

УДК 655.3.066.364

Т.Ю. Киричок

МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМУВАННЯ ФАРБОВОГО РЕЛЬЄФУ ІНТАГЛІОДРУКУ

The object of the study was to ascertain the mechanism of intaglio relief forming. The technological features of intaglio printing cause ink relief forming which in accordance with the proposed model consists of a ink layer, under ink relief, and areas of vertical and horizontal ink penetration into substrate. Ink relief forming is a result of the combined action of the high pressure in the printed nip (1,000 kN/m) which is applied slightly differently to different areas of the paper, and increased up to 80–82 °C the temperature of ink on the plate cylinder. The model is experimentally corroborated by microscopic examination of intaglio printed paper cuts with zoom in $\times 100$ –1000. It was defined the shape of the intaglio ink relief parts, their position on the surface and in the volume of the banknote substrate, and the dependence of their parameters on technological factors. Height of the under ink relief is 10–20 μm (for tested size of engraved recesses) or 40–60 % of the total height of the intaglio ink relief. The ink penetration depth into substrate is 8.0–24.3 μm , lateral ink penetration is 8.0–18.3 μm . Increasing the pressure of the intaglio printing nip increases the depth and lateral ink penetration into banknote substrate. Lateral ink penetration into the paper increases with increasing of paper sizing and decreasing of ink viscosity.

Keywords: banknote; banknote production; intaglio printing; steel engraving; printing nip; ink relief; printing area; non-printing area; engraved recess.

Вступ

Використання способу металографічного друку (інтагліодруку) на сьогодні є обов'язковим методом захисту банкнот та інших видів захищеної продукції у переважній більшості країн світу, оскільки саме цей спосіб забезпечує рельєфність елементів зображення, шорсткість яких відчувається на дотик (портрет, написи, цифрові позначення номіналу, мікротекст) [1–3]. Друкарські машини для інтагліодруку є обладнанням з обмеженим доступом, оскільки ця технологія використовується виключно для виготовлення цінних паперів.

Однією з технологічних особливостей інтагліодруку є високий тиск (до 1000 кН/м [4]) у зоні контакту формного і друкарського циліндрів. Це впливає не тільки на якість друку, але й на властивості основи банкноти, яка підлягає задруковуванню, зокрема на її міцнісні характеристики [4, 5]. Високий тиск у зоні друкарського контакту зумовлює характерне тиснення основи, в результаті чого відбувається ущільнення її волокон. Вплив тиску на папір під час інтагліодруку є аналогом каландрування паперу в процесі його виготовлення. Тиск каландрових валів є значно меншим і становить 80–100 кН/м, в окремих випадках – до 600 кН/м [6]. Швидкість інтагліодруку становить 85–95 м/хв, у той час як каландрування відбувається зі швидкістю 500–2000 м/хв [6]. Тобто каландрування паперу порівняно з інтагліодруком характеризується як значно нижчими лінійними навантаженнями, так і значно коротшим впли-

вом тиску, що прикладається, на папір. Однак якщо врахувати, що каландри включають 10–16 валів, то час впливу тиску на папір під час каландрування та інтагліодруку є співмірними.

Ще однією з особливостей інтагліодруку є використання густих фарб на основі органічних розчинників – восків. На шляху до формного циліндра температура фарби поступово підвищується: якщо у фарбових ящиках температура підтримується на рівні 17–21 °C, то шаблонні вали вже мають температуру близько 34 °C, збірний вал – 36 °C, а формний циліндр – 80–82 °C [5]. Система підігріву формного циліндра розтоплює фарбу (точніше – саме воскоподібну сполуку), що змінює її реологічні властивості (зменшується в'язкість та збільшується текучість), підвищуючи адгезію та проникнення в структуру основи. На шляху від фарбового ящика до формного циліндра в'язкість фарби зменшується на 45–80 Па·с [7]. Після задруковування основи інтагліодруком відбувається закріплення фарбового шару, найчастіше без використання додаткового сушіння: фарба знову застигає, утворюючи механічно міцний каркас фарбового рельєфу, розподілений по всій поверхні банкноти [8]. Однак фарба не тільки закріплюється на поверхні, але й проникає в папір і, опинившись усередині структури паперу, одночасно ущільнює основу, герметизує поверхню, забезпечує краший взаємозв'язок між волокнами. Інтагліодрук призводить частково до введення фарби у волокна паперу, одночасно виконуючи ущільнення просоченої полімером поверхні волокна. Поверхня паперу стає менш

сприйнятливою до забруднень і вологи [8]. Такі особливості інтагліодруку сприяють зміцненню основи банкнот [8, 9], підвищенню її стійкості до зношування. Проникнення фарби відбувається не тільки вглиб основи, але й частково за межі штриха (ефект шприца, чи "вусатість"). Це є характерною особливістю інтагліодруку, яка оцінюється фахівцями неоднозначно – і як ознака автентичності, захисна ознака, і як брак [9]. Має місце утворення ореолу – фільтрування пігменту і переважне проникнення в папір сполучників.

