

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 655.326.1:534.321.9

**ГРУДО**  
**Сергей Казимирович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ФЛЕКСОГРАФСКИХ  
ФОТОПОЛИМЕРНЫХ ПЕЧАТНЫХ ФОРМ ПУТЕМ ЛОКАЛЬНОГО  
ИЗБИРАТЕЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.02.13 – машины, агрегаты и процессы  
(полиграфическое производство)

Минск, 2017

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет»

**Научный руководитель**

**Барташевич Святослав Александрович,**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полиграфического оборудования и систем обработки информации УО «Белорусский государственный технологический университет»

**Шмаков Михаил Сергеевич,**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой полиграфического оборудования и систем обработки информации УО «Белорусский государственный технологический университет»

**Официальные оппоненты:**

**Черная Наталья Викторовна,**

доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой химической переработки древесины УО «Белорусский государственный технологический университет»

**Зильберглейт Марк Аронович,**

доктор химических наук, доцент, заведующий лабораторией технологии неорганических солей ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси»

**Оппонирующая организация**

Республиканское научно-техническое унитарное предприятие «Криптотех» Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь

Защита состоится «10» марта 2017 г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.04 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, ауд. 240, корп. 4; тел.: (017)-327-80-46, факс: (017)-327-62-17; e-mail: [zholnerovich@belstu.by](mailto:zholnerovich@belstu.by)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Автореферат разослан «03» февраля 2017 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций



Н. В. Жолнерович

## ВВЕДЕНИЕ

Основной процесс цифровой технологии («Computer-to-Plate», CtP) изготовления цифровых флексографских фотополимерных печатных форм, его этапы и места их следования в технологическом процессе в значительной степени уже изучены. Однако этот процесс не всегда позволяет достичь высокой прочности растровой структуры, что делает актуальным поиск способов повышения печатно-эксплуатационных свойств данных форм за счет улучшения физико-механических показателей фотополимерного материала.

В этом направлении особый интерес вызывает модификация полимерных материалов под воздействием энергии ультразвуковых колебаний, в результате которой в полимерах наблюдается целый ряд физических и химических явлений. Данный процесс относится к вариантам модификации, основанным на изменении структуры и свойств полимерного материала, и может выполняться как на стадиях синтеза, так и на стадии обработки готового изделия.

Использование ультразвуковой модификации в процессе изготовления флексографских фотополимерных печатных форм определяется пониманием физического процесса, обоснованием и выбором способа и устройства для воздействия ультразвуком на обрабатываемую поверхность. Однако повышение эффективности и расширение области использования ультразвука при изготовлении печатных форм в значительной степени сдерживалось отсутствием обобщенных научных результатов и данных по выявлению и оценке основных закономерностей его влияния на процесс дополнительной сшивки в фотополимерном материале. Оставались мало изученными вопросы, касающиеся влияния основных технологических параметров ультразвукового воздействия, таких как частота и амплитуда колебаний, на скорость изнашивания полимерного материала печатных форм, определения величины энергетического ультразвукового воздействия на участки с малым процентом величины растровой точки (до 15%), величины акустического контакта между поверхностями ультразвукового рабочего инструмента и обрабатываемого материала.

В диссертационной работе выполнен комплекс исследований, позволивший обосновать и показать возможность и эффективность использования ультразвукового воздействия на фотополимерный материал флексографских печатных форм с малой растровой структурой. На основе этого разработан способ получения цифровых флексографских фотополимерных печатных форм с использованием ультразвуковой модификации, а для его комплексного анализа, обобщения и количественной оценки разработана и изготовлена опытная ультразвуковая установка, позволяющая осуществлять локальное ультразвуковое воздействие.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа содержит научно обоснованные результаты, которые направлены на решение прикладной технической задачи в области повышения печатно-эксплуатационных свойств флексографских фотополимерных печатных форм.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2011–2015 годы (п. 8.2. Поверхностные явления, процессы контактного взаимодействия, трения и смазки материалов, новые композиционные полимерные и металлополимерные материалы, модифицированные полимеры, эластомерные композиты, многокомпонентные аддитивы для современных и перспективных полимерных материалов, клеи и расплавы) и 2016–2020 годы (п. 3.4. Новые многофункциональные материалы, специальные материалы с заданными свойствами), научному направлению кафедры полиграфического оборудования и систем обработки информации учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

**Связь работы с научными программами (проектами), темами.** Диссертационные исследования проводились в рамках следующих НИР:

– Гранта Министерства образования Республики Беларусь «Создание ультразвуковой установки для модификации флексографских фотополимерных печатных форм» (ГБ 14-026, № гос. регистрации 20141088, 02.01.2014 – 31.12.2014).

– Договора между учреждением образования «Белорусский государственный технологический университет» и Полоцким РУПП «Наследие Ф. Скорины» по теме «Разработка и расчет конструкторско-технологической документации на установку для ультразвуковой модификации флексографских фотополимерных печатных форм и исследование ее технологических параметров» (ХД 14-073, № гос. регистрации 20141084, 01.04.2014 – 31.12.2014).

**Цель и задачи исследования.** Цель исследования – повышение печатно-эксплуатационных свойств цифровых флексографских фотополимерных печатных форм за счет проведения ультразвуковой модификации.

Задачи исследования:

– разработать способ изготовления цифровых флексографских фотополимерных печатных форм на основе ультразвуковой модификации, обеспечивающий улучшение печатно-эксплуатационных свойств полимерного материала;

– выполнить математическое моделирование процесса ультразвуковой модификации, позволяющее определить управляемые параметры ультразвукового воздействия и их взаимодействие на процесс дополнительной поперечной сшивки полимерного материала флексографских печатных форм;

– разработать ультразвуковую технологическую установку с целью проведения локального избирательного ультразвукового облучения поверхности флексографских фотополимерных печатных форм и апробации результатов математического моделирования;

– исследовать влияние и продолжительность процесса ультразвукового воздействия на прочностные свойства полимерного материала флексографских печатных форм.

Объект исследования – печатно-эксплуатационные свойства фотополимерного материала флексографских печатных форм.

Предмет исследования – процесс дополнительного структурирования полимерного материала цифровых флексографских фотополимерных печатных форм при воздействии энергии ультразвуковых колебаний.

