tool and the printing form that expels a fault of raster structure is offered. And also the size acoustical contact a certain zone is defined.

Поступила в редакцию 10.10.2013.

© С. К. Грудо, С. А. Барташевич, Е. В. Русак, 2014.