Таким чином, позитивний вплив на зміцнення банкнот має каландрувальний ефект інтагліодруку, а також скріплення волокон паперу під дією фарби, проникнення якої в основу відбувається під час закріплення її на відбитку. Можна припустити, що проникнення фарби в основу залежить від тиску та температури в друкарському контакті, в'язкості фарби, пористості паперу, виду та ступеня його проклеювання. Цей процес потребує додаткового вивчення. Тому існуюча схема формування фарбового рельєфу [8] потребує уточнення та корегування.

Постановка задачі

Мета дослідження полягає у з'ясуванні механізму формування фарбового рельєфу інтагліодруку.

Розроблення моделі формування фарбового рельєфу інтагліодруку

Гравійовані штрихи форми інтагліодруку зазвичай мають глибину 20–100 мкм, ширина їх визначається дизайном банкноти і перебуває приблизно в таких же межах.

Розглянемо взаємодію паперу, який задруковується інтагліодруком, з формою. Аналіз паралельного до напрямку руху перерізу формного та друкарського циліндрів у місці найбільшого зближення показує, що за рахунок деформування паперу та декеля через великий тиск утворюється ділянка, яка, власне, і є реальним друкарським контактом (рис. 1).

Розмір цього контакту можемо оцінити з таких міркувань. Тиск у друкарському контакті викликає ущільнення волокон основи, через що навіть на 2–3 мкм зменшується товщина задрукованого паперу поза межами друку [10]. Після зняття тиску відбувається декомпресія волокон паперу, тому, очевидно, в момент

друкарського контакту стиснення паперу є значно вищим. Таким чином, мінімальний теоретичний розмір контакту, з урахуванням діаметрів циліндрів (840 мм на машинах Super-Orlof-Intaglio) та зниження товщини паперу, становитиме 4–6 мкм, а реальний – на порядок більше. Це означає, що протягом друку різні ділянки паперу в друкарському контакті зазнають різного тиску та температурних впливів (рис. 2). На ділянки паперу (ділянки *AB*, *FG* (рис. 2)), які контактують із пробільними елементами форми, тиск впливає протягом усього часу друкарського контакту t_{nip} (рис. 2, *a*, *b*),

викликаючи ущільнення волокон. Дещо інший за часом вплив тиску на ділянки паперу, які контактують із друкувальними елементами (ділянка *CE*) (рис. 2, *в*).

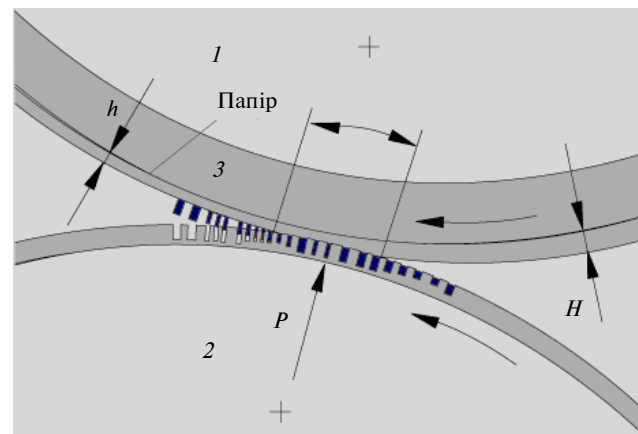


Рис. 1. Схема друкарського контакту друкарського (1) та формного (2) циліндрів: 3 – декель, *PN* – друкарський контакт, *H* – товщина паперу до друкарського контакту, *h* – товщина паперу після друкарського контакту, *P* – напрямок прикладення тиску в друкарському контакті

Як відомо, гравійовані штрихи форм інтагліодруку в результаті перенесення фарби зі збірного циліндра заповнюються фарбою не на повну глибину [1], через що фарба в штриху може змішуватися. Унаслідок цього в місці друкувального елемента волокна паперу деформуються, вигинаючись під дією тиску всередину штриха до моменту контакту із фарбою. Таким чином, відбувається формування підфарбового рельєфу (рис. 2, *д*).