**Научная новизна** заключается в проведении дополнительного процесса структурирования полимерного материала флексографских печатных форм за счет управляемого воздействия ультразвуковыми колебаниями в установленных энергетических пределах, что позволяет добиться повышения эксплуатационных свойств печатных форм. Локальное избирательное ультразвуковое воздействие осуществляется с помощью разработанной и изготовленной экспериментальной ультразвуковой установки для модификации флексографских фотополимерных печатных форм, для которой предложена методика расчета акустических параметров и конструктивных особенностей ультразвуковой колебательной системы и ее согласования с выходными параметрами ультразвукового генератора.

**Положения, выносимые на защиту:**

– способ изготовления цифровых флексографских фотополимерных печатных форм (пат. ВУ 19448), отличающийся применением ультразвукового воздействия для придания высоких прочностных свойств печатным растровым структурам. Поверхность фотополимера подвергается локальному избирательному ультразвуковому воздействию, а ультразвуковой рабочий инструмент приводится в контакт с поверхностью каждого участка с усилием, равным произведению среднего значения относительной площади растровых точек в этой зоне, выраженного в процентах, на максимально допустимую величину указанного усилия, равную  $0,6 \text{ Н/мм}^2$ ;

– математическая модель процесса ультразвуковой модификации, учитывающая взаимодействие основных параметров ультразвукового облучения (амплитуда и частота колебаний) и характеристик обрабатываемой среды (жесткость и коэффициент поглощения полимерного материала), позволяющая определить их допустимые значения с учетом энергетических пределов ультразвукового воздействия на полимерный материал;

– ультразвуковая установка (опытная) модификации флексографских печатных форм, позволяющая реализовать эффективное воздействие ультразвуковыми колебаниями на процесс дополнительной сшивки полимерного материала путем проведения локального избирательного облучения участков печатных форм и регулирования усилия прижатия и плоскостности поверхности рабочего инструмента, что снижает энергоемкость процесса получения модифицированных печатных форм;

– экспериментальные зависимости и теоретические результаты, позволившие исследовать влияние ультразвукового воздействия на износостойкость, степень набухания фотополимерного материала печатных форм, а также определить наилучшую продолжительность ультразвуковой обработки.

**Личный вклад соискателя ученой степени** заключается в обосновании путей решения научной проблемы; определении цели и постановки задач исследования; систематизации и анализе патентной и научно-технической литературы по теме диссертации; анализе существующих способов модификации полимерных материалов; разработке способа ультразвуковой модификации и его математической модели; разработке и изготовлении опытной ультразвуковой установки; в планировании и проведении экспериментов; анализе результатов и формулировке выводов; подготовке научных публикаций и заявок на изобретения; руководстве НИР по теме диссертации. Основной научный руководитель – кандидат технических наук, доцент С. А. Барташевич, который являлся соавтором опубликованных работ, определял направление исследований, принимал участие в обсуждении результатов и подготовке научных публикаций.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.** Основные положения диссертационной работы представлены и обсуждены на Международной научно-практической молодежной конференции «Научные стремления – 2011» (г. Минск, 2011 г.); 13-й Международной конференции студентов и аспирантов «Друкарство молодежи» (г. Киев, 2013 г.); научном семинаре в Украинской академии печати (г. Львов, 2014 г.); I Международном форуме «Скориновские чтения – 2015» (г. Минск, 2015 г.); II Международном форуме «Скориновские чтения – 2016» (г. Минск, 2016 г.); а также на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов БГТУ с международным участием (г. Минске, 2013–2016 гг.).

**Опубликование результатов диссертации.** По теме диссертации опубликовано 4 научных статьи в рецензируемых научных изданиях Республики Беларусь (2,23 авт. листа), входящих в перечень научных изданий ВАК Республики Беларусь, получен патент на способ изготовления цифровой фотополимерной флексографской печатной формы, подана заявка на патент на устройство для ультразвуковой позонной финишной обработки рабочих поверхностей

флексграфских печатных форм, получен патент на полезную модель Республики Беларусь на устройство для ультразвуковой финишной обработки рабочих поверхностей флексграфских печатных форм по зонам, опубликовано 12 тезисов и материалов конференций (0,99 авт. листа). Общий объем публикаций – 3,22 авторских листа. Имеется диплом за лучший научный доклад «Способ получения цифровой фотополимерной флексграфской печатной формы» на 13-й Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов «Друкарство молодежи», 23–25 апреля 2013 года, г. Киев.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертации составляет 144 страницы. Диссертация содержит 29 рисунков, 9 таблиц и 5 приложений. Список использованных источников включает 194 наименования, список публикаций соискателя – 19 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** посвящена анализу патентной и научно-технической литературы по теме диссертации, который показал, что в настоящее время прослеживается тенденция совершенствования технологии изготовления цифровых флексграфских печатных форм для получения не только высокотиражной, но и высококачественной печатной продукции, а также переход на более экономичные и экологичные формные материалы.

Выявлено, что многофакторность основных процессов изготовления цифровых фотополимерных печатных форм, а также использование визуальнотестирующего метода контроля получения рельефной растровой структуры, не всегда позволяют добиться высоких параметров прочности, заявленных производителями пластин. Решению существующих проблем посвящена диссертационная работа, в которой повышение печатно-эксплуатационных характеристик флексграфских форм достигается за счет проведения дополнительного способа модификации полимерного материала, которое заключается в приложении к фотополимерной композиции печатных форм энергии ультразвуковых колебаний. Данный способ позволяет без изменения химического состава целенаправленно влиять на эксплуатационные свойства полимерного материала и является экологически чистым.

В известных работах ученых и исследователей – О. В. Абрамова, В. Н. Хмелева, А. С. Шиляева, В. П. Северденко, Б. А. Аграната, С. А. Медведева, В. Н. Кестельмана, Р. В. Барсукова и других, посвященных разработкам ультразвуковых аппаратов и исследованиям влияния ультразвуковой модификации на различные технологические среды, не выявлено математическое описание меха-

низма ультразвукового воздействия на фотополимерный материал печатных форм, отсутствуют технические решения по способу введения энергии ультразвуковых колебаний в фотополимерную композицию с учетом печатной растровой структуры. Поэтому выполненные в диссертационной работе разработки по созданию экспериментального ультразвукового оборудования для проведения комплексного анализа, обобщения и количественной оценки предлагаемого способа модификации фотополимерного материала имеют актуальный характер.

На основании материала, изложенного в первой главе, сформирована цель диссертационной работы и определены основные задачи исследования, необходимые для ее достижения.

**Во второй главе** описаны объекты и методы проведения исследований, приведены технические характеристики исследуемой флексографской печатной формы, представлены данные об используемом оборудовании и лабораторных установках.

