



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ, ФИЛИАЛ ПЛОВДИВ

Факултет по машиностроене и уредостроене

Катедра „Механика“

маг. инж. Владимир Ангелов Ангелов

Изследване влиянието на натиска в офсетовия печатен апарат и неговите ефекти върху качеството на печата

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1. „Машинно инженерство“

Научна специалност: „Приложна механика“

Научни ръководители: доц. д-р инж. Искрен Спиридонов,

доц. д-р инж. Златко Златанов

ПЛОВДИВ, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширения катедрен съвет на катедра „Механика“ към Факултет по машиностроене и уредостроене на ТУ-София, филиал Пловдив на редовно заседание, проведено на 15.12.2025г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 16.04.2026 г. от 13:00 часа в зала 3206 (трети корпус) на ТУ-София, филиал Пловдив на открито заседание на научното жури, определено със заповед №:ОЖ-5.1-01 от 12.01.2026 г на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р инж. Райчо Петров Райчев – председател
2. доц. д-р Калина Василева Камарска – научен секретар
3. проф. д-р инж. Годор Георгиев Джурков – член
4. проф. д-р инж. Георги Йорданов Вуков – член
5. доц. д-р инж. Албена Георгиева Дуракова – член

Рецензенти:

1. доц. д-р инж. Райчо Петров Райчев
2. проф. д-р инж. Георги Йорданов Вуков

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по машиностроене и уредостроене на ТУ-София, филиал Пловдив, корпус IV, кабинет № 4240.

Дисертантът е докторант в свободна форма към катедра „Механика“ на Факултет по машиностроене и уредостроене на ТУ-София, филиал Пловдив. Изследванията по дисертационната работа са направени от автора.

Автор: маг. инж. Владимир Ангелов Ангелов

Заглавие: Изследване влиянието на натиска в офсетовия печатен апарат и неговите ефекти върху качеството на печата

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Увод

Съвременните офсетови печатни форми се отличават с висока тиражна устойчивост, като пластични деформации в слоя на печатните елементи се проявяват основно при много големи тиражи. Поради това научният и практическият интерес се насочва към измененията в качеството на печат, обусловени от еластичните деформации на контактните повърхности под действие на натиск в печатния апарат. Това налага прилагането на изследователски подход за изясняване влиянието на тези деформации върху основните качествени параметри на отпечатъка. Офсетовият печат представлява сложна система от взаимодействащи елементи – мастилен и воден апарат, печатна форма и гумено офсетово платно, участващи в множество контактни зони със специфични натоварвания, определяни от техните физико-механични характеристики. В резултат възникват еластични деформации, които оказват съществено влияние върху стабилността и възпроизводимостта на качеството на печат. Въпреки множеството изследвания в областта на офсетовата технология, влиянието на натиска между печатната форма и гуменото офсетово платно, разгледано през призмата на еластичните деформации в слоя – носител на изображението, остава недостатъчно изяснено. Настоящият дисертационен труд е насочен към изследване на връзката между контактния натиск, възникващите еластични деформации и отражението им върху качеството на офсетовия печат, което обуславя актуалността и научната значимост на разработката.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

II-1 Анализ на литературния обзор

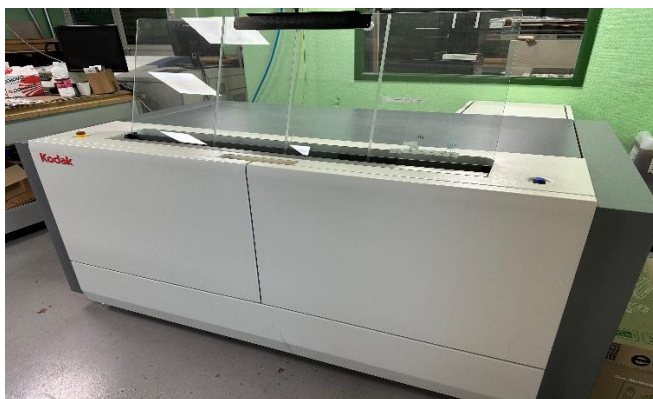
Анализът на специализираната научна литература обхваща изследвания върху контактните взаимодействия между цилиндрични тела, влиянието на различни нива на натиск върху качеството на печат и методите за контрол на качеството при подготовката на печатните форми. Литературният обзор служи като основа за формулиране на научно обоснована и целенасочена изследователска хипотеза, върху която е изградена настоящата разработка. Основен извод от анализа е, че еластичните деформации на полимерния слой на печатната форма представляват критичен фактор за качеството на отпечатъка, като оказват пряко влияние върху dot-gain, остротата и формата на растерните точки, както и върху производните качествени параметри. В литературата са идентифицирани два основни механизма на деформация: латерално разширение на растерната точка, водещо до увеличаване на контактната площ, и barrelling ефект, проявяващ се като странично деформиране на ръбовете на точката, особено при по-меки полимерни материали и в светлите тонове. Анализът показва, че степента на dot-gain зависи от съвкупното влияние на механичните свойства и дебелината на полимерния слой, приложеното контактно налягане и геометрията на растерните точки. Числените модели и FEM симулациите позволяват прогнозиране на локалните деформации, като експерименталните методи потвърждават валидността на резултатите. Обобщено, литературният обзор подчертава ключовата роля на контрола върху механичните свойства на полимерния слой и параметрите на натиск в нипзоната за осигуряване на стабилно качество на офсетовия печат, като същевременно разкрива недостиг на целенасочени изследвания върху еластичните деформации на полимерните слоеве на дигитални термални офсетови печатни форми в реални производствени условия.

II-2. ОБЕКТ, ПРЕДМЕТ, ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

- 1. Обект на изследването:** Полимерен слой на печатна форма в процеса на офсетов печат.
- 2. Предмет на изследването:** Изследване на еластичните деформации на полимерния слой под постоянно зададен печатен натиск и тяхното влияние върху качеството на отпечатъка.
- 3. Цел на изследването:** Намаляване на негативния ефект на деформациите в полимерния слой на печатната форма върху качеството на печат.
- 4. Задачи на изследването:**
 - 4.1 Изследване на въздействието на процесните параметри върху качеството на печат;
 - 4.2 Експериментално и числено изследване на еластичните деформации в полимерния слой на печатната форма;
 - 4.1.1 Изследване на елементарен състав на полимерния слой, определяне на физико-механични характеристики (модул на еластичност и коефициент на Поасон) на печатна форма и гумено офсетово платно;
 - 4.1.2 Симуляционен модел на физико-механичните процеси при контакт на печатна форма с гумено офсетово платно;
 - 4.1.3 Провеждане на физически експеримент за оценка на практическата приложимост на резултатите;
 - 4.1.4 Верифициране на резултатите – резултати от симулации и експеримент;
 - 4.1.5 Валидиране на модела и прилагането му в работни условия;
 - 4.1.6 Определяне и анализ на процентното влияние на еластичните деформации в полимерния слой върху нарастването на тоналната стойност.

II-3 Материали, оборудване и контролно-измервателни уреди

В експерименталните изследвания е използвана дигитална термална офсетова печатна форма Kodak Electra XD, широко прилагана в индустриалната практика и предназначена за листови и ролни офсетови печатни машини, избрана поради доказаната си стабилност и утвърдени експлоатационни характеристики. Експонирането на формите е извършено с термален експонатор Kodak TRENDSETTER 800 III QUANTUM – полуавтоматична система за експонация на дигитални печатни форми за конвенционален и безвлажнителен офсетов печат. Растеризираният образ е формиран при лазерна енергия 120 mJ/cm^2 (мощност 16,9 W) и скорост на въртене на експониращия барабан 370 грт, в съответствие със спецификацията на производителя. Прилагането на стандартизирани материали и оборудване с ясно дефинирани технологични параметри осигурява възпроизводимост на резултатите и създава предпоставки за коректен анализ на еластичните деформации на полимерния слой и влиянието им върху качеството на офсетовия печат.



Фиг. 1 Експонатор Kodak TRENDSETTER 800 III

Фиг. 2 Проявителна машина Kodak Polychrome

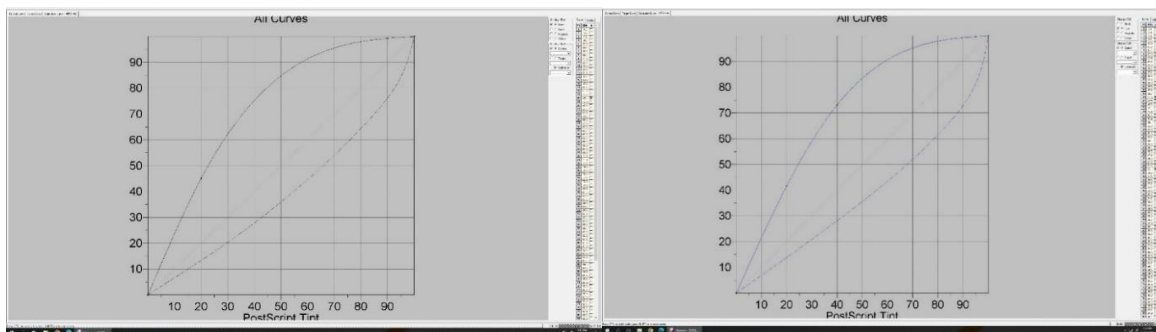
Процесът на проявяване на експонираните печатни форми е реализиран с проявителен разтвор Kodak 300 Thermal Plate Developer, съдържащ като основни активни компоненти натриев метасиликат и алкил диметил бетаин. Проявяването е извършено в автоматична проявителна машина Kodak Polychrome Mercury 850 при температура на разтвора 24 °С и скорост на движение на пластината 900 mm/min. Технологичният процес включва същинско проявяване, комбинирано с механично въздействие за осигуряване на равномерно и пълно проявяване на полимерния слой, последвано от измиване с омекотена вода с твърдост 1–20 °dH. В заключителния етап е нанесен защитен слой от емулсия на гума-арабика, последван от сушене, перфориране и обработка за монтаж на формата във формения цилиндър. Прилагането на стандартизирана технология и ясно дефинирани процесни параметри гарантира стабилност на характеристиките на полимерния слой и минимизира влиянието на технологичните отклонения върху резултатите от изследването на еластичните деформации и качеството на офсетовия печат. За целта на финалния етап в предпечатните процеси се използват контролно-измервателни уреди, специализирани в измерване на качество на печатни форми.



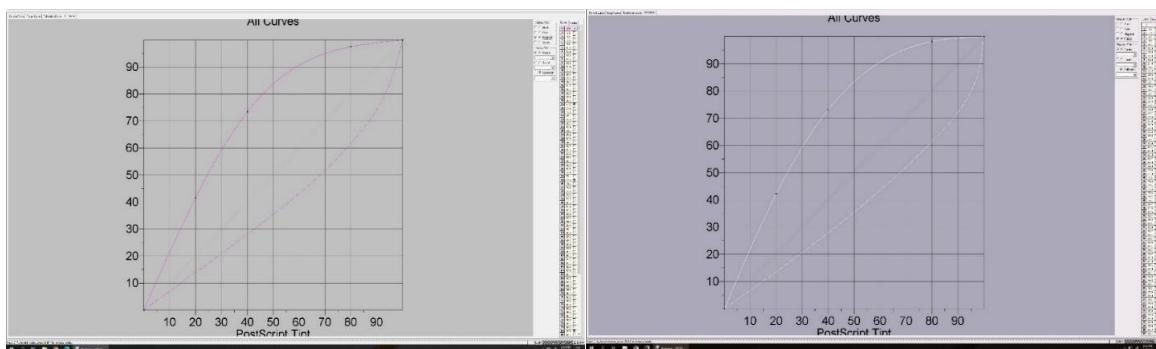
Фиг. 3 Уред за измерване на печатни форми-litho plate meter IC plate 2 gretagmacbeth

II-4 Методика на измерванията и анализ на качествените параметри

Измерванията на основните параметри на печатните форми за четирите процесни цвята са проведени непосредствено след експонацията и преди началото на печатния процес с цел определяне на изходното им състояние. Същите параметри са измерени повторно след отпечатване на тиража, което позволява сравнителен анализ на промените в печатната форма под въздействието на офсетовия печатен процес. Отпечатаният тираж е 200 хил. екземпляра и попада в границите на номиналната тиражна устойчивост, декларирана от производителя, което осигурява изследване на еластичните деформации при отсъствие на значими пластични изменения в слоя – носител на изображението. В рамките на предварителния анализ са измерени следните качествени параметри: възпроизведена тонална стойност в избрани полутонови полета (80 %, 60 %, 40 % и 20 % TV), геометрични характеристики на растерната точка при амплитудна модулация (AM), както и линиятура на растера. Корекционните стойности, въведени в предходни изследвания с оглед влиянието на използваните субстрати, са запазени като стандартно приложени, което осигурява съпоставимост и надеждност на резултатите.

