

УДК 655.001

**ВНУТРІШНІ НАПРУЖЕННЯ ТА ЇХ ВПЛИВ
НА МІЦНІСТЬ І СТРУКТУРУ
ФАРБОВОЇ МЕТАЛІЗОВАНОЇ ПЛІВКИ
ПОЛІГРАФІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

© А. С. Морозов, к.т.н., доцент, НТУУ «КПІ», Київ, Україна

В статье проанализированы факторы, которые обуславливают появление внутренних напряжений в полимерных пленках полиграфического назначения.

In an analysis of factors that cause the appearance of internal tensions in polymeric films tapes of the poly-graphic applying have been presented.

Постановка проблеми

До сучасних поліграфічних покриттів і задруканих матеріалів серед іншого висуваються вимоги високої адгезії. Одним із чинників, які обумовлюють таку характеристику, є внутрішні напруження. Вони з'являються на стадії отвердження металізованої фарби на підкладці в результаті дії на напівфабрикат полімерного матеріалу зовнішніх сил, тепло-, масо- і іонного обміну з навколишнім середовищем, неодноразово протікаючих в матеріалі фізичних і хімічних процесів, які супроводжуються зміною об'єму. Внутрішні напруження залишаються в поліграфічних покриттях після припинення дії вищезначених факторів і чинять певний вплив на полімерну плівку на протязі всього терміну експлуатації, покращуючі або погіршуючі технологічні характеристики плівки, в залежності від умов експлуатації. Нині відсутнє цілісне уявлення про особливості внутрішніх напружень у дисперснозміц-

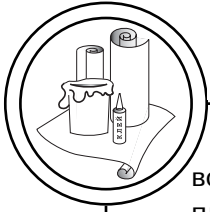
нюючих полімерних плівках, тому питання, що розглядається в даній роботі, є вельми актуальним.

Мета роботи

Метою роботи є аналіз фізико-хімічних, механічних і структурних параметрів, за допомогою яких можна контролювати і прогнозувати можливу появу остаточних напружень і таким чином впливати на міцнісні характеристики металізованих фарбових плівок.

Результати проведених досліджень

При контакті поліграфічної фарби з задруканим матеріалом на протязі процесу полімеризації завдяки утворенню нових хімічних зв'язків зменшується відстань між молекулами, отже, на 8-13 % менше зайнятий фарбою об'єм [1]. Якщо пластичності полімерної плівки для компенсації напружень недостатньо — погіршується адгезія фарбо-



ПОЛІГРАФІЧНІ МАТЕРІАЛИ

вого шару до основи. Структура плівки по перерізу неоднорідна і питомий об'єм в периферійних шарах і в центрі неоднаковий, що обумовлює додаткову складову — напруження від структурної неоднорідності. Процес отвердження зв'язуючого обумовлений трьохмірною просторовою структурою полімера і при цьому частина фізичних зв'язків, які існували між молекулами полімера, довжина яких складала — 5Å , замінюється хімічними зв'язками довжиною $1\text{-}2\text{Å}$.

Хімічна усадка полімерної фарбової плівки в процесі отвердження призводить до появи залишкових напружень в її шарах, що визначаються за формулами [1]:

$$\sigma_{1i}^{\text{CT}} = \bar{E}_{1i} \left(\begin{array}{l} \xi_x \cdot \cos^2 \varphi_i + \\ + \xi_y \cdot \sin^2 \varphi_i + \xi_{xy} \cdot \\ \cdot \cos \varphi_i \cdot \sin \varphi_i - \xi_{1i} \end{array} \right) + M_{21i} \left(\begin{array}{l} \xi_x \cdot \sin^2 \varphi_i + \\ + \xi_y \cdot \cos^2 \varphi_i - \xi_{xy} \cdot \\ \cdot \cos \varphi_i \cdot \sin \varphi_i - \xi_{2i} \end{array} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_{2i}^{\text{CT}} = \bar{E}_{2i} \left(\begin{array}{l} \xi_x \cdot \sin^2 \varphi_i + \\ + \xi_y \cdot \cos^2 \varphi_i - \xi_{xy} \cdot \\ \cdot \cos \varphi_i \cdot \sin \varphi_i - \xi_{2i} \end{array} \right) + M_{12i} \left(\begin{array}{l} \xi_x \cdot \cos^2 \varphi_i + \\ + \xi_y \cdot \sin^2 \varphi_i + \xi_{xy} \cdot \\ \cdot \cos \varphi_i \cdot \sin \varphi_i - \xi_{1i} \end{array} \right); \quad (2)$$