Исследуемые образцы были подготовлены на основе водовымывной флексографской фотополимерной печатной формы Toyobo Cosmolight QS толщиной 1,14 мм (1 мм – фотополимерная композиция, 0,14 мм – подложка), полученной по цифровой технологии, и разделены на шесть групп. Каждая группа состояла из формных образцов с регулярной 5, 7, 9, 11 и 15%-ной печатной растровой структурой. Запись растровой структуры и вся последующая обработка проводилась на технологическом оборудовании РУП «Бобруйская укрупненная типография им. А. Т. Непогодина» по цифровой технологии для данного типа форм.

Облучение ультразвуком проводилось на кафедре полиграфического оборудования и систем обработки информации БГТУ на разработанной опытной ультразвуковой технологической установке [18]. Каждая из пяти групп образцов была облучена ультразвуком в течение заданных интервалов времени 3, 6, 9, 11 и 15 мин соответственно. Шестая (контрольная) группа ультразвуковому облучению не подвергалась. Исследования физико-механических свойств формных образцов всех групп проводились с использованием стандартных методик: метода усталостной выносливости на аппарате МРС-2 (ГОСТ 261-79), метода сопротивления истиранию при скольжении на аппарате МИ-2 (ГОСТ 426-77), общепринятого метода равновесного набухания. Формные образцы печатной формы также были исследованы в «Центре физико-химических методов исследования» БГТУ методом ИК-спектроскопии.

Эмпирические данные, полученные в результате проведения экспериментов, были подвернуты статистическому анализу, задачами которого являлись: оценка качества проведения опытов; определение корреляционных зависимостей между временем воздействия ультразвуком и исследуемыми параметрами печатных форм; построение математической регрессионной модели для определения наилучшей продолжительности воздействия на фотополимерный мате-



риал. В качестве среды для выполнения математических расчетов использовался функциональный пакет программы Mathcad.

**Третья глава** посвящена теоретическому исследованию физико-химических процессов, происходящих в полимерном материале под управляемым ультразвуковым воздействием, в результате которого выполнено математическое моделирование процесса ультразвуковой модификации флексографских печатных форм [2, 5, 8, 10]. Объектом исследования выбрана фотополимерная пластина для флексографской печати на основе синтетического эластомера.

Установлено, что на основных этапах изготовления печатных форм при воздействии на пластину УФ-излучения происходит пространственная сшивка многофункциональных молекул мономера или олигомера. Однако во внутренних слоях фотополимерной композиции в связи с уменьшением степени фотохимической реакции может оставаться некоторое количество несшитого материала. Получение улучшенных эксплуатационных свойств рельефной растровой структуры печатной формы достигается путем проведения дополнительного процесса ультразвукового воздействия  $E$  в энергетических пределах от 266 кДж/моль до 348 кДж/моль на эластомерный материал, что приводит к интенсификации процессов формирования межмолекулярных связей с заданной степенью структурирования за счет взаимодействия оставшихся незамещенных функциональных групп, увеличению молекулярной массы общей цепи вещества, что придает фотополимерным печатным формам более высокие прочностные свойства.

Отмечено, что для уменьшения энергоемкости процесса облучения осуществлять ультразвуковую обработку необходимо в зонах (в светах или полутонах), требующих повышения прочностных параметров, а не по всей рабочей поверхности печатной формы, с учетом влияния не только удельной плотности энергии и продолжительности облучения, но и акустического контакта ультразвукового инструмента с облучаемой средой.

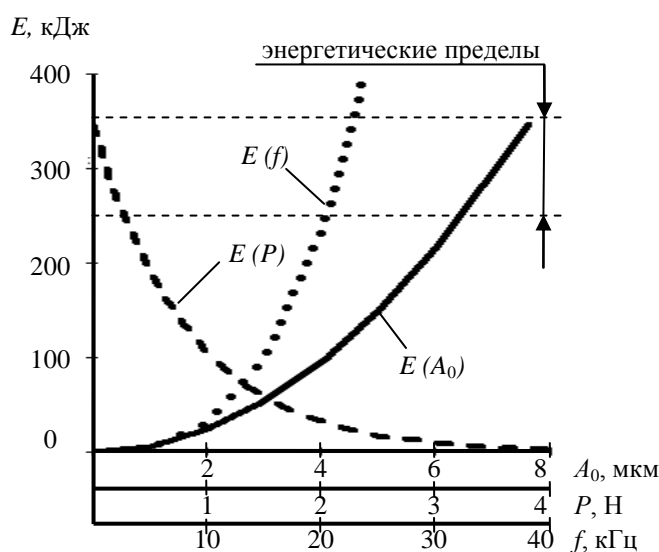
В соответствии с поставленной задачей разработан способ изготовления цифровых флексографских фотополимерных печатных форм (пат. ВУ 19448), в котором после основных этапов производится операция ультразвукового облучения [9, 17]. Согласно способу ультразвуковое воздействие осуществляется отдельно по зонам, на которые разбивается каждая цветоделенная фотополимерная печатная форма, а ультразвуковой рабочий инструмент приводится в контакт с поверхностью каждой из зон с усилием  $F$ , Н/мм<sup>2</sup>, равным произведению среднего значения относительной площади растровых точек  $\Delta S$ , %, в этой зоне, выраженного в процентах, на максимально допустимую величину указанного усилия  $P_{\max}$ , равную 0,6 Н/мм<sup>2</sup>, согласно выражению

$$F = \Delta S \frac{P_{\max}}{100} \cdot \quad (1)$$

Проведено математическое моделирование процесса, происходящего в фотополимерной композиции печатной формы на молекулярном уровне при облучении ультразвуком, на базе волновой теории [3], учитывающее экспоненциальный закон убывания амплитуды колебаний и общую энергию частицы как сумму кинетической и потенциальной энергий. Выявлено, что на эффективность ультразвукового воздействия оказывают влияние максимальная амплитуда звуковой волны  $A_0$ , м, частота колебаний  $f$ , Гц, и усилие прижима рабочего инструмента  $P$ , Н. Продолжительность облучения  $t$ , с, и свойства материала фотополимерной формы: молярная масса вещества  $M$ , кг/моль, коэффициент поглощения ультразвука  $\alpha$ ,  $\text{м}^{-1}$ , величина сжатия  $x$ , м, жесткость материала  $c_{\text{сж}}$ , Н/м, являются постоянными величинами. В результате получена математическая зависимость полной ультразвуковой энергии  $E$ , Дж/моль, в виде

$$E = 2MA_0^2 f^3 \pi^2 t \cdot e^{-2\alpha(x + \frac{P}{c_{\text{сж}}})} \quad (2)$$