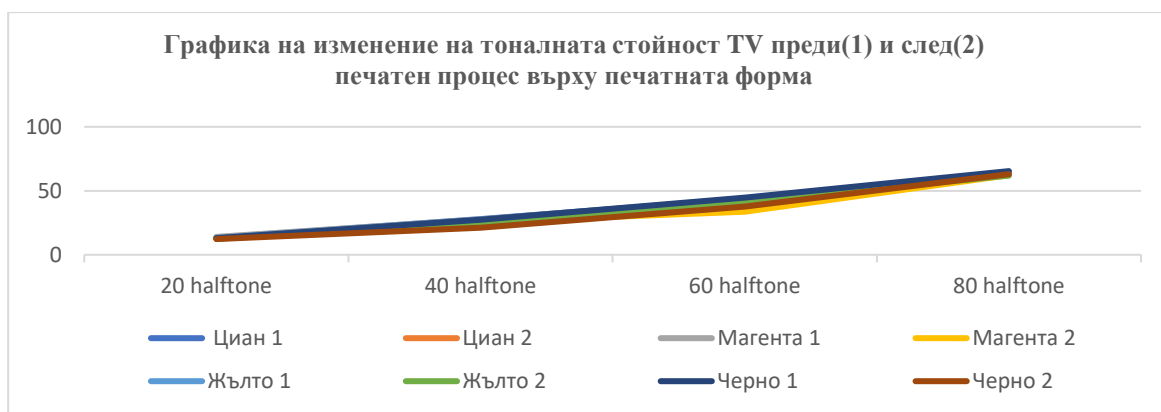


Фиг. 4 Компенсационна крива (TRC) за а - черно, б – циан



Фиг. 5 Компенсационна крива (TRC) за а - магента, б – жълто

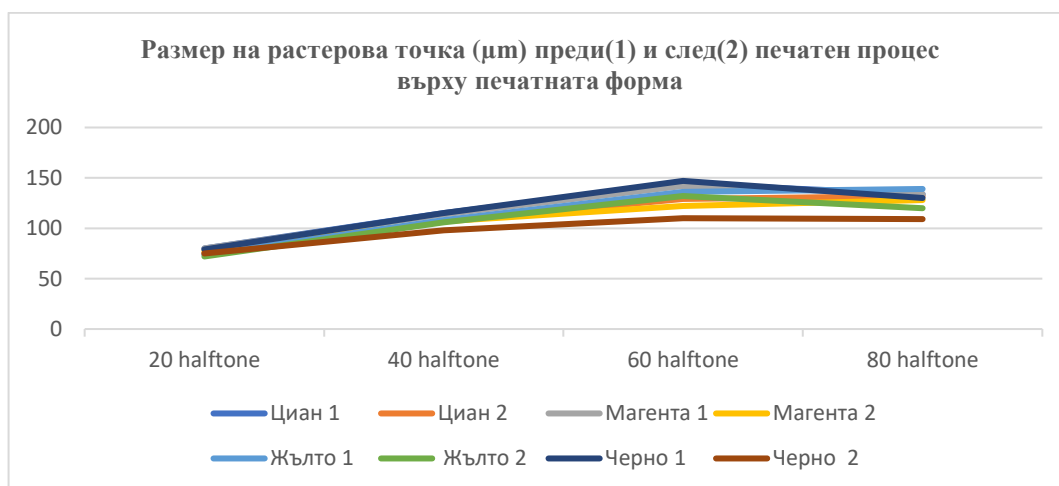
Анализът на получените тонално-възпроизвеждащи криви за процесните цветове показва отчетливи различия при сравнение на локалните области на тоналната стойност. Установено е, че зададената при изграждането на корекционните криви компенсация не се прилага с еднаква интензивност в различните полутонови полета и не отчита абсолютната стойност на настъпилите деформации на растерната точка, какъвто подход често се използва в практиката. Наблюдаваните различия могат да бъдат обяснени с характера на нарастване на растеровия елемент, описван чрез нелинейна, приблизително параболична зависимост. Това води до различна чувствителност на полутоновите зони спрямо приложените корекции и до ограничена ефективност на универсалните компенсационни криви. Получените резултати поставят под съмнение ефективността на стандартния подход, основан на обобщени стойности, и подчертават необходимостта от по-прецизен метод за компенсация, отчитащ реалните еластични деформации на полимерния слой и влиянието им върху локалните тонални характеристики и крайното качество на офсетовия печат.



Фиг. 6 Графика на изменение на тоналната стойност TV [%] преди(1) и след(2) печатен процес, измерени върху печатната форма

II-4.1 Анализ и оценка на ефективността на компенсационните криви

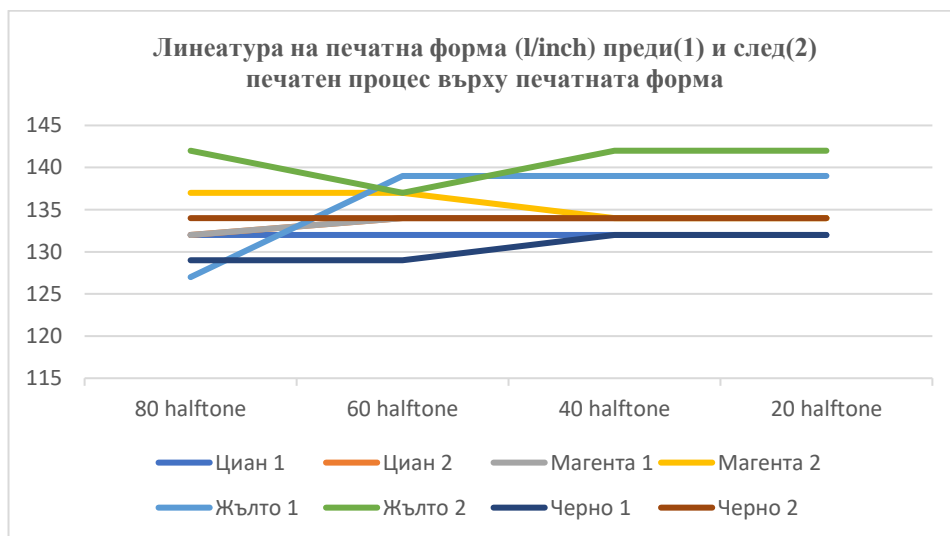
Анализът на ефективността на приложените компенсационни криви показва, че използваният тип крива представлява адекватен механизъм за контрол и частично минимизиране на дефектите, породени от деформациите на растеровите елементи. Потвърждава се запазването на принципа на параболоидно разпределение при нарастването на растера, в съответствие с теоретичните модели и експерименталните зависимости. Установено е, че в зоната с пиково нарастване на растера – между 40 % и 80 % TV, с максимум около 60 % TV – компенсационният механизъм демонстрира най-висока ефективност, като редуцията на възпроизведените тонални стойности достига 15–17 % TV. Това обосновава необходимостта от прилагане на корекционни криви още на етап подготовка на печатната форма. Съпоставката на тоналните стойности преди и след печатния процес показва наличие на трайни изменения, част от които надхвърлят допустимите отклонения, определени в приложимите стандарти. Анализът потвърждава, че оценката на ефективността на компенсационните криви може да бъде извършена единствено чрез измервания върху отпечатъка, тъй като измерванията върху печатната форма не оказват еднозначно влияние върху целия тонален диапазон. Получените резултати показват, че загубите на тонална стойност след печат варират в широки граници, като най-значими са измененията в средните и светлите полутонови области. Анализът по процесни цветове разкрива съществени различия в поведението на СМΥК компонентите, като най-големи отклонения се наблюдават при магента и черно, обусловени от интензивността на цветното участие и ролята на черното при GCR-базирани композиции. В обобщение може да се заключи, че измерените изменения на тоналната стойност съответстват на теоретичните предпоставки за деформационно поведение на растеровите елементи, но не са достатъчни за цялостна диагностика и оптимизация на процеса. Данните от измерванията върху печатната форма осигуряват кореспонденция с възпроизведеното качество, но е необходимо по-прецизно изясняване на връзката им с реалните условия на печатния тираж с цел минимизиране на отклоненията извън допустимите граници.



Фиг. 7 Графика на изменение на размера на растеровата точка (µm) преди(1) и след(2) печатен процес, измерени върху печатната форма

II-4.2 Анализ на измененията в размера на растеровия елемент

Анализът на измерванията на размера на растеровия елемент потвърждава очакваната връзка между геометрията на точката и формираната тонална стойност. Намаляването на тоналната стойност в полутоновите полета е пряко свързано със загуба на част от геометрията на растеровите точки, като плътността на полутоновото поле се определя от сумарната площ на растеровите елементи. Теорията за изграждане по площ при амплитудна модулация показва еднопосочна корелация между размера на растера и тоналната стойност в целия диапазон на градацията, но процентното съответствие не може да се прилага универсално поради нелинейния характер на процесите и локалните различия. Графичният анализ показва параболоидно изменение на размера на растеровия елемент с максимум в диапазона 40–80 % полутон. Кривите след експонация отразяват високо качество на процеса и позволяват детайлен контрол върху растеровите елементи. Съпоставката с тонално-възпроизвеждащите криви потвърждава коректна репродукция на полутоновите полета, особено над 60 % полутон. Най-изразени пикове се наблюдават при черното и циана, а при магентата и жълтото пиковете са в същия диапазон, но с по-ниска амплитуда. След печат амплитудата на параболоидната зависимост намалява и измененията на размера на растеровите елементи се изглаждат. Най-съществени изменения се наблюдават при черното и жълтото, докато цианът и магентата демонстрират равномерно намаляване в диапазона 40–80 % полутон. В обобщение, измерванията на размера на растеровите елементи и тоналните стойности представляват надежден критерий за оценка на качеството на експонацията и контрола на печатния процес, а симетрията на графичните профили за четирите процесни цвята потвърждава високо качество на печатната форма.



Фиг. 8 Линеатура на печатна форма (l/inch) преди(1) и след(2) печатен процес

II-4.3 Анализ на измененията в линеатурата на растеровите елементи

Измерената линеатура показва стойности, удовлетворяващи изискванията за качество и съответстващи на типа модулация и геометрията на растеровите точки. Графичният анализ с индекс 1 демонстрира изменения, съответстващи на разпределението на растеровите елементи в единица площ, като еднакви стойности на линеатурата могат да съвпадат с различни размери на точката в близък диапазон. Съпоставката на графиките след експонация/проявяване и след печат показва, че измененията се проявяват предимно при черния и жълтия цвят, частично при магентата, без да променят първоначално зададената линеатура, а отразяват въздействието на печатния процес върху растеровите елементи. По-

високите стойности на линиатура, формирани от по-малки растерови елементи, сигнализируют за потенциално влошаване на качеството на печатната форма. В обобщение:

- Линеатурата отразява качеството на експонация и зависи от типа модулация и размера на растеровите елементи;
- Връзката между линиатура, размер на растера и тонална стойност изисква цялостен анализ за оценка на качеството;
- Измененията след печат са резултат от въздействието върху растеровите елементи, а не от растеризацията;
- По-високите стойности, постигнати чрез намалени растерови елементи, сигнализируют за възможно влошаване на качеството;
- Необходим е контрол на физико-механичните процеси на контакт за стабилизиране на тоналната стойност и размера на растеровите елементи и постигане на високо качество на продукцията.

II-5 Материали, опитна установка, процесни параметри и контрол на качеството

Хартия: Като основен елемент, хартията оказва значително влияние върху качеството и себестойността на печатния продукт, определяйки минимум 60 % от общата стойност. В настоящото изследване е използвана подобрена вестникарска хартия INP с плътност 45 g/m².

Мастила: За печат са използвани heat set мастила Flint Group PremoKing 4000, подходящи за ролен офсетов печат с горещо сушене чрез газова сушилна инсталация.

Опитна установка: Печатният процес е реализиран на heat set web offset машина GOSS M 600, ролна офсетова с конструкция по модел Harris M 600 на Heidelberg. Машината осигурява непрекъснато движение на хартиеното платно, контрол на количеството хартия, автоматично залепване и компенсация на опъна, печат лице и гръб (4+4) чрез апарат „гума срещу гума“, газова сушилна с метан, секция за силикон, транспортни пътища, сгъвачен апарат, ротационни ножове и стекер за комплектовка.

Контрол и автоматизация: Машината е оборудвана с автоматизирани системи за управление и контрол на качеството, включително auto plate, денситометричен контрол с корекция на мастилен профил, автоматичен пасер с тристранни корекции и контрол на хартиения поток, осигурявайки стабилност и валидност на експерименталните изследвания.



Фиг. 9 Ролна илюстрационна машина (HSWO) GOSS M600

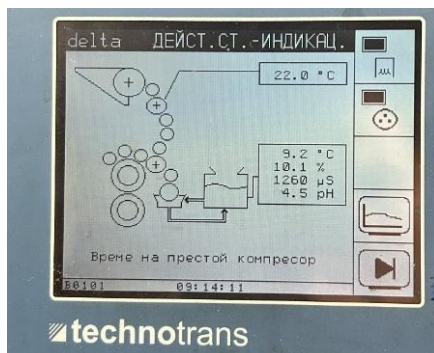
Процесни параметри и контрол на печатния процес

В производствения процес, освен използваните материали, ключова роля играят технологични параметри, определящи интензивността на физико-химичните въздействия върху печатната форма и мастилото и влияещи върху качеството на цветовата репродукция. Работната скорост на машината в настоящето изследване е 25 000 RPH. Основните параметри на овлажняващия разтвор и мастилената система са:

- Температура на мастилото: 22–24 °C (под препоръчания диапазон 27–30 °C) за контрол на

реологичните свойства и намаляване на емулгирането;

- Температура на овлажняващия разтвор: 9,2 °C за ефективност при високи скорости;
- Съдържание на изопропилов алкохол (IPA): 10,1 % без добавки;
- рН: 4,5, леко киселинен;
- Електропроводимост: 1260 μ S, осигуряваща пълноценна функционалност, включително при груба повърхност и склонност към прашене. Контролът и поддържането на тези параметри е ключов за стабилността на процеса, високо качество на цветовете репродукция и минимизиране на отклоненията на тоналната стойност и размера на растеровите елементи.



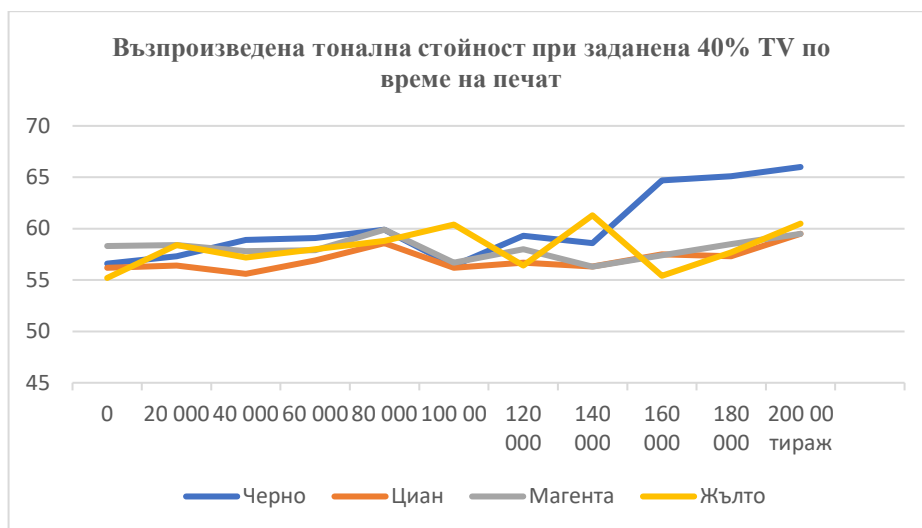
Фиг. 10 Параметри на система Technotrans – овлажняващ разтвор, мастилна система

II-6 Контролно-измервателни уреди и контрол на качеството

Измерванията на наблюдаваните параметри са проведени при условия, гарантиращи обективност и възпроизводимост на резултатите. Контролът е извършен с уред eXact Advanced (Spectro for Ink, Print & Packaging, X-Rite), осигуряващ необходимата точност и надеждност за високоточни печатни процеси, използвани в настоящото изследване.