Утворення рельєфу на папері з безфарбовим тисненням унаслідок відсутності фарби в гравійованих штрихах форми відбувається протягом усього часу друкарського контакту $t_{def} = t_{nip}$. Можна припустити, що й висота такого рельєфу вища, ніж підфарбового, оскільки

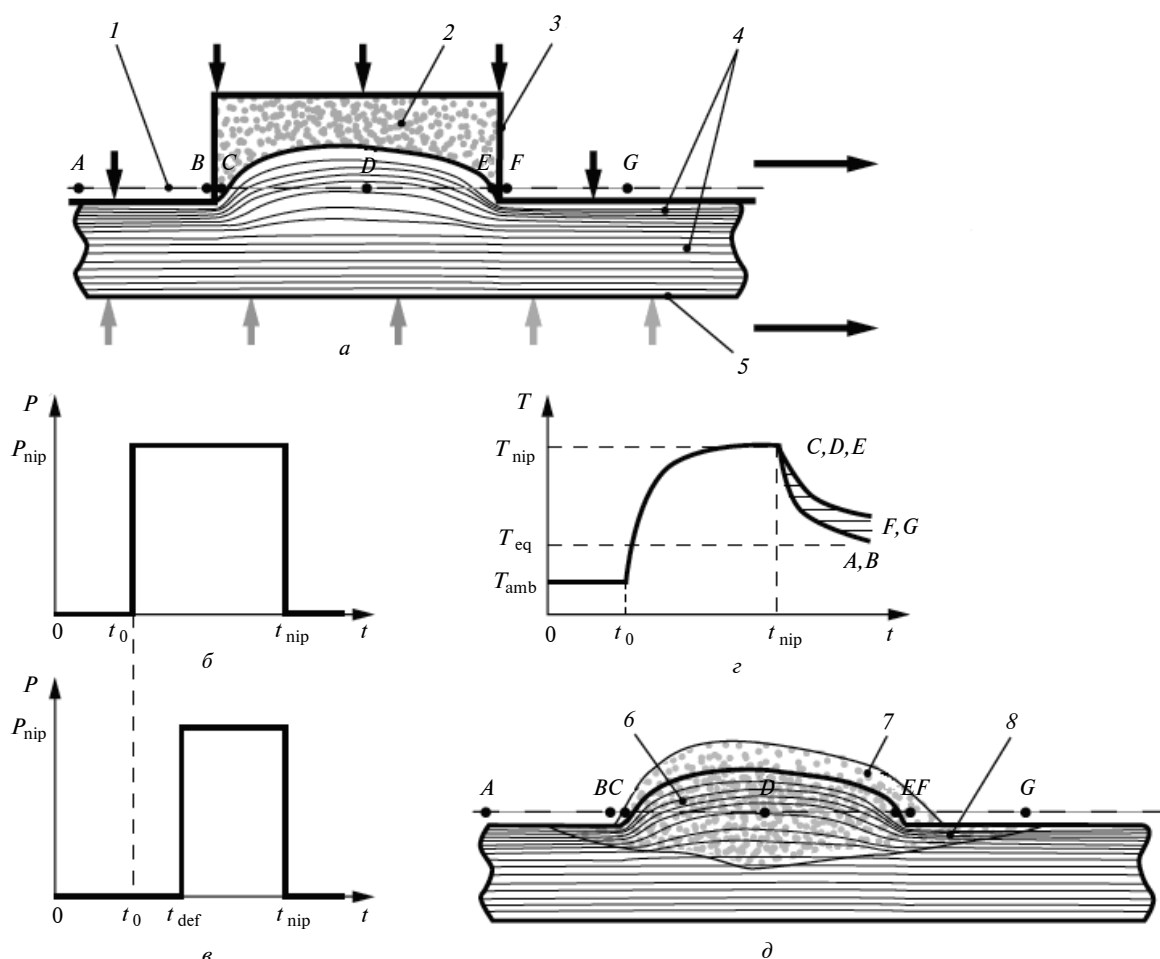


Рис. 2. Модель формування рельєфу інтаглідруку: *a* – друкарський контакт, *б* – тиск на ділянках пробільних елементів, *в* – тиск на ділянках друкувальних елементів, *г* – зміна температури на окремих ділянках, *д* – сформований рельєф; 1 – верхній бік паперу, 2 – фарба в гравійованому штриху, 3 – гравійований штрих форми, 4 – волокна паперу, 5 – нижній бік паперу – верхній бік декеля, 6 – підфарбований рельєф, 7 – фарбований шар, 8 – зона проникнення фарби

його утворення не обмежується фарбою, що заповнює гравійований штрих.