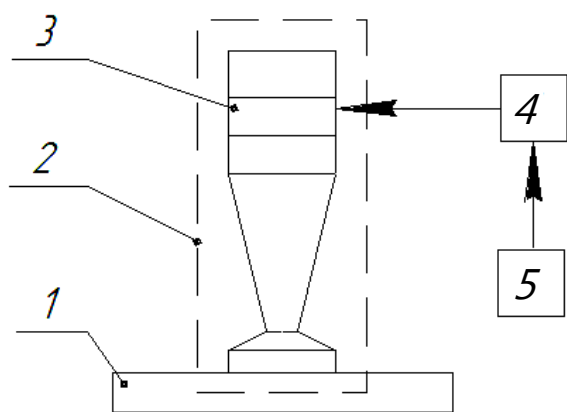
Подстановка численных значений аргументов и констант в математическое выражение (2) позволяет выявить требуемые значения управляемых параметров ультразвукового воздействия с учетом установленных энергетических пределов для конкретного материала формы (рисунка 1). Из полученных зависи-



**Рисунок 1.** – Зависимости полной энергии от максимальной амплитуды  $E(A_0)$ , усилия прижатия  $E(P)$  и частоты колебаний  $E(f)$

симостей полной энергии от максимальной амплитуды  $E(A_0)$ , усилия прижатия  $E(P)$  и частоты колебаний  $E(f)$  видно, что наилучший диапазон максимальной амплитуды колебаний составляет 6–8 мкм, частотный диапазон для получения высокой интенсивности ультразвуковых колебаний находится в пределах 20–23 кГц, а усилие прижатия рабочего инструмента, который должен иметь акустический контакт по всей площади с поверхностью печатной формы, но не придавливать ее, имеет значения 0–0,2 Н.

На основании проведенного математического моделирования получены количественные значения управляемых параметров ультразвукового воздействия для практической апробации предложенного способа ультразвуковой модификации флексографских фотополимерных печатных форм.



- 1 – обрабатываемый материал;  
 2 – колебательная система;  
 3 – пьезоэлектрический преобразователь;  
 4 – ультразвуковой генератор; 5 – система  
 контроля и автоматизации

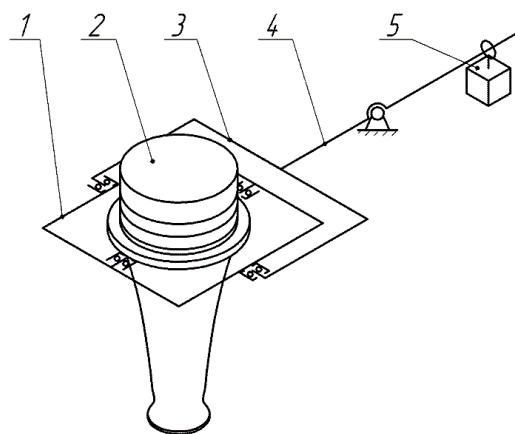
Рисунок 2. – Структурная схема  
 ультразвуковой установки

и конструктивных параметров ультразвуковой колебательной системы технологической установки и энергетических характеристик ультразвукового генератора, учитывающая условия протекания процесса ультразвуковой обработки фотополимерных печатных форм [1]. Определено, что для уменьшения габаритов колебательной системы необходимо использовать составной (пакетный) пьезоэлектрический преобразователь марки ЦТБС-7, состоящий из двух одинаковых элементов геометрического размера  $38 \times 16 \times 5$  мм.

На втором этапе разработана двухполуволновая ультразвуковая колебательная система для опытной установки и механизм, связывающий колебательную систему с устройством регулируемого нагружения рабочей поверхности инструмента. Спроектирован экспоненциальный концентратор из стали 45, имеющий коэффициент усиления 2,5 и выполненный зацело с рабочим инструментом для эффективной передачи ультразвуковых колебаний в обрабатываемый материал. Разработана система регулируемого нагружения (рисунок 3), обеспечивающая плоскопараллельное перемещение рабочей поверхности инстру-

В четвертой главе рассмотрен методологический подход по реализации экспериментальной ультразвуковой технологической установки с учетом необходимого воздействия на полимерный материал. Разработка опытной установки осуществлялась на базе семейства многофункциональных ультразвуковых аппаратов (рисунок 2), соприкасающихся с обрабатываемыми средами и обеспечивающих на рабочих инструментах колебания с интенсивностью  $1 \dots 10 \text{ Вт/см}^2$ , и состояла из четырех этапов [6, 11–13].

На первом этапе описана методика расчета основных акустических



- 1 – стакан; 2 – колебательная  
 система; 3 – соединительная вилка;  
 4 – коромысло; 5 – противовесные  
 элементы (грузы)

Рисунок 3. – Схема регулируемого  
 нагружения рабочей поверхности  
 инструмента

мента и самовыставление ее по поверхности облучаемой печатной формы (полез. модель ВУ 10857), что, в свою очередь, обеспечивает полное акустическое соприкосновение указанных поверхностей.

На третьем этапе реализован ультразвуковой генератор модели ВНТ77 с учетом специфики облучения фотополимерного материала печатных форм [4], выполненный по схеме с независимым возбуждением, автоподстройкой частоты и предназначенный для возбуждения механических колебаний ультразвуковой частоты в пьезоэлектрических преобразователях в полосе частот 35 ... 45 кГц. Осуществлено согласование выходных параметров генератора с акустическим преобразователем с помощью блока согласования, который состоит из трансформатора и дросселя, совместно с пьезокольцами ультразвуковой колебательной системы образующие резонансный колебательный контур. Реализована возможность плавной регулировки выходной мощности в зависимости от вида нагрузки отдельно или совместно изменением частоты задающего генератора и изменением длительности питающих импульсов.

На четвертом этапе создана экспериментальная ультразвуковая установка (рисунок 4), осуществляющая локальную избирательную ультразвуковую обработку поверхности печатной формы с удельной акустической мощностью 1 Вт/см<sup>2</sup>,



Рисунок 4. – Опытная ультразвуковая установка

эффективной площадью излучения 3,5 см<sup>2</sup>, потребляемой мощностью не менее 100 Вт [14, 18, 19]. Функционирование установки реализовано в двух режимах: «Работа», осуществляющем ультразвуковую обработку, и «Наладка», производящем проверку работоспособности и настройки генератора при низком напряжении питания выходного каскада.