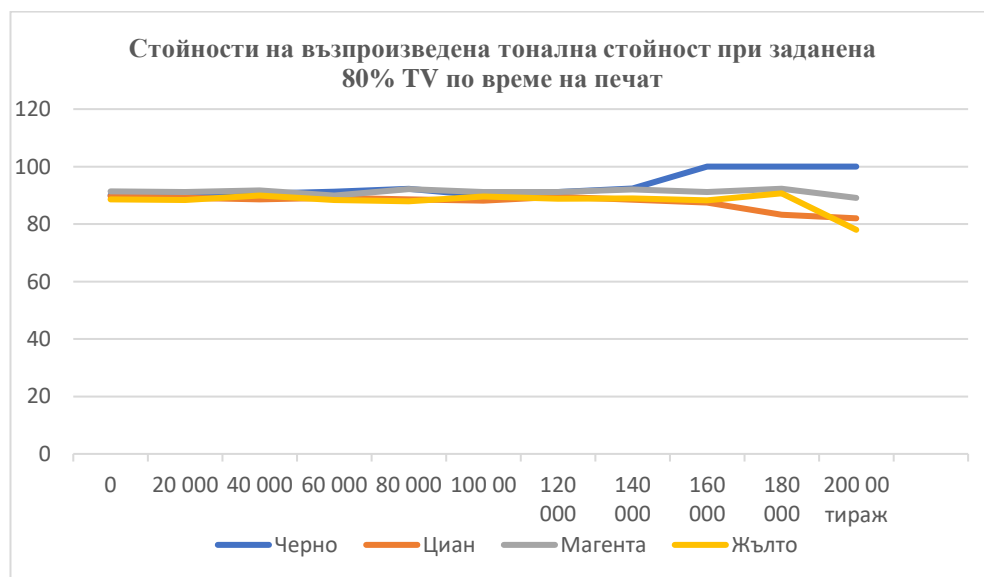
Фиг.11 Спектрофотометър eXact Advanced (Spectro for Ink, Print & Packaging) на X-rite



Фиг. 12 Графика на изменение на възпроизведена тонална стойност при заданена 40% TV по време на печат

II-6.1 Анализ на измененията на тоналната стойност

На фиг. 12 е илюстрирано изменението на тоналната стойност при 40 % полутон през целия тираж. В първите точки се наблюдават отклонения над 15 % спрямо зададената стойност, което представлява висок риск от загуба на тонална стойност при ниските полутонови нива. Въпреки приложената компенсация върху печатната форма, резултатът не удовлетворява изискванията за качество. Причините за значителното отклонение се дължат на комбинация от фактори, включително характеристики на субстрата, количество и реология на мастилото, натиск в контактната зона, еластични деформации и други процесни параметри. Теоретичният анализ потвърждава, че по-ниските тонални стойности са по-чувствителни към физични въздействия, както се вижда при съпоставяне на фиг. 12 и фиг. 13.



Фиг. 13 Графика на изменение на възпроизведена тонална стойност при зададена 80% TV по време на печат

При наблюдение на графиката за 80 % тонална стойност не се установяват съществени отклонения в началото на тиража. Стойностите нарастват равномерно до около 140 хил. удара, превишавайки зададената стойност с приблизително 10 %, което е допустимо според визуалното възприятие и стандартите за качество. Равномерно разпределение на измененията се наблюдава с изключение на интервала 150–200 хил. удара, където черното

нараства до плътно поле, магентата почти запазва първоначалните параметри, а цианът и жълтото намаляват под 80 % TV. Това индикира частична загуба на растера, влияеща върху качеството на отпечатъка. Анализът показва, че динамиката при високи полутонове е относително стабилна, но изисква контрол и компенсаторни механизми за поддържане на оптимално качество.

II-6.2 Валидиране на резултатите от измерване на възпроизведена тонална стойност

Измерените стойности на възпроизведените тонални площи при 40 % и 80 % растер, регистрирани в началото на тиража, показват съответствие с референтните данни на стандарта ISO 12647-3:2013 за печатни условия тип PC3 (heat-set web offset върху подобрена вестникарска хартия). Анализът показва, че тоналните стойности за всички процесни цветове (циан, магента, жълто и черно) са в рамките на допустимите производствени толеранси: ± 4 % за 40 % и ± 3 % за 80 % тонална стойност. Тези резултати потвърждават коректното възпроизвеждане на полутоновите полета и надеждността на контролните измервания при оценка качеството на тиража.

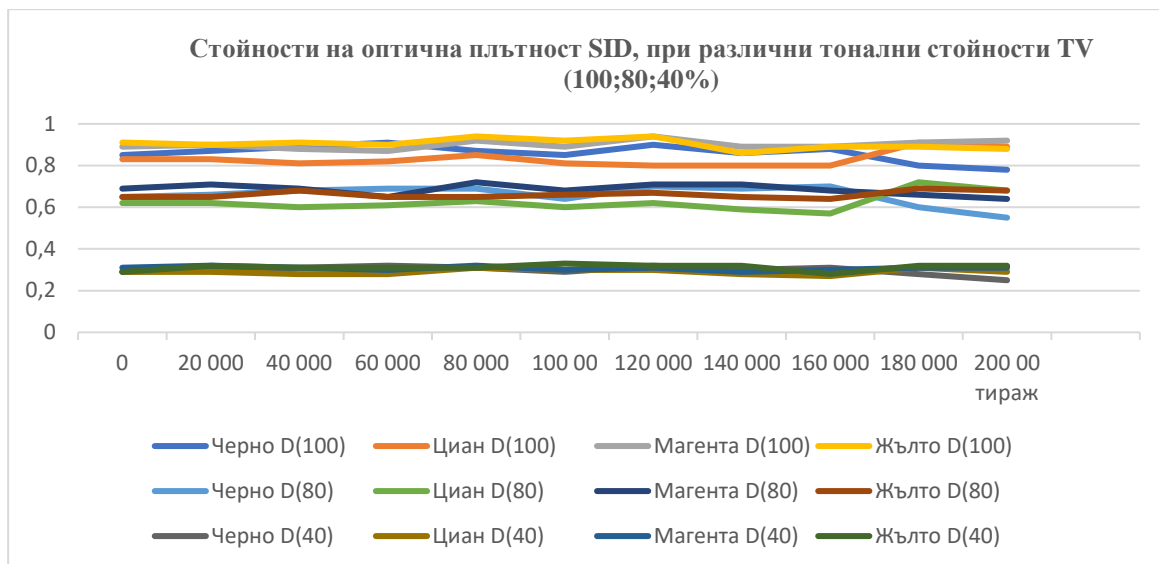
Табл. 1 Референтни данни по стандарт ISO 12647-2:2013

Контролен тон (вход)	Целева тонална стойност (измерена)	TVI (Dot Gain)	Допустимо отклонение
40 %	≈ 56 %	≈ 16 %	± 4 %
80 %	≈ 90 %	≈ 10 %	± 3 %

Табл. 2 Валидирани данни от измерване според стандарт ISO 12647-2:2013

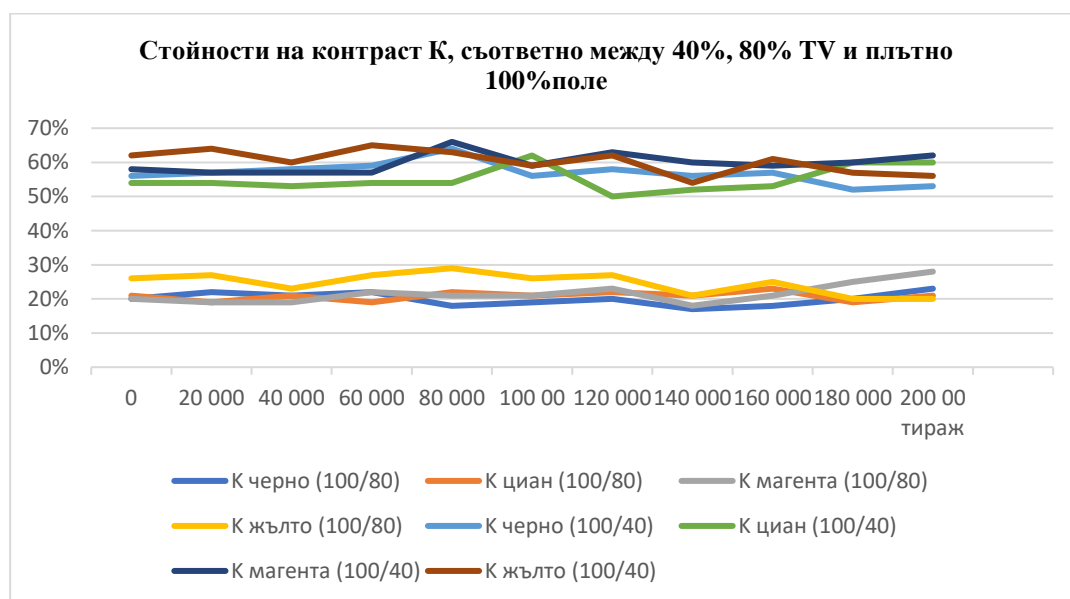
Цвят	40% измерено	TVI	80% измерено	TVI	Съответствие
К	56,6%	16,6%	90,0%	10,0%	съответства
С	56,2%	16,2%	89,7%	9,7%	съответства
М	58,3%	18,3%	91,4%	11,4%	съответства
У	55,2%	15,2%	88,6%	8,6%	съответства
Mid-tone spread (CMY, 40 %) = 18.3 – 15.2 = 3.1 % → под лимита 5 %.					
Mid-tone spread (CMY, 80 %) = 11.4 – 8.6 = 2.8 % → под лимита 3–5 %.					

Валидирането на измерените данни анализира резултатите в контекста на наблюденията, представени на фиг. 12 и 13. Въпреки че стойностите попадат в допустимите отклонения по стандарт ISO 12647-3:2013 и могат да се считат за коректни, те разкриват противоречия при оценката на ефективността на приложените компенсационни криви. Редуцираната тонална стойност върху печатната форма вследствие на корекционните криви води до формиране на амплитуда на отклонение, проявяваща се чрез повишени стойности на TVI (Tone Value Increase). Това показва, че макар данните да са валидни, ефективността на корекционните механизми не е пълна и част от локалните деформации на растеровите елементи остават неизбежни. Следователно валидирането потвърждава реалистичността на резултатите, но не елиминира необходимостта от детайлно изследване на деформациите и влиянието им върху качеството на отпечатъка.



Фиг. 14 Графика със стойности на оптическа плътност Density, при различни тонални плътности TV (100;80;40%)

Данните на фиг. 14 показват, че отчетените оптически плътности на плътни и полутонови полета (80% и 40%) се намират предимно в диапазона на средните стойности за съответните тонални нива. Тази тенденция се дължи на увеличената тонална стойност (TVI), при която мастилото се разпределя върху по-голяма площ, което води до намаляване на физическата плътност на мастиления филм и по-ниски оптически плътности. Анализът по цветове показва, че всички стойности са в рамките на стандартно нормираните изисквания, въпреки че плътните полета демонстрират по-висока нестабилност спрямо полутоновете. По-ниските тонални стойности (напр. 40%) осигуряват по-малки отклонения и по-стабилни оптически плътности, улеснявайки прецизното цветово възпроизвеждане. В хода на тиража не се наблюдават значителни колебания, с изключение на около 100 хил. удара, когато отклоненията са компенсирани чрез зонално намастиляване, а в края на тиража спадът на плътността изисква смяна на печатните форми. Обобщено, всички измерени оптически плътности остават под стандартно нормираните стойности, което подчертава необходимостта от прецизен контрол на процесните параметри и мастилени профили.

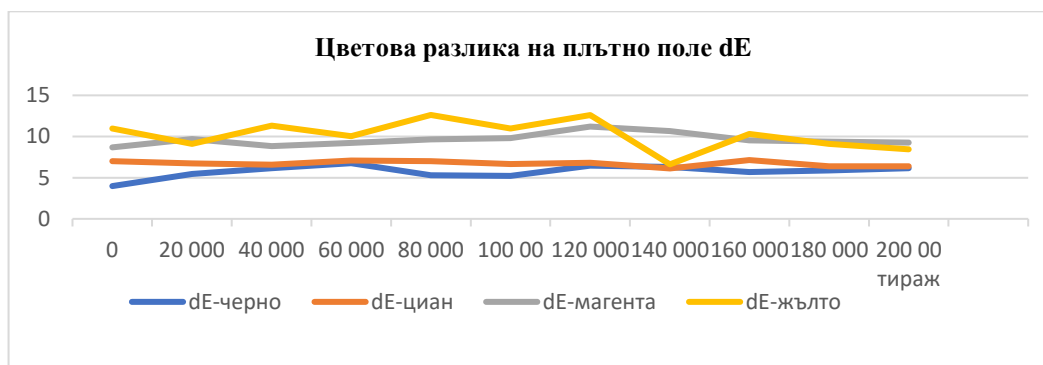


Фиг. 15 Графика със стойности на контраст K, съответно между TVI 40, 80% и плътно поле

На фиг. 15 са представени стойностите на контраста, изчислен като съотношение между плътно и съответно полутоново поле (80% и 40%). Колебанията варират около 15% за 80% и около 10% за 40% полутонон, като основният акцент следва да бъде върху абсолютните измерени стойности. Обобщено, контрастът остава нисък в по-голямата си част. Той е критичен параметър за качеството на отпечатъка, тъй като определя рязкостта в граничните зони и плавността на тоналните преходи. Получените резултати съответстват на измерените оптически плътности, потвърждавайки пряката връзка между двата параметъра. Контрастът не подлежи на директна регулация, а се определя чрез изчисление на измерените величини (SID), което подчертава необходимостта от прецизни измервания и строг контрол на процесните параметри.

Изводите са следните:

- Ниските стойности на контраста са следствие от по-ниските оптически плътности на плътните и полутоновите полета;
- Контрастът остава ключов показател за визуалното качество, особено при рязкостта и плавността на тоналните преходи;
- Подобряването на контраста изисква оптимизация на параметрите, влияещи върху оптическата плътност, тъй като той се изчислява на нейна база.