Аналіз залежності від часу температури в друкарському контакті в різних точках паперової основи (рис. 2, *г*) дає змогу зробити висновок, що ділянка *AB*, яка входить у друкарський контакт до гравійованого штриха, найшвидше охолоджується і набуває рівноважної температури T_{eq} , якої віддруковані аркуші набувають після виходу із зони друку (25-26 °С). Ділянка *CE*, яка безпосередньо контактує з друкувальним елементом, заповненим фарбою, набуває рівноважної температури T_{eq} найповільніше через процеси теплообміну із застигаючою фарбою. Ділянка *FG*, яка межує з друкувальним елементом, заповненим фарбою, набуває рівноважної температури T_{eq} дещо швидше,

ніж ділянка *CE*, однак повільніше, ніж ділянка *AB*, оскільки остання на момент потрапляння фарби на сусідню ділянку паперу вже почала охолоджуватися, а ділянка *CE* лише входить у друкарський контакт з доволі високою температурою. Ці особливості теплообміну на поверхні паперу пояснюють неоднакове бічне проникнення фарби: на ділянці до гравійованого штриха (*AB*) таке проникнення є меншим, ніж на ділянці після нього (*FG*), оскільки вплив підвищеної температури на останню є тривалішим.

Після контакту фарби в гравійованому штриху з папером відбувається перехід фарби на папір як за рахунок тиску в друкарському контакті, так і за рахунок значно більшої адгезії до паперу порівняно з адгезією до стінок штриха.

Експериментальне підтвердження моделі формування фарбового рельєфу інтагліодруку. Методика експериментальних досліджень

Для вивчення за допомогою світлової мікроскопії процесів проникнення фарби, нанесеної на папір офсетним друком та інтагліодруком, використано розроблену нами методику приготування препаратів паперу, що базується на методиках приготування гістологічних препаратів, модифіковану з урахуванням природи зразків [11]. Так, зразки паперу, на відміну від матеріалів біологічного походження, не потребують фіксації (обробки для запобігання розкладанню) та дегідратації. Також з урахуванням того, що метою досліджень є вивчення проникнення фарби в папір, фарбування зрізів не виконується. Розроблена методика включає розрізування задрукованих зразків паперу на смужки розміром 25×5 мм, їх заливання в парафін, мікротомування (різання на препарати товщиною до 5–7 мкм) та поміщення отриманих препаратів на предметне скло під покривне скло. Отримані в результаті зрізи паперу (рис. 3), задрукованого інтагліо- та офсетним й інтагліодруком, було досліджено у світлому полі за допомогою світлового мікроскопа виробництва Carl Zeiss (Німеччина) AxioStar Imager, облад-

наного цифровою камерою AxioCam ERc5s та системою візуалізації з програмним забезпеченням AxioVision Rel. 4.9.1 SP1, яка дає змогу проводити вимірювання в режимі on line. У процесі досліджень використовувалося збільшення $\times 100$ – 1000 . Глибина проникнення складників фарби в папір визначалася за допомогою аналізу отриманих зображень зрізів паперу вимірюванням уздовж вимірювальних ліній через рівні проміжки (кожні 2–5 мкм залежно від збільшення). Обробка зрізів у режимі on line системою візуалізації AxioVision Rel. 4.9.1 SP1 дає змогу виділити зони найвищої щільності та більш чітко визначити межі фарбового шару, підфарбового рельєфу та проникнення фарби в основу (рис. 3).

Для з'ясування меж бічного проникнення фарби було проведено дослідження задрукованих зразків візуальним вивченням зі збільшенням $\times 45$ за допомогою монокулярного цифрового мікроскопа МОЦ–45 МІКРОТЕХ із системою візуалізації з програмним забезпеченням Місам та подальшої фотофіксації інтегрованою цифровою камерою КММ–5 (1,3 Мпікс). Система візуалізації Місам дає змогу проводити вимірювання в режимі on line (рис. 4).