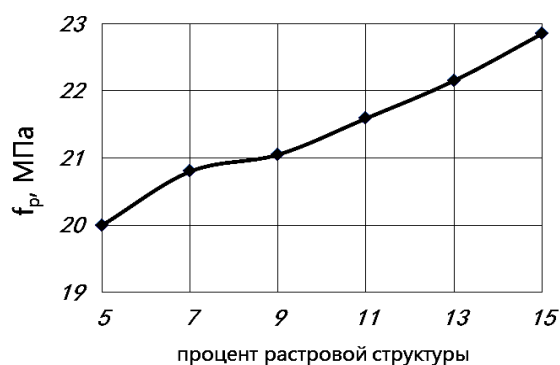
Таким образом, разработан аппарат для управляемой передачи энергии ультразвуковых колебаний в структуру полимерного материала флексографских печатных форм, который может быть использован для различных по твердости печатных форм, что расширяет его функциональные возможности. Реализуемый в установке процесс ультразвуковой модификации флексографских форм имеет низкую энергоемкость и является экологически чистым.

**Пятая глава** посвящена экспериментальным исследованиям прочностных характеристик полимерного материала водовывывных флексографских печатных форм марки Toyobo Cosmolight QS, обработанного ультразвуком на опытной установке со следующими параметрами: акустическая мощность – 3,5 Вт, частота колебаний – 40 кГц, усилие акустического контакта – 0,1 Н [7, 15, 16].

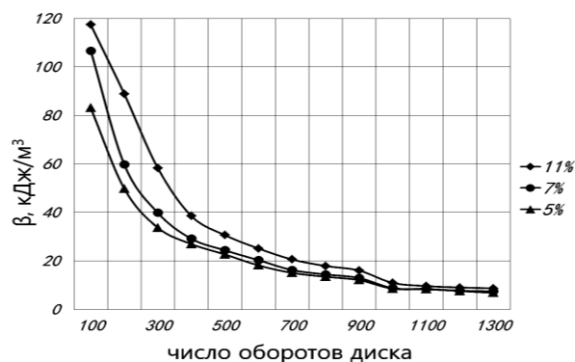
С целью определения эталонных значений физико-механических свойств полимерного материала печатной формы проведены исследования контрольной группы образцов. Установлено, что основу фотополимерной композиции флексографской формы Cosmolight QS составляет синтетический эластомер, подобный полиуретану, что подтверждается обнаружением в ИК-спектрах характерных интенсивных полос, указывающих на наличие уретановой группы, простых эфирных и сложноэфирных групп, амидных групп.

Выявлено, что уменьшение относительной площади растровых элементов на 10% снижает условную прочность формного образца при растяжении  $f_p$  в 1,2 раза (рисунок 5), что обуславливает проведение локального ультразвукового облучения печатной формы в высоких светах (до 15%), а не по всей ее поверхности.

Показано обоснование проведения ультразвуковой модификации печатной формы (рисунок 6), имеющей после основных этапов экспонирования, проводимых посредством УФ-излучения, сшивку фотополимерного материала не по всей толщине слоя, а до фиксированной глубины (большой скачок потери массы испытываемых образцов в 1,5 раза после 900 оборотов диска с абразивом), вследствие чего, нижние слои фотополимерной композиции на границе с подложкой могут иметь слабую сетчатую структуру.



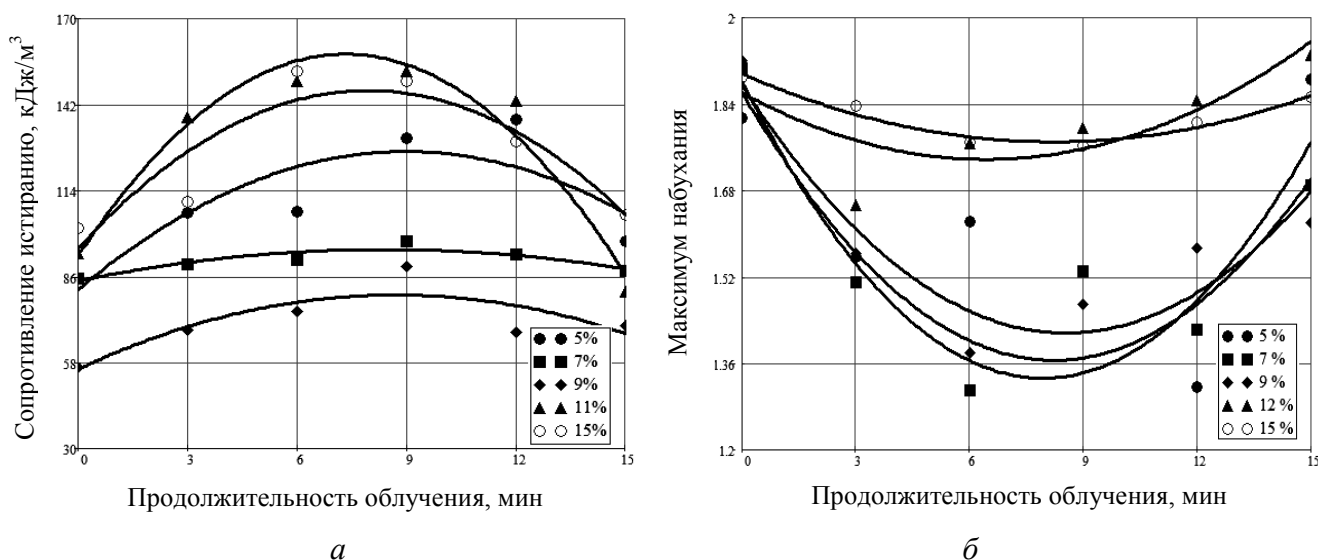
**Рисунок 5. – Зависимость условной прочности при растяжении от растровой структуры**



**Рисунок 6. – Зависимости сопротивления истиранию формных образцов различных растровых структур**

На основе статистического анализа полученных данных определены экспериментальные квадратичные зависимости сопротивления истиранию и степени набухания полимерного материала формных образцов от продолжительности облучения ультразвуком в течение 3, 6, 9, 11 и 15 мин (рисунок 7).