Фиг. 16 Графика със стойности на цветова разлика на плътно поле dE

Фиг. 16 илюстрира измененията на цветовата разлика (dE) за процесните цветове СМҮК през целия тираж. Още при първоначалното измерване се отчитат стойности, превишаващи допустимата граница от 6 единици. Единственият цвят с качествено възпроизвеждане е черното. Стойностите за циан са близки до горната граница на допустимото отклонение, без гаранция за визуална идентичност с еталона. Магента и жълтото показват отклонения с минимум 40% над допустимите стойности, с изключение на жълтото при 140 хил. удара. Резултатите индикират неточна цветова репродукция, при която измерените координати в CIE Lab системата не съответстват на еталонните. Това е критично за качеството на печатната продукция, тъй като визуалното възприятие на клиента зависи пряко от цветовете, а всяко отклонение влияе върху всички субтрактивни СМҮК комбинации. Изводите са следните:

- Значителните отклонения на dE при магента и жълто показват незадоволителна цветова точност и негативно влияние върху визуалното качество;
- Черното и цианът демонстрират по-добра стабилност, но остават критични за коректното цветово съгласуване;
- Цветовият контрол е ключов фактор за качеството, тъй като клиентската оценка се базира основно на цветовете характеристики;
- Минимизирането на отклоненията изисква прецизен контрол на процесните параметри, мастилата и съответствието на цветовете координати в CIE Lab.

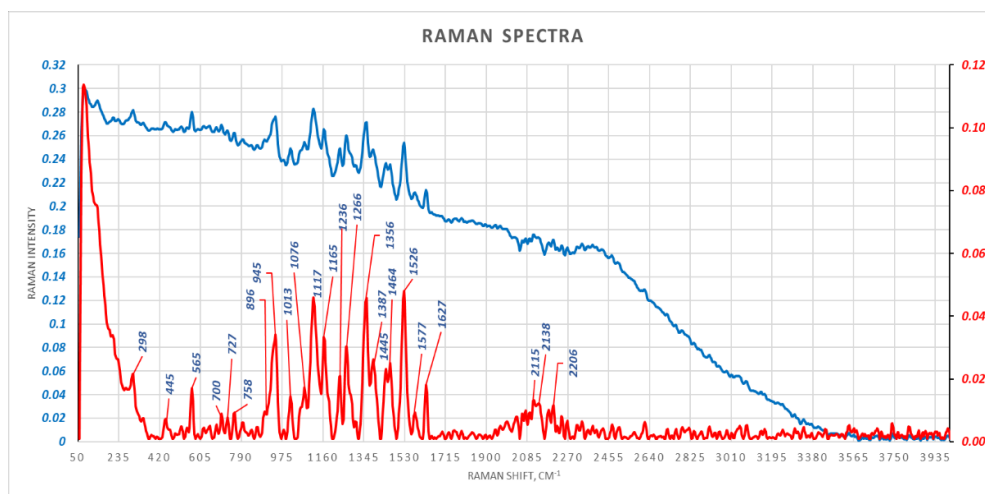
II-7 Изследване на еластичните деформации в полимерния слой на печатната форма чрез експериментални и числени методи

Печатната форма е изградена върху алуминиева основа с обозначение 1050-N18. Според данните, предоставени от производителя, основните физико-механични характеристики на материала включват:

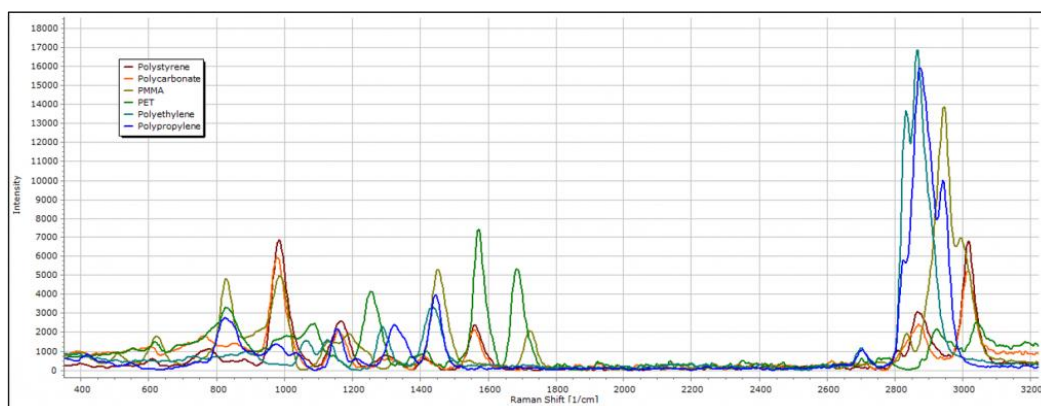
Модул на еластичност $E = 69 \text{ GPa}$

Коефициент на Поасон $\nu = 0,33$

Тези параметри са критични за моделирането на еластичните деформации и служат като входни данни за числени симулации на механичното поведение на печатната форма. Полимерният слой върху алуминиевата основа определя контактните и растерните свойства при печат. За установяване на неговите физико-механични характеристики е проведен химичен и структурен анализ, включващ Раманова спектроскопия, инфрачервена спектроскопия (FTIR) и гелпроникваща хроматография (GPC). Получените резултати позволяват количествено определяне на механичните свойства, необходими за последващи експериментални и числени изследвания. Комбинираният химичен и механичен анализ осигурява калибриране на числени модели за симулация на контакт и деформация, определяне на критичните параметри, влияещи върху растерната геометрия и качеството на печат, както и прогнозиране на поведението на печатната форма при различни натоварвания и условия.

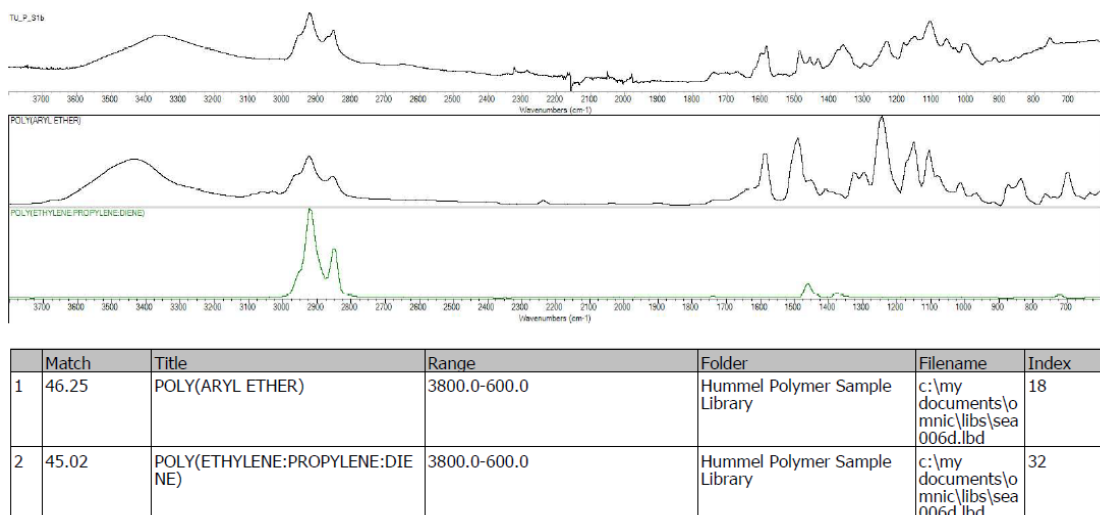


Фиг.17 Раман спектър на проба (син цвят суровия спектър, червен цвят обработен, чрез функцията изглаждане на базова линия с полином)



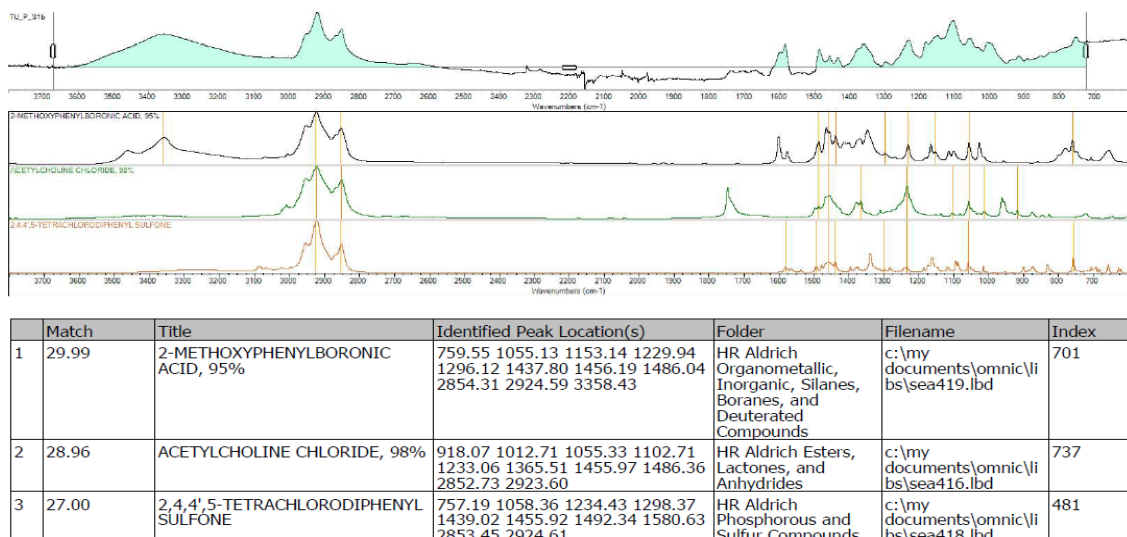
Фиг.18 Раман спектри на различни видове полимерни структури

Spectrum Search Results



Фиг.19 Състав на полимерите, участващи в изграждането на полимерния слой на печатната форма

Peak Search Results



Фиг.20 Вещества, участващи в състава на полимерния слой на печатната форма

II-7.1 Химичен състав и технологични параметри на полимерния слой

1. Основен изграждащ компонент - съпоставянето на данните от експерименталните анализи с патентни примери показва, че основният полимерен компонент на слоя е **полиметилметакрилат (PMMA)**. Той отговаря на изискванията за функционалност, адхезия към алуминиевата основа и устойчивост при обработка с лазерна енергия и проявителни разтвори.

2. Технологични параметри - подготовката на слоя се реализира чрез разтваряне на PMMA в 30% разтвор на толуен/бутанол (90:10), с маса на слоя след сушене **2,5 g/m²** при температура **100 °C**. При експониране се използва лазерна енергия с дължина на вълната **830 nm** и енергийна плътност **120–250 mJ/cm²**. Проявителният разтвор е с основен характер (**pH = 14**), което осигурява пълно отстраняване на експонираните зони.

3. Функционални компоненти и тяхната роля - освен PMMA, полимерният слой съдържа

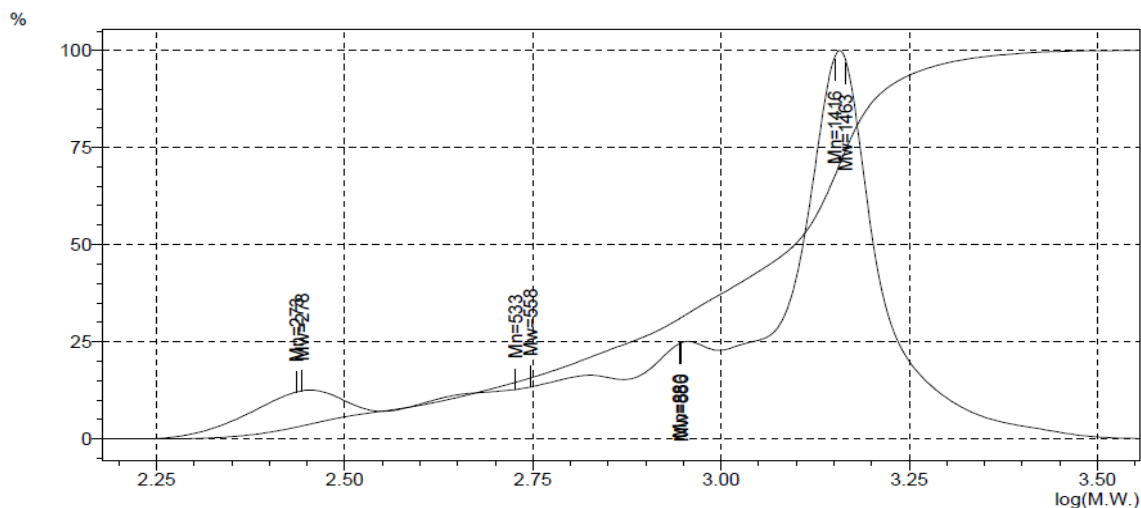
и допълнителни съединения, които подобряват функционалните и механичните характеристики на материала:

Съединение	Функция
Ацетилхолин хлорид	Осигурява „сензорна“ функция, т.е. чувствителност на слоя към химически въздействия.
Тетрахлородифенил сулфон	Укрепва връзките в полимерната система, подобрява адхезията между покритието и алуминиевата основа.
Метоксифенилбороник	Повишава реакционната способност и разтворимостта на полимерния слой.
Ароматни структури	Подобряват механичните характеристики и устойчивостта на слоя.
Алкидни групи	Увеличават адхезията и допринасят за добри механични свойства.
NH-групи	Стабилизират механичните характеристики, подобряват адхезията и осигуряват възможности за кръстосано свързване (crosslinking), водещо до втвърдяване и стабилизация на слоя.

4. Значение за технологичния процес - комбинацията от РММА и допълнителните функционални съединения гарантира:

- Съвместимост със стандартните процеси за експонация и проявяване;
- Устойчивост на механични и термични въздействия по време на печат;
- Контролирана чувствителност към лазерна обработка и проявител, осигуряваща точност на растера и тоналната стойност.

Molecular Weight Distribution Curve



Фиг.21 Графика на разпределение на молекулната маса в полимерния слой

На фиг. 21 са представени стойностите на средното числово (M_n) и средното тегловно молекулно тегло (M_w). Резултатите показват, че изследваният слой, чийто основен полимерен компонент е полиметилметакрилат (РММА), се класифицира като нискомолекулен полимер със специфични физико-механични свойства. На базата на

получените данни за механичните характеристики на полимерния слой и изчисление на модула на еластичност по правилото за линейни смеси (ур. 28 $E_c = E_f V_f + E_m V_m$) се определят модул на еластичност $E = 200$ МПа и коефициент на Поасон $\nu = 0,35$, характерни за този тип материали. За описване на еластичното поведение на гуменото офсетово платно е използван хипереластичният модел на Муни–Ривлин, приложим при големи деформации и изотропни, напълно обратимо еластични материали. В рамките на изследването първоначално се изчислява напрежението при относително удължение $\lambda \approx 1,01$, след което на база експерименталните данни се определят материалните константи C_1 и C_2 . Чрез тях се пресмята напрежението по конститутивното уравнение на модела.