Такий комплекс досліджень дав можливість визначити особливості та межі проник-

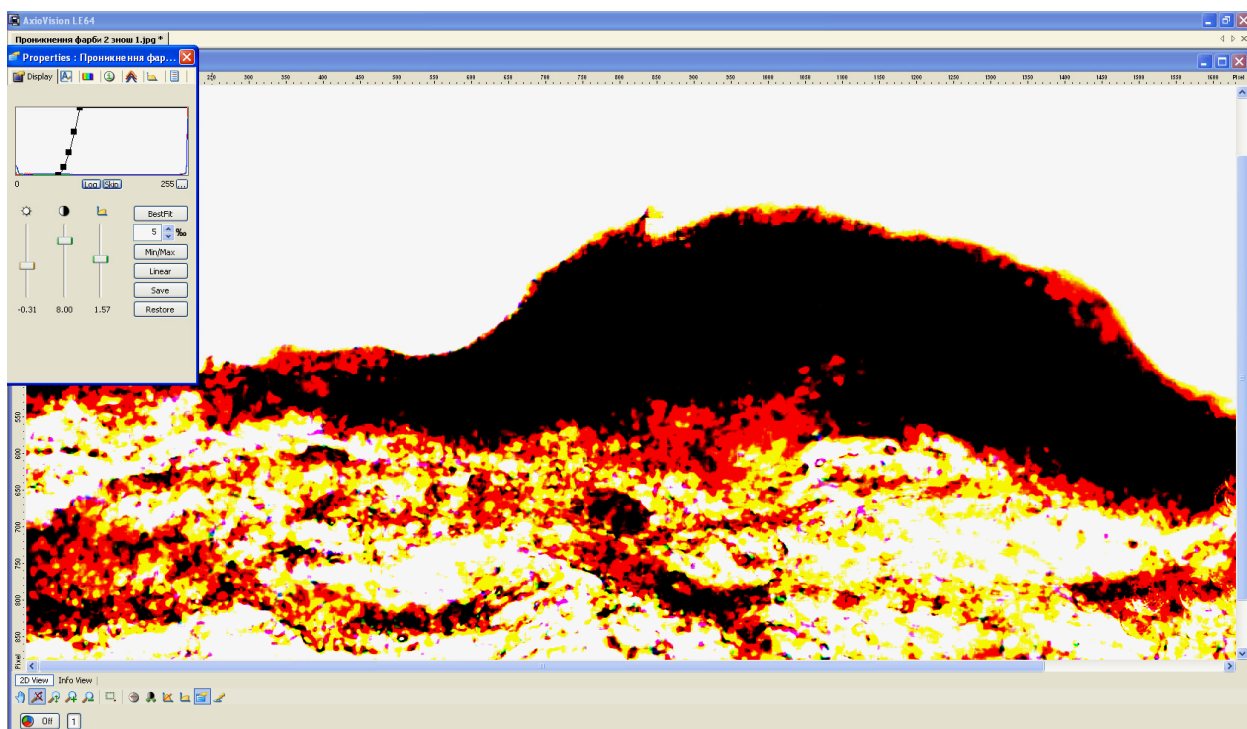


Рис. 3. Обробка зображення зрізу збільшенням контрасту та вимірювання в режимі on line системою візуалізації AxioVision Rel. 4.9.1 SP1

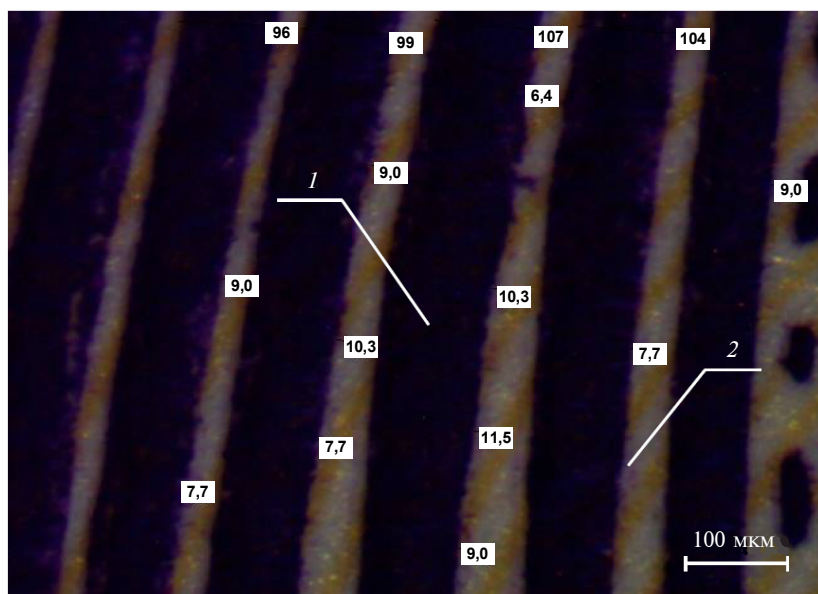


Рис. 4. Вид зверху паперу, задрукованого офсетним друком та інтагліодруком (верхній ряд цифр – ширина штриха, мкм, інші цифри – бічне проникнення фарби): 1 – фарбовий шар; 2 – бічне проникнення фарби; збільшення $\times 45$

нення фарби інтагліодруку для різних видів паперу, а також підтвердити модель формування фарбового шару інтагліодруку.