Из рисунка 7, а, видно, что устойчивость к истиранию модифицированного фотополимерного материала с увеличением продолжительности ультразвуковой обработки до 9 мин возрастает. Отсюда следует, что энергия ультразвуковых колебаний оказывает воздействие на непрореагировавшие функциональные группы сформированных цепей полиуретана и интенсифицирует процесс



**Рисунок 7. – Зависимость сопротивления истиранию (а) и степени набухания (б) формных образцов от времени облучения ультразвуком**

образования новых поперечных связей между существующими макромолекулами за счет взаимодействия реакционноспособных изоцианатных групп с производными, содержащими активный атом водорода. Это делает структуру фотополимерного материала более разветвленной и густой, а значит и более прочной, что подтверждается результатами исследования плотности поперечного шивания. Из рисунка 7, б, видно, что поглощение энергии ультразвуковых колебаний повышает степень структурирования фотополимерного материала печатной формы, увеличивая молекулярную массу и концентрацию сетки общей полимерной цепи, следовательно, значение максимума набухания становится меньше. Дальнейшее воздействие ультразвука (более 9 мин) на печатную форму приводит к снижению прочностных характеристик, вызванному деструкцией (разрушением) молекулярных связей как в основных, так и боковых цепях полимера в результате избыточного поглощения энергии ультразвуковых колебаний.

Установлена наилучшая продолжительность ультразвукового облучения цифровых водовывивных флексографских форм Toyobo Cosmolight QS толщиной 1,14 мм в течение 7–9 мин, которая позволяет повысить износостойкость фотополимерного материала на основе полиуретана в 1,5 раза и понизить степень набухания в 1,3 раза.

Проведены опытно-промышленные испытания водовывивной флексографской печатной формы на флексографской печатной машине Edale Beta 330 на РУП «Бобруйская укрупненная типография им. А. Т. Непогодина». Изготовление формы осуществлялось согласно предложенному способу с учетом наилучшей продолжительности ультразвукового облучения. Замер величины растрового элемента и оптической плотности на оттисках, полученных с обработанных и необра-

ботанных ультразвуком участков формы на разном метраже запечатываемого бумажного рулона, выполнен цифровым денситометром X-Rite iCPlate2.

Таким образом, результаты испытания показали, что печатные оттиски с участков формы, модифицированных ультразвуковым воздействием, характеризуются низким значением растискивания растровой точки и более точным воспроизведением цвета на оттиске.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Разработан способ изготовления цифровых флексографских фотополимерных печатных форм на основе ультразвуковой модификации (пат. ВУ 19448), обеспечивающий улучшение печатно-эксплуатационных свойств в 1,2–1,5 раза за счет дополнительного процесса структурирования полимерного материала печатных форм, и отличающийся тем, что ультразвуковое воздействие осуществляется отдельно по зонам, на которые разбивается каждая цветоделенная печатная форма, а ультразвуковой рабочий инструмент приводится в контакт с поверхностью каждой из зон с усилием, равным произведению среднего значения относительной площади растровых точек в этой зоне, выраженного в процентах, на максимально допустимую величину указанного усилия  $0,6 \text{ Н/мм}^2$  [2, 5, 9, 11, 17].

2. Разработана математическая модель процесса ультразвуковой модификации флексографских печатных форм, отражающая взаимосвязь управляемых параметров ультразвукового воздействия с характеристиками полимерного материала, позволяющая определить их требуемые значения с учетом необходимых энергетических пределов воздействия 266–348 кДж/моль для конкретного типа материала [3, 10].

3. Для реализации процесса ультразвуковой модификации флексографских фотополимерных печатных форм разработана и изготовлена ультразвуковая установка (опытная), осуществляющая локальную избирательную ультразвуковую обработку (полез. модель ВУ 10857), состоящая из двухполуволновой ультразвуковой колебательной системы и генератора модели ВНТ77. Изготовлен экспоненциальный концентратор из стали 45, выполненный зацело с рабочим инструментом и обеспечивающий эффективную передачу ультразвуковых колебаний в обрабатываемый материал. Спроектирован механизм регулируемого нагружения, выполняющий плоскопараллельное перемещение рабочей поверхности инструмента и самовыставление ее по поверхности облучаемой печатной формы, что, в свою очередь, обеспечивает полное акустическое соприкосновение указанных поверхностей [1, 4, 6, 8, 12–14, 18, 19].

4. Определены экспериментальные зависимости изменения эксплуатационных свойств полимерного материала флексографских печатных форм в процессе управляемого ультразвукового воздействия (с акустической мощностью 3,5 Вт, частотой колебаний 40 кГц, усилием акустического контакта 0,1 Н), которые обусловили упрочнение структуры исходного полимера на основе полиуретана, увеличение вследствие этого его износостойкости в 1,5 раза и снижение степени набухания в растворителе в 1,3 раза. Установлена эффективная продолжительность ультразвукового облучения полимерного материала, которая составила для водовымывных флексографских печатных форм Toyobo Cosmolight QS 7–9 мин [7, 15, 16].

### **Рекомендации к практическому использованию**

Предложенная технология получения цифровых флексографских фотополимерных печатных форм с применением локальной избирательной ультразвуковой модификации внедрена на Полоцком РУПП «Наследие Ф. Скорины». Ожидаемый годовой экономический эффект при планируемой годовой потребности во флексографских печатных формах составляет 3498 бел. руб.

Для проведения ультразвукового облучения каждую зону цветоделенной печатной формы рекомендуется выбирать таким образом, чтобы растровые структуры, находящиеся в ней, были близки по относительной площади растровой точки.

Разработанная технологическая установка ультразвукового облучения [18] может быть использована для различных по твердости фотополимерных печатных форм. При этом, для получения повышенных эксплуатационных свойств печатных форм следует обеспечить следующие характеристики установки: максимальную амплитуду колебаний 6–8 мкм, резонансную частоту 22 кГц, усилие прижатия рабочего инструмента 0–0,2 Н.

Результаты испытаний формных образцов, полученных на основе разработанного способа [17], свидетельствуют о возможности применения ультразвуковой модификации в формном производстве типографий, использующих флексографский способ печати.

Предложенный процесс ультразвуковой модификации имеет низкую энергоемкость, не оказывает вредных воздействий на здоровье обслуживающего персонала и является экологически чистым.



**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ****Статьи**

1. 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.

2. Грудо, С. К. Особенности ультразвуковой модернизации способа получения флексографских фотополимерных печатных форм / С. К. Грудо, С. А. Барташевич, Е. В. Русак // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 80–85.

3. Грудо, С. К. Математическое моделирование воздействия энергией УЗ-колебаний на дополнительную сшивку фотополимерных печатных форм / С. К. Грудо, С. А. Барташевич // Труды БГТУ. – 2014. – № 9 (173): Издательское дело и полиграфия. – С. 31–35.