Изчисляване на напречното сечение А:

- Ширина 50 mm;
- Дебелина 1,71mm;
- $A = 85,5 \text{ mm}^2$.

Напрежение при 500 N:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{500}{85,5} = 5,85 \text{ МПа}$$

Конститутивното уравнение на Муни–Ривлин (едноосен опън):

$$\sigma = 2 \cdot \left(C_1 + \frac{C_2}{\lambda} \right) \cdot (\lambda - \lambda^{-2})$$

Приближение при $\lambda = 1,01$:

$$\lambda^{-2} = \frac{1}{1,01^2} = 0,9803$$

$$\lambda - \lambda^{-2} = 0,0297$$

Решение на уравнението за материални константи:

$$5,85 = 2 \cdot \left(C_1 + \frac{C_2}{1,01} \right) \cdot 0,0297$$

$$C_1 + \frac{C_2}{1,01} = \frac{5,85}{2 \cdot 0,0297} = 98,48$$

Полученото уравнение с две неизвестни се решава чрез въвеждане на приближение, като се приема пропорционалност между материалните константи $C_2 = 0,3C_1$, характерна за материали от разглеждания тип. Изборът на това съотношение се обосновава с композитната структура на гуменото офсетово платно, съставено от минимум три слоя, която води до несвободно и несферично разпределение на деформациите и засилено влияние на втория инвариант I_2 , управляван от константата C_2 . При чисти еластомери е типично съотношение $C_2 = 0,2C_1$, докато при композитни материали стойността на C_2 може да достигне диапазона $0,3-0,5C_1$, особено при силно нелинейно поведение при малки деформации. Поради това за многослоен композит с минимално удължение при опън най-подходящо е съотношението $C_2 = 0,3C_1$.

$$C_1 + \frac{C_2}{1,01} = C_1 + \frac{0,3C_1}{1,01} = 98,48 \Rightarrow C_1 \left(1 + \frac{0,3}{1,01} \right) = 98,48 \quad C_1 = 75,9 \text{ МПа}, \quad C_2 = 22,8 \text{ МПа}$$

Стойност на модула на еластичност:

$$E = 6(C_1 + C_2) = 6(75,9 + 22,8) = 592,2 \text{ МПа}$$

Последователни стъпки за симулация:

1. Изчертаване на геометричен модел

- Създава се CAD модел на анализирания зона от печатния апарат.
- Включват се основните компоненти в контакт с полимерния слой: алуминиева основа, печатен цилиндър, гумен валеж и субстрат (хартия).
- Геометрията е достатъчно детайлна за улавяне на максимални напрежения и деформации, като същевременно е оптимизирана за изчислителна ефективност. **2.**

Асемблиране и дефиниране на материални свойства

- Компонентите се асемблират в SolidWorks с дефиниране на контактите (bonded, no penetration, sliding).
- Задават се механичните характеристики на материалите:
 - o Полимерен слой – експериментално определени E и ν (PMMA);
 - o Алюминиева основа – $E = 69 \text{ GPa}$, $\nu = 0,33$;
 - o Останалите компоненти – стомана, гума и хартия с подходящи свойства.

3. Определяне на гранични условия

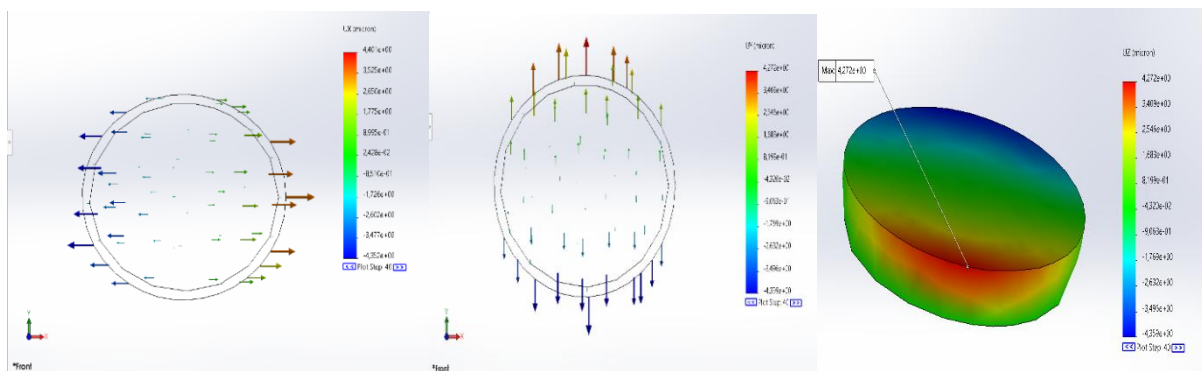
- Закрепване на неподвижните елементи.
- Прилагане на натиск и контактни сили, съответстващи на печатния процес.
- Дефиниране на премествания и ограничения за реалистично моделиране на взаимодействията.

4. Симулация на процеса

- Провежда се статичен или квазистатичен анализ.
- Анализират се преместванията, напреженията и деформациите в полимерния слой.
- Извеждат се максимални стойности на деформации, разпределение на напреженията и критични зони.

5. Анализ на резултатите

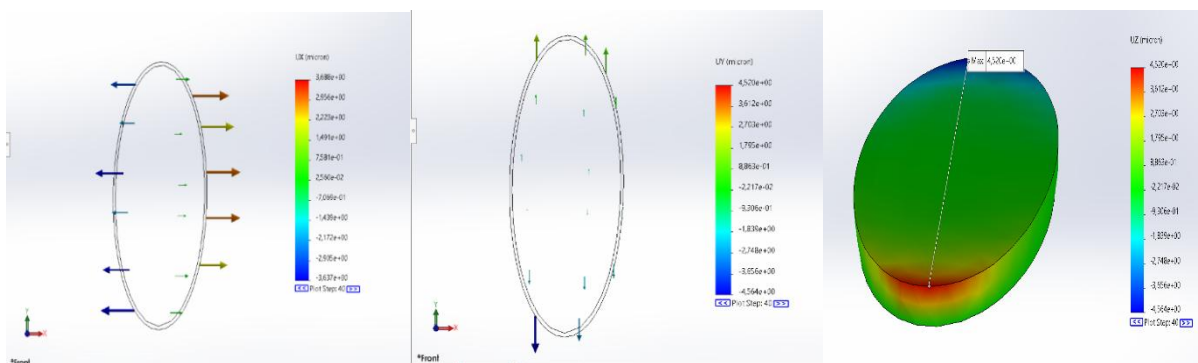
- Симулираните стойности се сравняват с допустимите граници за PMMA.
- Формулират се препоръки за оптимизация на контактния натиск, дебелината и поведение на слоя и твърдостта на контактните повърхнини.



Фиг. 22 Преместване в трите проекции в обема на печатния елемент при 40% TV а – по x, б по y, в – по z

Анализът на симулираните еластични деформации на полимерния слой показва пряка зависимост между контактната площ на печатния елемент и възпроизведената тонална стойност (TV) при 40% полутон. Максималните премествания по X и Y в периферията на елипсовидния елемент са съответно $8,753 \mu\text{m}$ и $8,631 \mu\text{m}$, което представлява нарастване с 7,74% по X и 9,54% по Y. Изчислената контактна площ след деформация е $9466,4 \mu\text{m}^2$, с увеличение от 18,05% спрямо първоначалната стойност ($8018,9 \mu\text{m}^2$). Това показва, че еластичните деформации значително разширяват контактната зона, влияейки върху количеството мастило и възпроизведената TV. В началото на тиража възпроизведената TV е между 56–59% (TVI 16–19%), докато компенсационните криви осигуряват 12,1–12,7% TV, което показва, че остатъчното нарастване се дължи на реалните деформации. Разпределението на деформациите е сравнително равномерно по X и Y, докато по Z се наблюдават максимуми от $4,272$ – $4,359 \mu\text{m}$ на периферията и $0,819 \mu\text{m}$ в центъра, което може да предизвика неравномерно контактно налягане и колебания в мастиления трансфер. Процентът на влияние на симулираните премествания върху реалните измервания е значителен: увеличение на контактната площ от 18,05% съответства на TVI 16–19%. Зададените компенсационни криви покриват частично растера, като остатъчното отклонение се дължи на еластичните деформации. Това подчертава необходимостта от контрол на

физико-механичните свойства на полимерния слой и правилното разпределение на контактния натиск за стабилна плътност на цвета и точност на тоналните стойности.



Фиг. 23 Преместване в трите проекции в обема на печатния елемент при 80%TV а – по x, б по y, в – по z

Анализът на еластичните деформации на печатния елемент за 80% TV показва, че максималните премествания по X и Y в периферията на елипсоидния елемент са съответно 6,590 μm и 6,359 μm , което представлява нарастване с 2,3% по X и 4,5% по Y спрямо първоначалния модел. Изчислената контактна площ след деформация е 43 222,95 μm^2 , с увеличение от 6,42% спрямо първоначалните 40 615,2 μm^2 . В началото на тиража възпроизведената TV варира между 89,7–91,7% (TVI 9,7–11,7%), докато зададените компенсационни криви покриват 14,6–16,7% TV, което показва, че остатъчното нарастване се дължи на еластичните деформации. Подобно на 40% полутоновото поле, се наблюдава корелация между увеличената контактна площ и възпроизведените стойности, като тези ефекти не се сумаризират с компенсационните криви, но са важни за качествения контрол. Деформациите са неравномерни по осите на елипсоидния елемент, с доминиращо нарастване по дългата ос, което води до асиметричен контакт. Преместванията успоредно на приложеното натоварване достигат 4,520–4,564 μm , концентрирани по периферията, особено по оста Y, предизвиквайки промяна в контактното налягане и локални колебания в плътността на мастилото. Геометричните промени на полутоновите елементи водят до различно изменение на контактната площ по перпендикулярните направления, оказвайки пряко влияние върху стабилността на тоналната плътност. Обобщено, еластичните деформации са значим фактор за възпроизведената TV и плътност на цвета, като тяхната точна оценка и корекция са критични за качествения контрол на печатната продукция.

Емпиричният степенен нелинеен модел - описва връзката между нарастването на тоналната стойност (TVI) и относителното изменение на контактната площ на растерната точка на печатния елемент и се формулира като:

$$\text{TVI} = k \cdot (\Delta a)^n \quad (34)$$

където:

- **TVI** – нарастване на тоналната стойност, измерено като разликата между реално възпроизведената и номиналната тонална стойност: $\text{TVI} = \text{TV}_{\text{изм.}} - \text{TV}_{\text{зад.}}$ [%];
- **k** – емпиричен коефициент на пропорционалност, безразмерен, характеризира чувствителността на системата „мастило–хартия–натиск–растер“ към промени в контактната площ;
- **Δa** – относително увеличение на контактната площ, определяно като: $\Delta a = \frac{A_c - A_0}{A_0}$, където A_c е реалната (деформирана) контактна площ, а A_0 е номиналната (идеална) площ на растерната точка [%];
- **n** – степенен показател (емпиричен експонент), безразмерен, който описва характера на

зависимостта между контактната площ и TVI: $n=1 \rightarrow$ линейна зависимост; $n < 1 \rightarrow$ насищаща зависимост (ефектът се забавя при по-големи Δa); $n > 1 \rightarrow$ растящ ефект, по-бърз от линейния.

Моделът е емпиричен, тъй като параметрите k и n се определят чрез регресионен анализ на експериментални данни при различни условия на печат. Степенната форма позволява описание на системи, при които малки промени в контактната площ водят до непропорционални изменения в тоналната стойност – характерно за офсетовия печат при вариации в еластичността на подложките и налягането. Експерименталните изследвания за ролен heatset офсетов печат показват, че най-добро съответствие с измерените данни се постига при $k = 54,2$ и $n = 0,63$. Стойността $n < 1$ показва насищащ характер на процеса – при по-големи деформации на растерната точка нарастването на тоналната стойност се забавя, отразявайки физическата същност на явлението: увеличената контактна площ води до по-интензивен пренос на мастило до определена граница, след което ефектът се стабилизира. Нелинейната регресия на измерените стойности на TVI и Δa предоставя емпирична зависимост, която позволява количествено прогнозиране на влиянието на контактната площ върху нарастването на тоналната стойност.

$$TVI = 54,2 \cdot (\Delta a)^{0,63}$$

Тази формула описва наблюдаваната зависимост между увеличението на контактната площ и нарастването на тоналната стойност:

- За малки Δa (малка деформация на растеровата точка) TVI нараства по-бавно;
- За големи Δa (по-голяма деформация на растеровата точката) TVI се увеличава по-силно, но по-малко от линейно (тъй като $n < 1$).

Преобразуване на регресията в линейна форма (логаритмична трансформация):

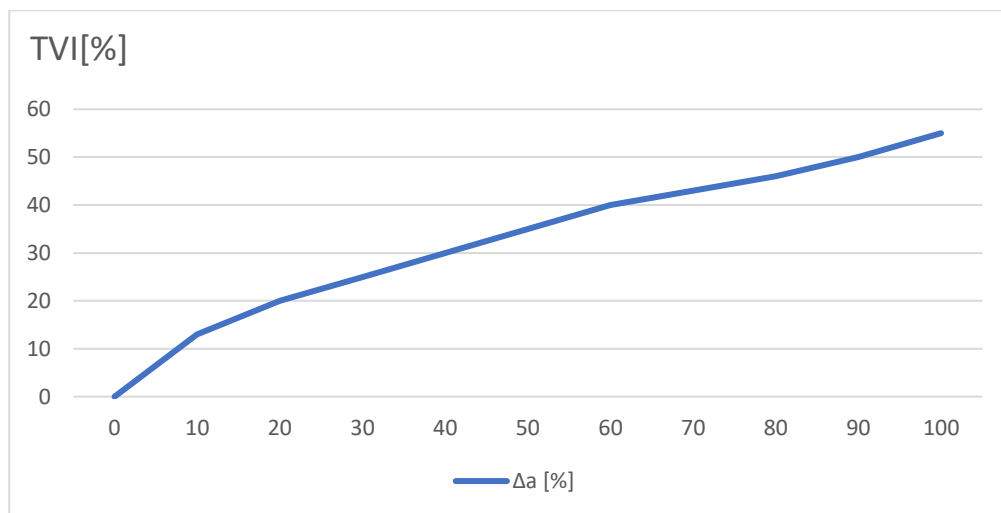
$$\ln(TVI) = \ln(k) + n \cdot \ln(\Delta a)$$

$$Y = b_0 + b_1 X, \text{ където: } Y = \ln(TVI), X = \ln(\Delta a), b_0 = \ln(k), b_1 = n$$

След регресия на $\ln(TVI)$ спрямо $\ln(\Delta a)$, се получават:

$$- b_0 = \ln(54,2) \approx 3,992$$

$$- b_1 = 0,63, \text{ при експоненциране получаваме вида на формулата.}$$



Фиг. 24 Графика на изменението на TVI според емпиричната зависимост

Коефициент на детерминация R^2

$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}$, където: SS_{res} – сума от квадратите на грешките между измерените и предсказаните от модела стойности; SS_{tot} – сума от квадратите на отклоненията на измерените стойности от средната им стойност.

$$SS_{res} = \sum (y_i - y_j^{\wedge})^2, \text{ където: } y_i \text{ – измерени стойности в случая } \ln(TVI); y_j^{\wedge} \text{ – прогнозни}$$

стойности от модела ($b_0 + b_1 \ln(\Delta a)$).