Результати експериментальних досліджень

Вигляд фарбового рельєфу. Вигляд усіх елементів фарбового рельєфу (фарбового шару, підфарбового рельєфу, ділянок вертикального та горизонтального проникнення фарби в папір (див. рис. 2, д)) можна чітко спостерігати на досліджуваних зрізах (рис. 5).

Цікавим є те, що підфарбовий рельєф – вигин волокон паперу всередину гравійованого

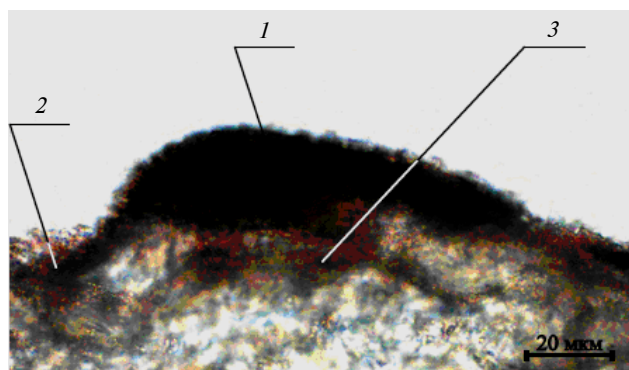


Рис. 5. Зріз паперу, задрукованого інтагліодруком: 1 – фарбовий шар, 2 – бічне проникнення фарби, 3 – проникнення фарби вглиб паперу; збільшення $\times 400$

штриха – видно лише на зіпсованих унаслідок відшарування фарби зрізах, оскільки на доброякісних зразках такий рельєф скритий фарбою, яка проникає в папір. Дослідження таких пошкоджених зразків дало змогу визначити висоту підфарбового рельєфу як 10–20 мкм (для досліджуваних розмірів гравійованих штрихів), що становить 40–60 % від висоти всього фарбового рельєфу інтагліодруку. Причому вигин волокон паперу є дещо більшим з боку першого по ходу краю друкувального елемента. Підфарбовий рельєф також чітко видно на ділянках безфарбового тиснення інтагліодруку (рис. 6).

Глибина проникнення фарби в папір під час інтагліодруку.

Результати досліджень глибини проникнення фарби в папір показують, що має місце збільшення глибини проникнення зі збільшенням поверхневої вбирності й зменшенням шорсткості та щільності паперу (табл. 1).

Під глибиною проникнення фарби будемо розуміти відстань від незадрукованої поверхні паперу до видимої межі зміни кольору паперу, встановленої за вимірюваннями в системі візуалізації AxioVision.

Тиск у друкарському контакті в табл. 1 подано у відносних оцінках (без розмірності) і позначено як мінімальний, середній та макси-

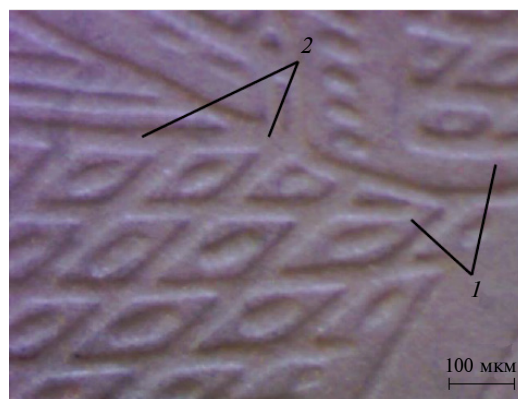


Рис. 6. Безфарбове тиснення паперу під час інтагліодруку: 1 – ділянки контакту з друкувальними елементами, 2 – ділянки контакту з пробільними елементами форми; збільшення $\times 45$

мальний, оскільки під час інтагліодруку регулювався збільшенням-зменшенням відстані між друкарським та формним циліндром відносно оптимального значення (позначено як "середній"), встановленого для друкування тиражної продукції.

Спостерігається також вплив тиску в друкарському контакті інтагліодруку: за більших значень тиску збільшується глибина проникнення фарби, особливо за максимального тиску. Офсетний друк перед інтагліо помітно зменшує глибину проникнення фарби внаслідок

певної герметизації поверхні паперу за рахунок проникнення в основу офсетної фарби [11].