4. Bartashevich, S. A. Development of experimental ultrasound device for modification of flexographic photopolymer printing plates / S. A. Bartashevich, S. K. Grudo, S. A. Khokhriakov // Поліграфія і видавнича справа (Printing and Publishing). – 2015. – № 1 (69). – P. 84–92.

**Материалы конференций**

5. Грудо, С. К. Повышение эксплуатационных характеристик фотополимерных печатных форм за счет изменения физико-механических свойств фотополимерного материала / С. К. Грудо, С. В. Медведев, С. А. Барташевич // Научные стремления – 2011 : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 14–18 ноября 2011 г. / Совет молодых ученых Национальной академии наук Беларуси ; редкол.: А. Н. Волченко [и др.]. – Минск : Белорусская наука, 2011. – Т. 1. – С. 636–639.

6. Грудо, С. К. Расчет колебательной системы ультразвуковой установки для модификации флексографских фотополимерных печатных форм / С. К. Грудо, С. А. Барташевич // Скориновские чтения 2015 : книгоиздание и книгораспространение в контексте кросскультурных коммуникаций XXI века : материалы I междунар. форума, Минск, 3–6 сентября 2015 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: Е. О. Черник [и др.]. – Минск, 2015. – С. 180–184.

7. Грудо, С. К. Определение качественного состава водовымывной флексоформы / С. К. Грудо // Скориновские чтения 2016 : книга как феномен культуры, искусства, технологии : материалы II Междунар. форума, Минск, 6–7 сентября 2016 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол. Е. О. Черник [и др.]. – Минск, 2016. – С. 184–188.

**Тезисы докладов**

8. Грудю, С. К. Особенности ультразвуковой модернизации флексографских фотополимерных печатных форм / С. К. Грудю, С. А. Барташевич // Издательское дело и полиграфия : 77 науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 4–9 февраля 2013 г. : тез. докл. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2013. – С. 11.

9. Грудю, С. К. Способ получения цифровой фотополимерной флексографской печатной формы / С. К. Грудю // Книгопечатание молодое : 13 междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Киев, 23–25 апреля 2013 г. : тез. докл. в 2 т. / НТУО «КПИ» ИПИ ИПК «Политехника»; редкол.: О. Величко [и др.]. – Киев, 2013. – Т. 1. – С. 5–6.

10. Грудю, С. К. Математическое моделирование воздействия энергией УЗ-колебаний на дополнительную сшивку фотополимерных печатных форм / С. К. Грудю, С. А. Барташевич // Издательское дело и полиграфия : 78 науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 3–13 февраля 2014 г. : тез. докл. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2014. – С. 25.

11. Грудю, С. К. Процесс УЗ-модификации флексографских фотополимерных печатных форм / С. К. Грудю, С. А. Барташевич // науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Львов, 4–8 февраля 2014 г. : тез. докл. / Укр. акад. печати ; редкол.: Б. В. Дурняк [и др.]. – Львов, 2014. – С. 69.

12. Грудю, С. К. Опытная ультразвуковая установка для модификации флексографских фотополимерных печатных форм / С. К. Грудю, С. А. Барташевич // Издательское дело и полиграфия : 79 науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 2–6 февраля 2015 г. : тез. докл. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2015. – С. 23.

13. Барташевич, С. А. Опытная ультразвуковая установка для модификации флексографских фотополимерных печатных форм / С. А. Барташевич, С. К. Грудю // науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Львов, 16–20 февраля 2015 г. : тез. докл. / Укр. акад. печати ; редкол.: Б. В. Дурняк [и др.]. – Львов, 2015. – С. 72.

14. Грудю, С. К. Опытный образец ультразвуковой установки для модификации флексографских фотополимерных печатных форм / С. К. Грудю // Издательское дело и полиграфия : 80 науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 1–12 февраля 2016 г. : тез. докл. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2016. – С. 24.

15. Грудю, С. К. Количественная оценка влияния ультразвуковой модификации на механические свойства флексографских фотополимерных печатных форм / С. К. Грудю, А. А. Молдованов // Издательское дело и полиграфия : 80 науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 1–12 февраля 2016 г. : тез. докл. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск, 2016. – С. 27.

16. Грудю, С. К. Микроструктурный анализ водовывивных флексографских фотополимерных печатных форм / С.К. Грудю // науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Львов, 10–14 февраля 2016 г. : тез. докл. / Укр. акад. печати ; редкол.: Б. В. Дурняк [и др.]. – Львов, 2016. – С. 12.

### **Патенты Республики Беларусь**

17. Способ изготовления цифровой фотополимерной флексографской печатной формы : пат. ВУ 19448 / С. А. Барташевич, С. К. Грудю, С. В. Медведев. – Оубл. 30.08.2015.

18. Устройство для ультразвуковой финишной обработки рабочих поверхностей флексографских печатных форм по зонам : полез. модель ВУ 10857 / С. А. Барташевич, С. К. Грудю, И. А. Лисицкий, С. А. Бутько. – Оубл. 30.12.2015.

### **Заявки на патент**

19. Устройство для ультразвуковой позонной финишной обработки рабочих поверхностей флексографских печатных форм : заявка ВУ а20140229 / С. А. Барташевич, С. К. Грудю, Е. В. Русак, Н. С. Подбильская. – Оубл. 10.07.2014.

**РЕЗЮМЕ**

Грудо Сергей Казимирович

**Повышение эксплуатационных свойств флексографских фотополимерных печатных форм путем локального избирательного ультразвукового воздействия**

**Ключевые слова:** флексографская печатная форма, фотополимерная композиция, ультразвуковая модификация, колебательная система, ультразвуковой генератор, сопротивление истиранию, продолжительность облучения

**Цель работы:** повышение печатно-эксплуатационных свойств цифровых флексографских фотополимерных печатных форм за счет проведения ультразвуковой модификации.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** методы усталостной выносливости по ГОСТ 261-79 (МРС-2), сопротивления истиранию при скольжении по ГОСТ 426-77 (МИ-2), равновесного набухания (S 105 DU); ИК-спектроскопический (Nexus E.S.P.), денситометрический (X-Rite iCPlate2). Образцы печатных форм изготовлены по стандартной методике на устройстве экспонирования Esko Cyrel Digital Imager Spark 2530.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработан способ изготовления цифровых флексографских фотополимерных печатных форм с применением ультразвуковой модификации и спроектирована ультразвуковая установка для ее реализации, содержащая разработанный механизм регулируемого нагружения рабочей поверхности инструмента. Выполнено математическое моделирование процесса ультразвуковой модификации, позволяющее с учетом необходимых энергетических пределов установить взаимосвязь управляемых параметров ультразвукового воздействия с характеристиками облучаемого полимерного материала. Определены зависимости изменения эксплуатационных свойств полимерного материала флексографских печатных форм под воздействием энергии ультразвуковых колебаний, обуславливающие упрочнение его структуры. Установлена эффективная продолжительность ультразвукового облучения для водовымывных флексографских печатных форм.