$SS_{tot} = \sum (y_i - \hat{y})^2$, където: y_i – измерени стойности в случая $\ln(TVI)$; \hat{y} – средни стойности на наблюдаваните данни.

В контекста на конкретния случай в R^2 се изчислява на база на следното уравнение:

$\ln(TVI) = b_0 + b_1 \ln(\Delta a)$, при така направената логаритмична трансформация за коефициента на детерминация R^2 се получава стойност 1, която дава информация, че моделът описва данните перфектно.

След така изложената връзка данните от процеса на симулация могат да бъдат валидирани.

Табл. 3 Валидиране на стойности за контактна площ по получени премествания в симулация спрямо стандарт ISO 12647-3:2013

Тонална стойност (TV, %)	Зададена площ A_0 (μm^2)	Измерена/изчислена площ A_c (μm^2)	Относително нарастване $\Delta a = (A_c - A_0)/A_0$	TVI (%)	TVI стойност по ISO 12647-3	% на участие на Δa в TVI
40 %	8018,9	9466,4	0,180 (18,0%)	+18,34	19	98,1
80%	40615,2	43222,95	0,064 (6,4%)	+10,06	10	63,6

II-8 Верификация на модела

За потвърждаване на достоверността и числената стабилност на модела е извършена верификация по сходимост, включваща два етапа: по мрежа и по неуравновесени възлови сили.

Сходимост по мрежа: Анализирано е влиянието на размера на крайните елементи върху резултатите. При последователно намаляване на елементите преместванията на полимерния слой по X и Y се стабилизират, а разликите между итерациите намаляват. Последните две итерации показват разлика под 1%, което потвърждава стабилността на решението и адекватността на избраната дискретизация.

Сходимост по неуравновесени възлови сили: Изчислени са остатъчните сили във възлите след решение. Намаляването на тези сили при повторни итерации показва, че системата достига баланс и численото решение е стабилно. Комбинирането на двата подхода гарантира, че получените резултати са надеждни и независими от мрежовата дискретизация и началните условия на изчисление.

Табл. 4 Стойности за верификация на модела по сходимост на мрежата

Номер	Размери на краен елемент		Преместване по X (μm)	Преместване по Y (μm)	Преместване по X (целева стойност (μm))	Преместване по Y (целева стойност (μm))
	Дължина (mm)	Ширина (mm)				
1	0,01927098	0,1734388	6,496	6,916	8,753	8,631
2	0,016133945	0,0145255	8,688	8,573	8,753	8,631
3	0,01204436	0,01083993	8,684	8,570	8,753	8,631
4	0,01011726	0,00910554	8,678	8,565	8,753	8,631
5	0,00977638	0,00879874	8,673	8,558	8,753	8,631
6	0,00965549	0,00867194	8,675	8,553	8,753	8,631

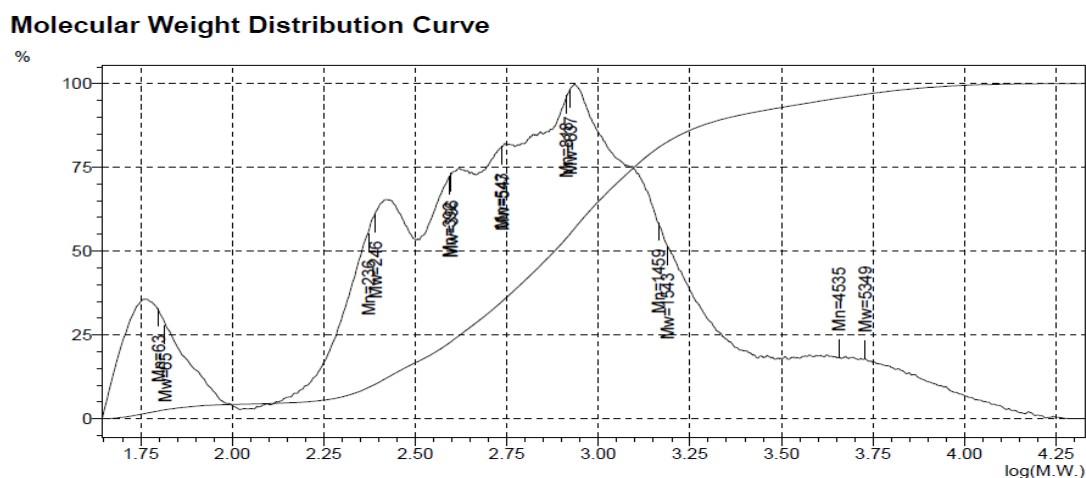
Сходимост по неуравновесени възлови сили: Вторият етап от верификацията оценява остатъчните възлови сили, които измерват числената грешка при удовлетворяване на условията за статично равновесие. За коректно решение тези сили трябва да намаляват под

зададен праг. В настоящото изследване стойностите остават под 0,1% (по-строг критерий от стандартните 1%), което потвърждава пълното уравнивяване на системата и правилното прилагане на граничните условия. Съвпадението на резултатите при различни нива на мрежова плътност и удовлетворяването на критериите за минимални неуравновесени сили доказват числената стабилност и надеждността на модела, което позволява резултатите да се считат за физически достоверни. Въз основа на химичния анализ на полимерния слой, показващ наличието на нискомолекулен полиметилметакрилат и неговата склонност към повишаване на степента на полимеризация при UV облъчване, е разработен подход за оптимизация на подготовката на печатната форма с цел минимизиране на деформациите на печатния елемент. Печатните форми се експонират и проявяват според утвърдената технологична последователност и параметрите, определени при изследването. След това те преминават през последваща светлинна обработка с обща продължителност един час. Процедурата на последващото облъчване включва:

- основно експониране с UV-A светлина при мощност на източниците 60 W и енергия на експониране в диапазона 16–30 J/cm²;
 - последващо експониране с UV-C светлина при енергия 2–8 J/cm²;
 - финализиращо експониране с UV-C светлина при енергия 1–3 J/cm².
- Обработката е извършена в експонатор Concept 305 EDLF на Glunz & Jensen Degraf S.p.A. Продължителността от един час за последващата светлинна обработка е определена въз основа на експериментални изследвания с интервал 15 min–1,15 h. Установено е, че при тези условия настъпват промени в молекулната маса на полимера поради протичащи полимеризационни процеси, като максимален ефект се наблюдава след един час. Понататъшното удължаване на обработката не води до значителни промени, което показва стабилизиране на стойностите след приключване на полимеризацията.

II-9 Измерване на молекулната маса след светлинно въздействие чрез гелпроникваща хроматография

Измерването на молекулната маса след светлинно въздействие е извършено чрез гелпроникваща хроматография по методика, идентична с използваната при първоначалния химичен анализ. Целта на изследването е да се установят измененията в полимерния слой, проявяващи се в повишаване на молекулната маса вследствие на нарастване степента на полимеризация. За визуализация и сравнение на резултатите хроматографските криви от двете изследвания са представени в обща графика, което позволява ясно проследяване на промените в разпределението на молекулните маси под влияние на светлинното въздействие.



Фиг.25 Графика на разпределение на молекулната маса в полимерния слой

E_c – модул на еластичност на композита, E_f – модул на еластичност на фибрите, V_f – обемен дял на фибрите, E_m – модул на еластичност на матрицата, V_m – обемен дял на матрицата

$V_m = 0,94$, $m = 0,94\phi_m = 0,94$ – обемна част на PMMA (безразмерна)

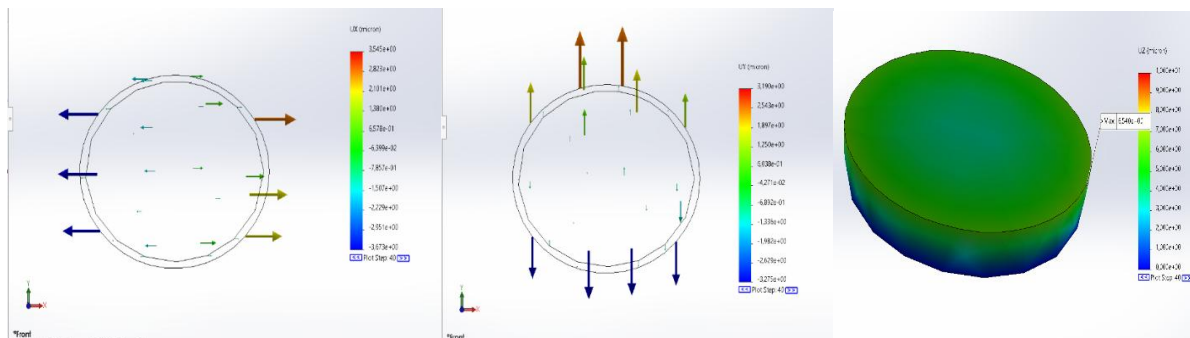
$V_f = 0,06$, $d = 0,06\phi_d = 0,06$ – обемна част на добавките (безразмерна)

$E_m \approx 0,20$ GPa – за PMMA с $W_n = 5349$ g/mol

$E_f \approx 2,5$ GPa – модул на еластичност на добавките (средна стойност на боросъдържащи добавки)

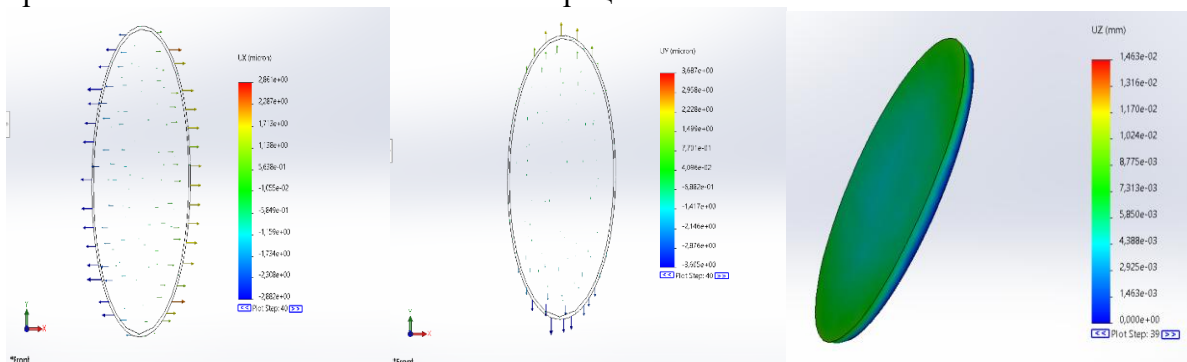
$E_c = 0,360$ GPa

Симулация на контакта между печатна форма и гумено офсетово платно след повишаване на физико-механичните стойности (модул на еластичност)



Фиг. 26 Преместване в трите проекции на обема в печатния елемент при 40%TV а – по x, б по y, в – по z

По отношение на контактната повърхност максималните премествания на елипсовидния растеров елемент са отчетени в периферията му по направленията x и y, като стойностите достигат съответно 7,218 μm и 6,465 μm . Това съответства на относително нарастване от 6,38% по ос x и 7,15% по ос y спрямо първоначалните геометрични размери. В резултат се наблюдава увеличаване на ефективната контактна площ на печатния елемент. Преизчислената контактна площ при полутоново поле с номинална стойност 40% TV показва нарастване от 13,99% спрямо първоначално определената стойност. Това увеличение е по-ниско от първоначално установеното нарастване на площта на растеровия елемент, което представлява положителна промяна от гледна точка на контрола върху деформациите. Получената стойност попада в рамките на допустимите отклонения, определени в стандарт ISO 12647-3:2013 за офсетов печат, което потвърждава представителността на резултатите от числената симулация и възможността за реализирането им в реален печатен процес. По направление, успоредно на приложеното натоварване, е отчетено максимално преместване от 6,54 μm , равномерно разпределено по контактната повърхност, което е предпоставка за по-хомогенно контактено налягане и по-добра стабилност и качество на печатния процес.