Бічне проникнення фарби в папір під час інтагліодруку. Дослідження зрізів задрукованого інтагліодруком паперу показало, що бічне проникнення фарби є приблизно таким же, як углиб, хоча напрямок тиску в друкарському контакті є перпендикулярним до поверхні. Це пояснюється тим, що волокна і, відповідно, пори є орієнтованими переважно паралельно до поверхні основи. Результати досліджень бічного проникнення фарби в папір наведено в табл. 2.

Таблиця 1. Глибина проникнення фарби інтагліодруку для зразків банкнот із різних видів паперу

Папір	Т	Д		Дб	
Товщина, мкм	106 ± 2	110 ± 2		114 ± 2	
Маса, г/м ²	85,8	90,3		91,5	
Поверхнева вбирність води, г/м ² (Кобб ₆₀), верхній бік паперу	25,5 ± 1,0	12,4 ± 0,8		11,4 ± 1	
Шорсткість, мл/хв, верхній бік	337	377		428	
Офсетний друк	+	+	-	+	-
Тиск у друкарському контакті інтагліодруку: – мінімальний – середній – максимальний	Глибина проникнення фарби, мкм				
	12,4	8,3	11,6	-	-
	13,2	11,0	15,4	11,0	15,1
	24,2	15,4	22,0	-	-

Таблиця 2. Бічне проникнення фарби інтагліодруку

Папір		Фарба			Бічне проникнення фарби, мкм	
Вид	Поверхнева вбирність води, г/м ² (Кобб ₆₀)	Вид	Липкість, кДж	В'язкість, Па·с	Інтагліо	Офсет+інтагліо
Т	25,5	1	120	6,5	18,3	16,6
		2	125	6,9	-	-
		3	120	6,8	18,1	16,5
		4	126	7	18,1	16,2
		5	135	7,5	17,0	-
		6	142	7,8	16,4	14,2
С	29,5	1	120	6,5	-	-
		2	125	6,9	-	-
		3	120	6,8	18,2	17,0
		4	126	7	18,0	17,0
		5	135	7,5	16,8	16,0
		6	142	7,8	15,9	15,4
Д	12,4	1	120	6,5	10,5	-
		2	125	6,9	9,9	-
		3	120	6,8	-	-
		4	126	7	9,6	-
		5	135	7,5	9,3	8,9
		6	142	7,8	8,1	8,0

Дослідження бічного проникнення фарби інтагліодруку показує, що на цей процес найбільше впливають сорбційні властивості паперу, зокрема поверхнева вбирність: для паперу Д із вбирністю $12,4 \text{ г/м}^2$ (Кобб₆₀) проникнення фарби є майже вдвічі меншим, ніж для паперів із вбирністю $25,5\text{--}29,5 \text{ г/м}^2$ (Кобб₆₀). Така ж тенденція має місце і для проникнення фарби вглиб, однак вона не настільки виражена: для паперу Д із вбирністю $12,4 \text{ г/м}^2$ (Кобб₆₀) вертикальне проникнення фарби $11,0 \text{ мкм}$, тоді як для паперу Т із вбирністю $25,5 \text{ г/м}^2$ (Кобб₆₀) – $13,2 \text{ мкм}$.

Офсетний друк, виконаний до інтагліодруку, зменшує проникнення фарби як бічне, так і вглиб, що пояснюється певним ступенем заповнення пор паперу офсетною фарбою.

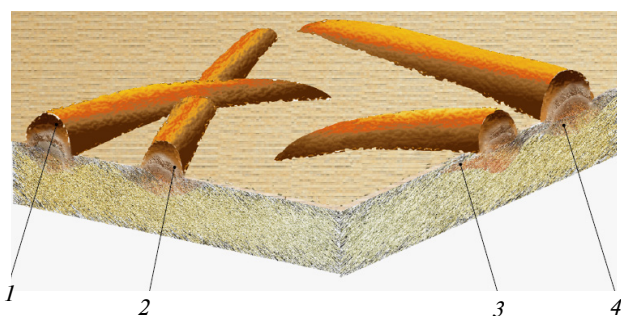


Рис. 7. Уточнене схематичне зображення розрізу основи зі сформованим фарбовим рельєфом інтагліодруку: 1 – фарбовий шар, 2 – підфарбовий рельєф, 3 – бічне проникнення фарби в папір, 4 – вертикальне (вглиб) проникнення фарби в папір

Проведений комплекс досліджень дав змогу розробити й експериментально підтвердити модель формування, уточнити вигляд елементів фарбового рельєфу інтагліодруку, їх положення на поверхні та в об'ємі основи банкноти, а також залежність їх параметрів від технологічних факторів інтагліодруку (рис. 7).