**Рекомендации по использованию:** полученные результаты рекомендуется использовать в формных процессах флексографского способа печати. Предложенная технология получения цифровых флексографских фотополимерных печатных форм с применением локальной избирательной ультразвуковой модификации принята к внедрению на Полоцком РУПП «Наследие Ф. Скорины» с ожидаемым годовым экономическим эффектом порядка 3498 бел. руб.

**Область применения:** флексографское производство полиграфических предприятий.

**РЭЗІЮМЭ**

Груда Сяргей Казіміравіч

**Павышэнне эксплуатацыйных уласцівасцяў флексаграфскіх фотапалімерных друкарскіх формаў шляхам лакальнага выбарчага ультрагукавога ўздзеяння**

**Ключавыя словы:** флексаграфская друкарская форма, фотапалімерная кампазіцыя, ультрагукавая мадыфікацыя, вагальная сістэма, ультрагукавы генератар, супраціўленне сціранню, працягласць апраменьвання

**Мэта працы:** павышэнне друкарска-эксплуатацыйных уласцівасцяў лічбавых флексаграфскіх фотапалімерных друкарскіх формаў за кошт правядзення ультрагукавой мадыфікацыі.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** метады стомленаснай трываласці па ДАСТ 261-79 (МРС-2), метады супраціўлення сціранню пры слізгаценні па ДАСТ 426-77 (МІ-2), метады раўнаважнага набухання (S 105 DU); ІЧ-спектраскапічны (Nexus E.S.P.), дэнсіметрычны (X-Rite iCPlate2). Узоры друкарскіх формаў выраблены па стандартнай метадыцы на ўстройстве экспанавання Esko Cyrel Digital Imager Spark 2530.

**Атрыманая вынікі і іх навізна.** Распрацаваны спосаб вырабу лічбавых флексаграфскіх фотапалімерных друкарскіх формаў з выкарыстаннем ультрагукавой мадыфікацыі і спраектавана ультрагукавая ўстаноўка для яе рэалізацыі, якая змяшчае распрацаваны механізм рэгуляванага нагружэння працоўнай паверхні інструменту. Выканана матэматычнае мадэляванне працэсу ультрагукавой мадыфікацыі, якое дазваляе з улікам неабходных энергетычных лімітаў усталяваць узаемасувязь кіраваных параметраў ультрагукавога ўплыву з характарыстыкамі апраменьнага палімернага матэрыялу. Вызначаны залежнасці змены эксплуатацыйных уласцівасцяў палімернага матэрыялу флексаграфскіх друкарскіх формаў пад уплывам энергіі ультрагукавых ваганняў, якія абумоўліваюць умацаванне яго структуры. Устаноўлена эфектыўная працягласць ультрагукавога апраменьвання для водавымыўных флексаграфскіх друкарскіх формаў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** атрыманая вынікі рэкамендуецца выкарыстоўваць у формных працэсах флексаграфскага спосабу друку. Прапанаваная тэхналогія атрымання лічбавых флексаграфскіх фотапалімерных друкарскіх формаў з ужываннем лакальнай выбарчай ультрагукавой мадыфікацыі прынята да ўкаранення на Полацкім РУПП «Спадчына Ф. Скарыны» з чаканым гадавым эканамічным эфектам парадку 3498 бел. руб.

**Вобласць выкарыстання:** флексаграфская вытворчасць паліграфічных прадпрыемстваў.

**SUMMARY**

Sergey Grudo

**Improvement of Performance Properties of Flexographic Photopolymeric Printing Plates Using the Local Electrol Ultrasonic Influence**

**Key words:** flexographic printing plate, photopolymer composition, ultrasonic modification, oscillatory system, ultrasonic generator, resistance to abrasion, duration of exposure

**The aim of study:** improvement of printing and performance properties of flexographic photopolymeric printing plates by conducting ultrasonic modification.

**Research methods and used equipment:** methods of fatigue endurance according to GOST 261-79 (MRS-2), of abrasion resistance at sliding according to GOST 426-77 (MI-2), of equilibrium swelling (S 105 DU), FTIR-method (Nexus E.S.P.), densitometric analysis (X-Rite iCPlate2). Samples of printing forms produced according to standard method on the device of exposure Esko Cyrel Digital Imager Spark 2530.

**The scientific novelty of the obtained results.** A method of receiving digital flexographic photopolymer printing plates using ultrasonic modification is developed and an ultrasonic installation for its implementation is designed, that contains the mechanism of controlled loading of the working surface of the tool. Mathematical modeling of the process of ultrasonic modification is made, which allows establishing the relationship of controlled parameters of ultrasonic influence with the characteristics of the irradiated polymeric material taking into account the required energy bounds. The dependences of variations of performance properties of the polymer material of flexographic printing forms under the influence of the energy of ultrasonic vibrations are determined, which cause hardening of its structure. The effective duration of ultrasonic exposure for water-washable flexographic plates is defined.

**Usage recommendations:** the obtained results are recommended for use in production processes of flexographic plate. The proposed technology of receiving digital flexographic photopolymeric printing plates using the local electrol ultrasonic modification is introduced at Polotsk RUME «F. Skorina's Heritage» with the expected annual economic effect of 3498 BYN.

**Field of application:** flexographic production of the polygraphic enterprises.



Научное издание

**Грудо Сергей Казимирович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ФЛЕКСОГРАФСКИХ  
ФОТОПОЛИМЕРНЫХ ПЕЧАТНЫХ ФОРМ ПУТЕМ ЛОКАЛЬНОГО  
ИЗБИРАТЕЛЬНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.02.13 – машины, агрегаты и процессы

(полиграфическое производство)

Ответственный за выпуск С. К. Грудо

Подписано в печать 27.01.2017. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 60 экз. Заказ .

Издательство и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,

изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014.

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.