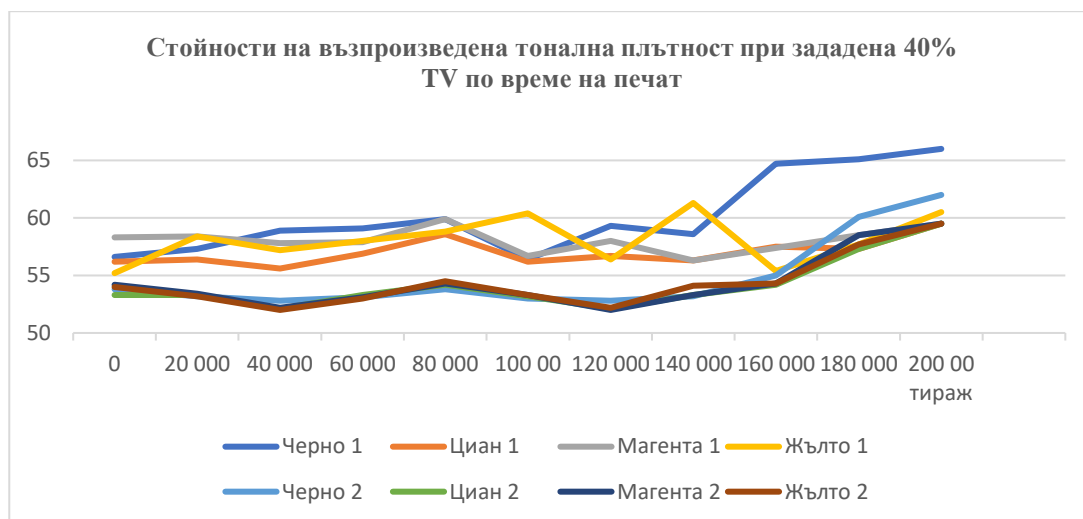


Фиг. 27 Преместване в трите проекции на обема в печатния елемент при 80%TV а – по x, б по y, в – по z

По контактната повърхност на елипсовидния растеров елемент максималните премествания са отчетени в периферията по направленията x и y , със стойности съответно $5,169 \mu\text{m}$ и $5,104 \mu\text{m}$, което отговаря на относително нарастване от $4,53\%$ по ос x и $1,42\%$ по ос y спрямо първоначалните геометрични размери. В резултат на деформациите е установено увеличение на ефективната контактна площ на печатния елемент. За полутоново поле с номинална стойност 80% TV преизчислената контактна площ показва нарастване от $5,05\%$, което е с $1,37\%$ по-ниско от първоначално установените стойности за площта на растеровия елемент. Отчетеното нарастване не води до съществено увеличаване на деформациите, но влияе върху градиента на нарастване на растеровия елемент, като доближава получените стойности до нормативно зададените в стандарт ISO 12647-3:2013. При тази стойност се очаква в реален печатен процес възпроизвеждане в рамките на допустимите отклонения $5\% \pm 1\%$ TVI, което потвърждава реалистичността на резултатите. По направление, успоредно на приложеното преместване, е отчетено максимално преместване от $6,10 \mu\text{m}$, като в по-голямата част от контактната повърхност стойностите са в диапазона $3\text{--}4 \mu\text{m}$. Максималните деформации се наблюдават в крайните зони на елипсовидния елемент поради по-малкия радиус на кривина. Въпреки по-високите максимални стойности, почти хомогенното разпределение на деформациите създава предпоставки за равномерно контактно налягане, по-добро разпределение на мастилния слой и повишаване на качеството на печатния процес.

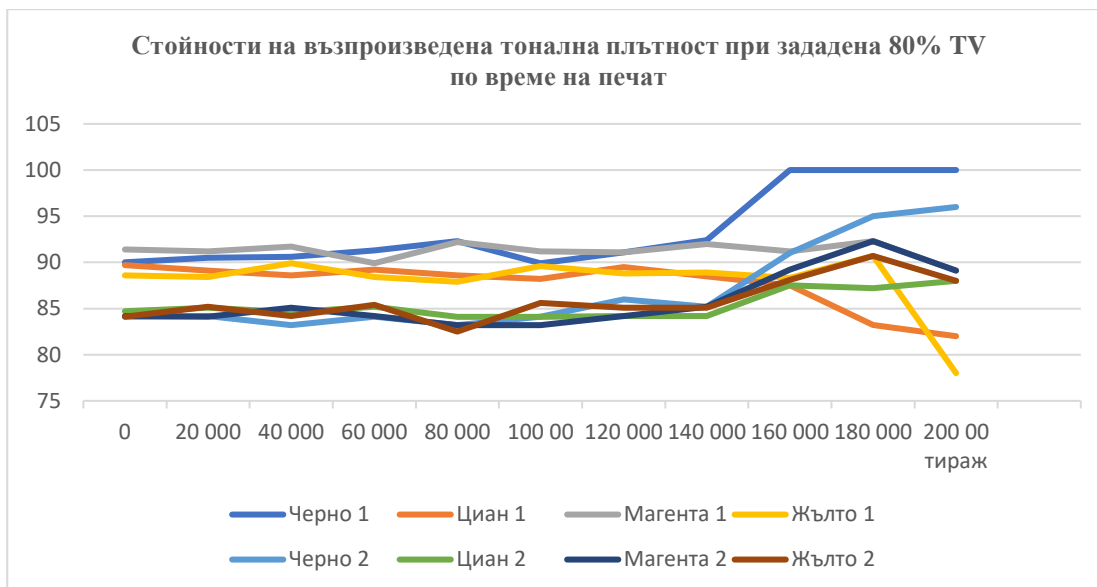
II-10 Приложение на технологични промени, базирани на експериментално установени механични характеристики на печатния елемент в печатния процес

На фиг. 28 са представени резултатите от измерванията след въвеждане на промени в механичните параметри на печатната форма, включващи модула на еластичност на полимерния слой и носителя на печатните елементи, за всеки цвят в тиражна серия от 200 хил. отпечатъка. Паралелно са показани и данните от контрола на качеството, анализирани във втора глава, което позволява пряка съпоставка между първоначалното състояние и резултатите след приложените технологични корекции. Сравнителният анализ показва реализирана компенсация в изменението на тоналната плътност при 40% полутоново поле. Измерените стойности на нарастване на растеровия елемент са в диапазона $12\text{--}14\%$ TVI, което в голяма степен съответства на предварително предвидената от числената симулация стойност от 13% . В резултат се отчита съществено подобрение в разпределението, като компенсацията води до намаляване на нарастването на тоналната стойност с приблизително $3\text{--}5\%$ спрямо първоначалните данни. Получените резултати могат да бъдат оценени като много добри, като допълнително се установява по-равномерно разпределение на стойностите за всички изследвани цветове и липса на резки амплитудни отклонения. Като допълнителен положителен ефект при 40% полутоново поле се отчита и повишена тиражна устойчивост на печатната форма до 160 хил. удара спрямо 140 хил. удара в изходното състояние.

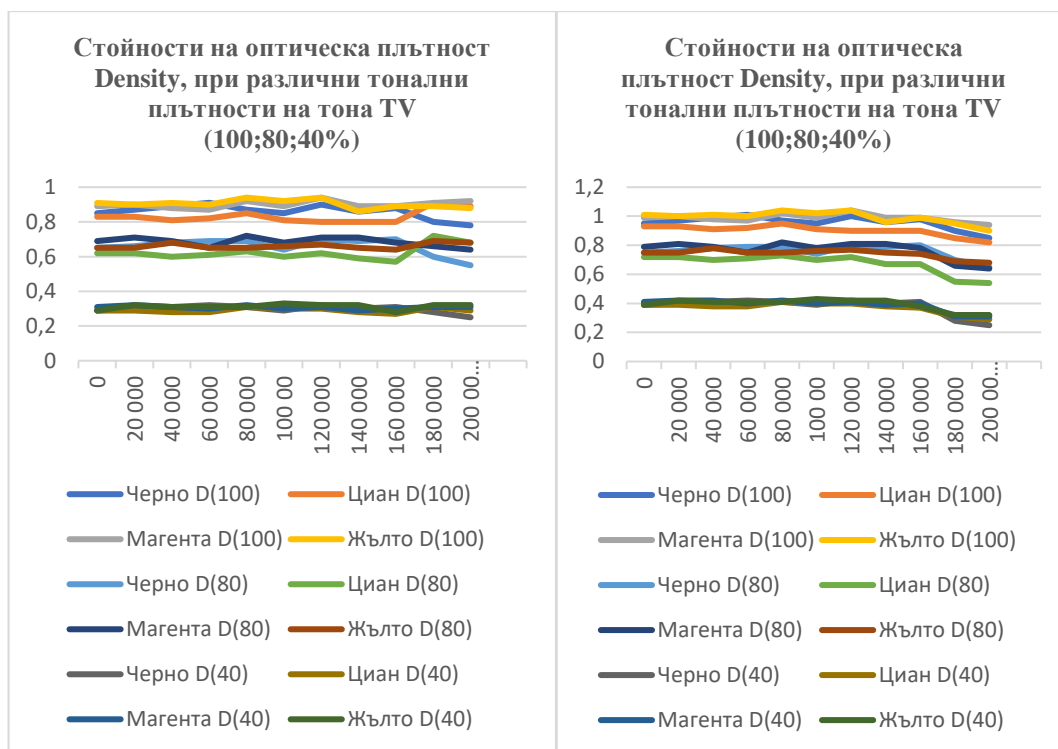


Фиг. 28 Графика със стойности на възпроизведена тонална плътност при зададена 40% TVI по време на печат, индекс 1-стойности от анализ на качеството, измерени в глава втора, 2- стойности от анализ на качеството, измерени след промяна на модул на еластичност на полимерен слой

На фиг. 29 са представени резултатите след въвеждане на промени в механичните параметри на печатния процес, включващи модула на еластичност на полимерния слой и носителя на печатните елементи, при запазен тираж от 200 хил. отпечатъка. Паралелно са показани и данните от контрола на качеството, анализирани във втора глава, което позволява пряка съпоставка между първоначалното и оптимизираното състояние на процеса. Сравнителният анализ ясно показва реализирана компенсация в изменението на тоналната плътност при 80% полутоново поле. Измерените стойности за нарастване на растеровия елемент са в диапазона 3–6% TVI, което съответства на предварително предвидената чрез числена симулация стойност от около 5%. В резултат на приложените технологични промени се отчита съществено подобрение в разпределението, изразено в редуциране на нарастването на тоналната плътност с приблизително 2–3% спрямо първоначалните данни. Получените резултати могат да бъдат оценени като много добри, като допълнително се установява равномерно разпределение на стойностите за всички анализирани цветове и липса на резки амплитудни отклонения. При 80% полутоново поле отново се отчита повишена тиражна устойчивост на печатната форма до 160 хил. удара спрямо 140 хил. удара в изходното състояние, което потвърждава повишената стабилност на печатния процес при оптимизирани условия.



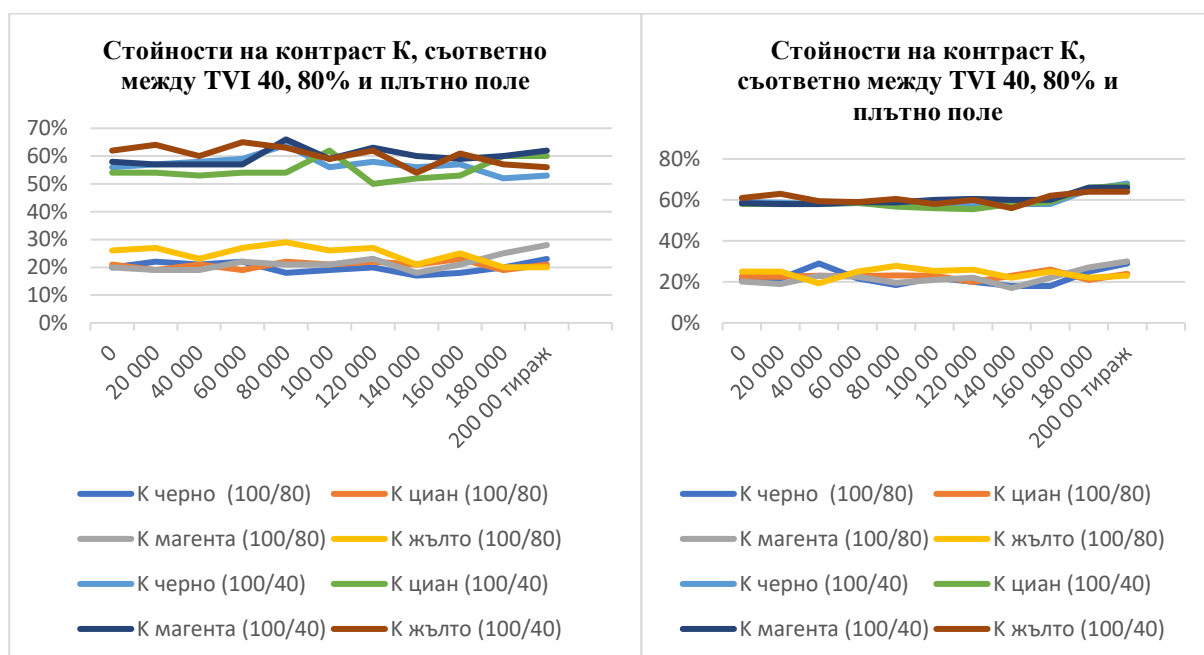
Фиг. 29 Графика със стойности на възпроизведена тонална плътност при зададена 80% TVI по време на печат, индекс 1-стойности от анализ на качеството, измерени в глава втора, 2-стойности от анализ на качеството, измерени след промяна на модул на еластичност на полимерен слой



Фиг. 30 Графика със стойности на оптическа плътност Density, при различни тонални плътности TV (100;80;40%) а-стойности при анализ на качеството в глава втора, б-стойности след промяна в модула на еластичност на полимерен слой

На фиг. 30-б са представени резултатите след приложените технологични промени и реализирания печатен процес. В сравнение с данните от фиг. 30-а се отчита увеличение на оптическата плътност както в полутоновия диапазон, така и при плътните полета за всички процесни цветове. Измененията варират между 0,10 и 0,21 в зависимост от тоналното ниво, като по-ниски стойности са регистрирани при 40% TV и част от 80% TV, а по-високи – в останалата част на 80% TV и при плътните полета. Анализът показва, че измерените стойности попадат в рамките на нормативно зададените граници за полутонови полета и се

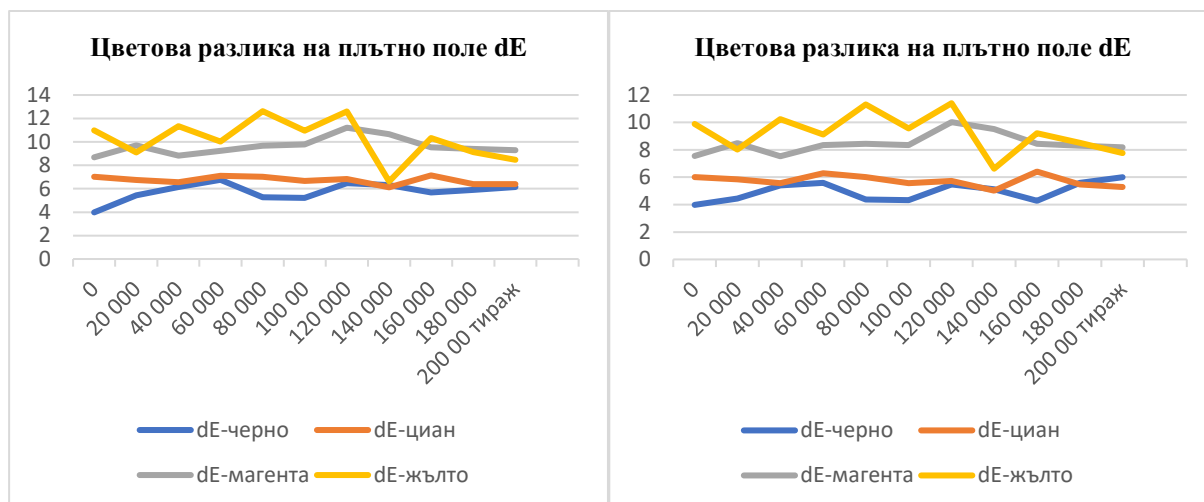
доближават до референтните стойности за плътно поле, което позволява възпроизведената оптическа плътност да бъде определена като съответстваща на референтните параметри при зададените условия на печат. Подобно на резултатите за тоналната плътност се наблюдава тенденция към по-равномерно разпределение на стойностите и редуцирани амплитудни отклонения, които остават стабилни през целия тиражен период.