Висновки

У результаті теоретичного та експериментального дослідження процесів у друкарському

Список літератури

1. V. Ciaramella, "Intaglio printing", *Billetaria: Int. Rev. Cash Management*, is. 2, pp. 19–20, 2007.
2. *Interpol* Resolution no. AGN/67/RES/11: Proc. Currency Counterfeiting 9th Int. Conf., the ICPO-Interpol General Assembly, 67th session, Cairo, Egypt, October 22–27, 1998 [Online]. Available: <http://www.interpol.int>
3. R.L. van Renesse, *Optical document security*, 3rd ed. Boston, London: Artech House, 2005, 368 p.

контакті створено модель формування фарбового рельєфу інтагліодруку. Відповідно до моделі, рельєф інтагліодруку, що складається з фарбового шару, підфарбового рельєфу та ділянок вертикального і горизонтального проникнення фарби в основу, утворюється як результат спільної дії тиску в друкарському контакті, який прикладається дещо відмінно до різних ділянок паперу, та підвищеної до $80\text{--}82 \text{ }^\circ\text{C}$ температури формного циліндра і нагрітої до цієї ж температури фарби.

Експериментально підтверджено модель формування, уточнено вигляд елементів фарбового рельєфу інтагліодруку, їх положення на поверхні та в об'ємі основи банкноти, а також залежність їх параметрів від технологічних факторів інтагліодруку. Висота підфарбового рельєфу становить $10\text{--}20 \text{ мкм}$ (для досліджуваних розмірів гравійованих штрихів), чи $40\text{--}60 \%$ від висоти всього фарбового рельєфу інтагліодруку, глибина проникнення фарби в основу – $8,0\text{--}24,3 \text{ мкм}$, бічне проникнення фарби – $8,0\text{--}18,3 \text{ мкм}$.

Встановлено вплив тиску в друкарському контакті інтагліодруку на параметри фарбового рельєфу: за більших значень тиску збільшується глибина проникнення фарби; спостерігається незначне (до $2,5 \text{ мкм}$) збільшення висоти фарбового рельєфу; бічне проникнення фарби в папір збільшується зі зростанням поверхневої вбирності паперу (для паперу із вбирністю $12,4 \text{ г/м}^2$ (Кобб₆₀) проникнення фарби є майже вдвічі меншим, ніж для паперу із вбирністю $25,5\text{--}29,5 \text{ г/м}^2$ (Кобб₆₀)) та зі зменшенням в'язкості фарби (на $10\text{--}20 \%$ при зменшенні в'язкості з $7,8$ до $6,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$).

Офсетний друк, виконаний до інтагліодруку, зменшує проникнення фарби як бічне, так і вглиб, що пояснюється певним заповненням пор паперу офсетною фарбою.

Подальші дослідження доцільно буде спрямувати на математичне моделювання процесу формування фарбового рельєфу інтагліодруку з метою прогнозування його параметрів і їх залежності від технологічних факторів інтагліодруку.

4. *T. Kyrychok et al.*, "The influence of pressure during intaglio printing on banknotes durability", *Mechanika*, vol. 20, no. 3, pp. 327–331, 2014.
5. *Киричок Т.Ю., Гуца О.В.* Вплив металографічного друку на міцнісні характеристики банкнотного паперу // *Технологія і техніка друкарства*. – 2012. – № 2. – С. 4–10.
6. *H. Holik*, *Handbook of paper and board*. Wiley-VCH, 2006, 505 p.
7. *A. Fukuura*, "Intaglio printing ink", US Pat. 20120199029 A1, declared date Oct. 8, 2010, issued date Aug. 9, 2012.
8. *T. Crane*, "Some observation on technological developments in durable substrates", *Billetteria: Int. Rev. Cash Management*, is. 9, pp. 8–9, 2011.
9. *O. Gray*, "The Art and Science of Intaglio – the Cornerstone of Security Printing", *Currency News*, vol. 3, no. 2, pp. 8–9, 2005.
10. *Дослідження зміни характеристик зразків банкнот під час імітації зношування* / Т.Ю. Киричок, В.М. Нестеренко, Є.Г. Сухіна, О.В. Гуца // *Технологія і техніка друкарства*. – 2012. – № 4. – С. 4–25.
11. *Моделювання проникнення фарби в папір з водяними знаками під час офсетного друку* / Т.Ю. Киричок, Н.Л. Талімонова, В.І. Заріцька, А.І. Денисюк // *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. – 2012. – № 5. – С. 135–139.

Рекомендована Радою
Видавничо-поліграфічного інституту
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
3 листопада 2014 року