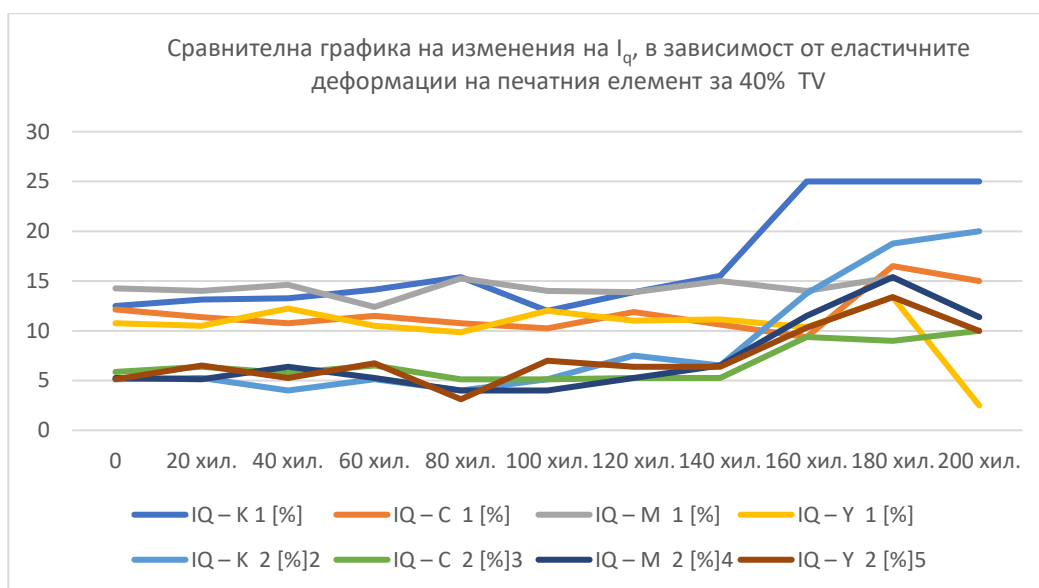
Фиг.31 Стойности за контраст К, съответно между 40, 80 %TV и плътно поле, а-стойности от изследване на актуалното състояние във втора глава, б-стойности получени след промяна на модула на еластичност на полимерния слой

На фиг. 31 са съпоставени графиките от изследванията на актуалното състояние, представени във втора глава, с резултатите след промяната в полимера на печатния елемент. Сравнението показва ясно изразен диапазон с понижени стойности при 40% TV, обусловен от повишената оптическа плътност в полутоновите полета и съответно по-ниските стойности в плътните полета. В резултат се наблюдава редукция на контраста, като разпределението му остава около 60% и е относително равномерно през целия тираж, без локални пикове с висока амплитуда. Стабилността на контрастните стойности се запазва до 160 хил. удара, след което се отчита интензивно повишаване на контраста, индикиращо влошаване и настъпване на необратими процеси в печатната форма. При анализа на 80% TV спрямо плътно поле се установяват по-високи амплитудни колебания в отделни интервали, като общото разпределение на контраста остава в границите 20–25%, което е показател за много добър локален контраст. В обобщение, стойностите на контраста се запазват в рамките на критериите за качество и се постига по-равномерно разпределение през целия тираж, което свидетелства за повишена устойчивост на печатния процес при приложените технологични промени. Стойностите за цетова разлика, преизчислени на база измерените CIELab координати на процесните цветове, показват положителна тенденция, изразена в намаляване на ΔE в рамките на тиражната серия. Това свидетелства за ограничено влияние върху цетовата разлика при запазване на цетовия профил. Макар отчетените промени да са относително малки (1–1,5 единици), те допринасят за по-добро приближаване към нормираните стойности в системата CIELab, като значителна част от резултатите попадат в рамките на допустимите отклонения за ΔE . От гледна точка на визуалното възприятие стойности на ΔE до 5–6 единици се възприемат като практически непроменен цет. Анализът на данните, представени на фиг. 96, показва по-изразени отклонения основно при магента и жълтото, което се обяснява с високия им дял в общата цетност и по-трудния контрол. В

обобщение, резултатите потвърждават подобрене в цветовата точност след промяната в полимерния слой и ясно очертават тенденция към повишаване качеството на печатния процес.

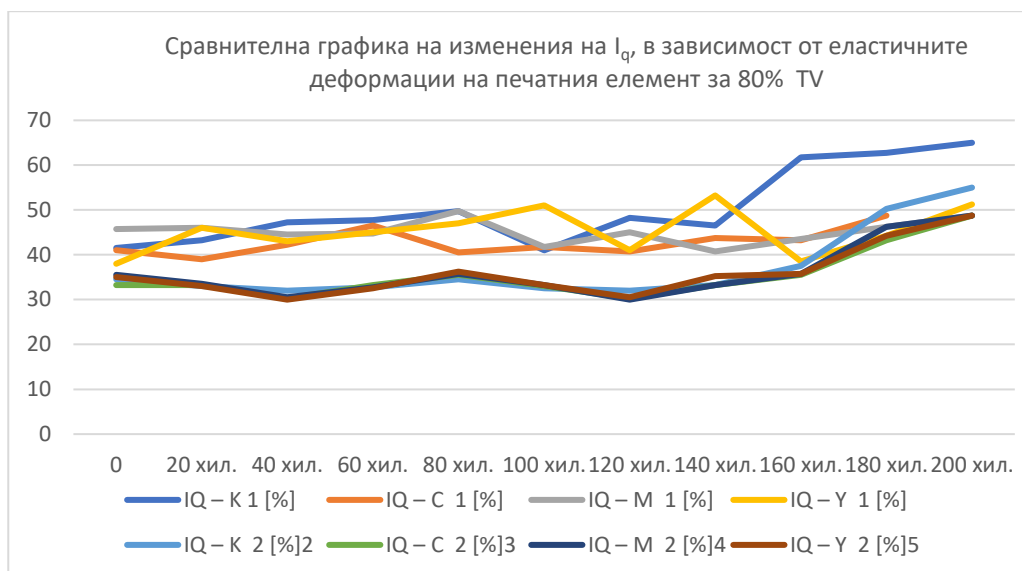


Фиг. 32 Графики със стойности за цветова разлика dE a-стойности от първоначален анализ при качествен контрол, b-стойности след приложени промени в модула на еластичност на полимерен слой, изграждащ печатния елемент



Фиг. 33 Графики със стойности на I_q , в зависимост от промяна в еластичните деформации на печатния елемент за 40% TV – индекс 1/2 преди/след промяна на модул на еластичност на полимерния слой

Извод за 40% TV: Компенсирането на еластичните деформации води до стабилизиране на тоналното възпроизвеждане при средни тонове. Разликите между цветовете стават минимални, а отпечатъците стават по-хомогено отпечатани оптически плътности, като най-силен ефект от въведената промяна се наблюдава при черния цвят.



Фиг. 34 Графики със стойности на I_q , в зависимост от промяна в еластичните деформации на печатния елемент за 80% TV – индекс 1/2 преди/след промяна на модул на еластичност на полимерния слой

Извод за 80% TV: След промяната се наблюдава подобряване на качеството, но ефектът е частичен. Високите тонални стойности (80%) остават по-чувствителни към натиска, особено при мастила с по-ниска оптична плътност (жълто).

II-11 Икономически анализ за рентабилност и производителност на производствен процес

Икономическият анализ показва, че постигнатото подобрене в производствения процес води до повишена рентабилност и производителност. Най-значителен абсолютен принос за намаляване на разходите имат тези за ролна хартия, редуцирани със 182,28 лв., следвани от разходите за заплати, ремонт и амортизации с 94,35 лв. и за печатни форми с 78,25 лв. Общият икономически ефект възлиза на 472,74 лв., което представлява намаление от около 1,16% спрямо първоначалната себестойност от 40 638,25 лв. Относително малките процентни изменения при основните компоненти се обясняват с високата им абсолютна стойност. Разходът за ролна хартия заема най-голям относителен дял в себестойността (65,56%), но количественото му намаление е ограничено (0,69%), което ограничава влиянието му върху общата стойност. При по-малки тиражи обаче ефектът би бил по-изразен, като при 160 хил. листа спестяването би достигнало 2,57%. Разходите, свързани с времето за производство, показват по-висок процентен спад (около 2,09%), но поради по-ниския си дял допринасят по-слабо за общата икономия. Най-пряк ефект има намаляването на броя на печатните форми, което води до редуция на съответния разход с 20%. В обобщение, приложените подобрения осигуряват умерено, но ясно изразено повишаване на икономическата ефективност чрез по-ниска себестойност и по-рационално използване на ресурсите.

II-12 ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научно-приложни приноси:

1. **Разработена е научно обоснована методика** за изследване и анализ на еластичните деформации в полимерния слой на печатната форма при зададен печатен натиск, позволяваща количествена оценка на влиянието им върху процеса на офсетов печат;
2. **Проведени са комплексни физико-химични изследвания** за определяне на елементния състав, молекулната маса и физико-механичните характеристики на полимерния слой.

Изчислени са модул на еластичност и коефициент на Поасон на гуменото офсетово платно, осигуряващи коректно дефиниране на входните параметри при числено моделиране;

3. **Създаден е числен модел на взаимодействие в контактната зона** между полимерния слой и гуменото офсетово платно, отчитащ реалното механично поведение на материалите. Моделът е верифициран и валидиран чрез експериментални данни при отклонения под 1%, доказвайки неговата надеждност и приложимост към реални производствени условия;
4. **Разработена е методика за количествено определяне на влиянието на еластичните деформации** върху нарастването на тоналната стойност. Изведено е емпирично нелинейно уравнение, описващо зависимост между нарастването на тоналната стойност и относителната промяна в контактната площ на печатния елемент. Уравнението има локална приложимост при конкретни условия на печат и позволява използване за технологично прогнозиране;
5. **Въведен е комбиниран подход**, съчетаващ експериментални измервания и числени симулации, позволяващ комплексна оценка на качеството на печат при промяна на технологичните параметри.

Приложни приноси:

1. **Валидираният симулационен модел** може да бъде използван за технологичен контрол на офсетовия печат с цел намаляване на негативните ефекти от еластичните деформации върху качеството на отпечатъка.
2. **Дефинирани са технологични възможности за въздействие върху еластичните деформации** чрез промени в обработката на печатната форма и параметрите на печатния процес, които могат да бъдат директно приложени в производствена среда.
3. **Получените количествени зависимости** позволяват предварително изчисляване на влиянието на деформациите върху тоналната плътност и могат да бъдат използвани при разработване на компенсационни криви за различни печатни условия.
4. **Регистрираното подобрене в качеството на отпечатъка**, съчетано с повишена производителност и намалена себестойност, създава условия за увеличаване на производствения капацитет и реализиране на по-висока икономическа ефективност.

Списък с публикации, свързани с дисертацията:

1. **Вл. Ангелов, Р. Сарджева** *Възможности за приложение на ролния илюстрационен офсетов печат без овлажняване* **Journal of the Technical University – Sofia Plovdiv branch, Bulgaria “Fundamental Sciences and Applications” Vol. 21, 2015 International Conference on Engineering, Technologies and System TECHSYS 2015 BULGARIA ISSN 1310 – 8271**

2. **Вл. Ангелов** *Изследване на качеството при ролния илюстрационен офсетов печат в условията на къси и средни тиражи* **International Scientific Conference on Engineering, Technologies and Systems TECHSYS 2018, Technical University – Sofia, Plovdiv branch 17– 19 May 2018, Plovdiv, Bulgaria ISSN: 2367-8577**

3. **V. Angelov** *Analysis of the wear of the non-printing elements in offset printing depending on the operating and technological conditions* **Journal of the Technical University-Sofia Plovdiv branch, Bulgaria “Fundamental Sciences and Applications” Vol. 29, 2023 ISSN: 2603-459X**

Annotation

This dissertation explores the influence of contact pressure in an offset printing unit and the resulting elastic deformations of the polymer layer on print quality, with a particular focus on thermally imaged digital offset plates under constant industrial printing conditions. The research addresses a key challenge in offset printing: understanding how mechanical interactions at the micro-scale affect macroscopic print characteristics such as tone reproduction, dot geometry, and color fidelity.

A combined experimental and numerical approach is employed to analyze the relationship between elastic deformations of halftone elements, changes in the effective contact area during printing, and their impact on tone value increase (TVI), dot gain, and overall print quality. In the experimental part, a comprehensive set of print quality parameters—including tone value, dot size, line screen, optical density, contrast, and color difference (ΔE)—is measured continuously over a full production print run under heat-set web offset conditions, following the ISO 12647-3 standards. The mechanical properties of the polymer layer are characterized in detail using a combination of chemical and structural analyses, including Raman spectroscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and gel permeation chromatography (GPC). These analyses provide insight into the polymer composition, cross-linking, and viscoelastic behavior, which are critical for understanding its deformation under contact pressure. Using these experimentally derived material properties, a finite element model is developed to simulate the contact interactions between the plate, blanket, and substrate during printing. The model is validated by comparing the simulated results with the experimentally measured print quality outcomes. Numerical simulations reveal that elastic deformations of halftone dots significantly increase the contact area, particularly in mid-tone regions, leading to measurable TVI. A strong quantitative correlation between simulated contact area enlargement and experimentally observed TVI is established, demonstrating that mechanical deformation is a primary driver of tone value changes. Furthermore, an empirical nonlinear power-law model is formulated to describe the relationship between relative contact area increase and TVI, capturing the saturating behavior observed experimentally and reflecting the intrinsic physical constraints of the offset printing process.

The results of this study confirm that polymer layer deformations play a critical role in determining print quality, influencing the effectiveness of conventional tone value compensation strategies. These findings provide a quantitative framework for optimizing printing parameters, including contact pressure, material selection, and process settings, enabling improved print stability, tonal accuracy, and overall production quality. This research thus contributes both to a fundamental understanding of offset printing mechanics and to practical guidelines for industrial print optimization.