$$\tau_{12i}^{\text{CT}} = G_{121} \left(\begin{array}{l} (\xi_y - \xi_x) \cdot \\ \cdot \sin 2\varphi_i + \xi_{xy} \cdot \\ \cdot \cos 2\varphi_i \end{array} \right); \quad (3)$$

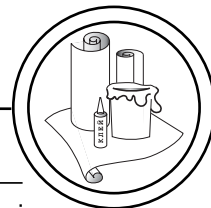
де ξ_x, ξ_y, ξ_{xy} — величини коефіцієнтів стягнення; $\bar{E}_{1i}, \bar{E}_{2i}$ — модулі пружності; M_{21i}, M_{12i} — коефіцієнти Пуасона; G_{121} — модуль зсуву; φ_i — кут, під яким зорієнтовані металеві пігменти у зв'язуючому; $\sigma_{1i}^{\text{CT}}, \sigma_{2i}^{\text{CT}}, \tau_{12i}^{\text{CT}}$ — залишкові напруження при усадці полімерної плівки.

При невеликому вмісті (10 %) наповнювача (металевих пігментів) в полімерній плівці навколо частинок наповнювача виявляється більш орієнтована і напружена структура, а забарвлення структури полімеру навколо зерен наповнювача нерівномірне і воно змінюється по перерізу від поверхні наповнювача до зовнішніх шарів плівки. Встановлено [2], що змінення кольору полімерної складової пов'язано з нерівномірним розподілом внутрішніх напружень. При цьому максимальні напруження проявляють себе в шарах, прилягаючих до поверхні наповнювача. При дії таких напружень в полімерній основі з'являються мікротріщини, які у деякій мірі послаблюють її зв'язок з металевими пігментами.

Рівноважний стан тіла з заданою структурою визначається, виходячи із умов мінімуму повного термодинамічного потенціала [2]:

$$F = U - \theta S + PV, \quad (4)$$

ПОЛІГРАФІЧНІ МАТЕРІАЛИ



де U — внутрішня енергія; θ — температура; S — ентропія; P — тиск; V — об'єм.

Умова зростання початкової поперечної тріщини довжиною l_0 розглядається з точки зору балансу пружної і вільної поверхневої енергії металізованої полімерної плівки [2]:

$$\sigma_G = X_0 \sqrt{\frac{\alpha E}{l_0}}, \quad (5)$$

де σ_G — порогове напруження руйнування за Гріффітсом (при $\sigma < \sigma_G$ тріщина збільшується, а при $\sigma > \sigma_G$ — ефект відсутній); E — модуль Юнга; α — питома вільна поверхнева енергія матеріалу; X_0 — коефіцієнт для крайових і внутрішніх напружень перебуває у діапазоні від 0,8 до 1,3.

Концентрацію напружень q поблизу тріщини можна оцінити формулою:

$$q = 2\sqrt{\frac{1}{r}}, \quad (6)$$

де l — довжина тріщини; r — радіус закруглення в її вершині [3].

Наприклад, якщо $r = 10$ мм, тобто тріщина гостра, то $l = 0,1$ мм, а $q = 200$; при $l = 1$ мм, $q = 600$. Іншими словами, напруження поблизу концентратора перевищуватимуть номінальні середні напруження відповідно в 200 і 600 разів.

В плівках з наповнювачем при деформації має місце більш рівномірне розподілення напружень в полімерній матриці, яка структурована додатково поверхнею часток металевих пігментів, спостерігається змінення характеру розповсюдження мікротріщин, збільшення їх хвилястості. Введення наповнювачів призводить до значного зміння внутрішніх напружень, як в процесі формування поліграфічного покриття, так і після завершення формування. Це пов'язано з перерозподілом дислокацій на границі дисперсної фази і матриці.

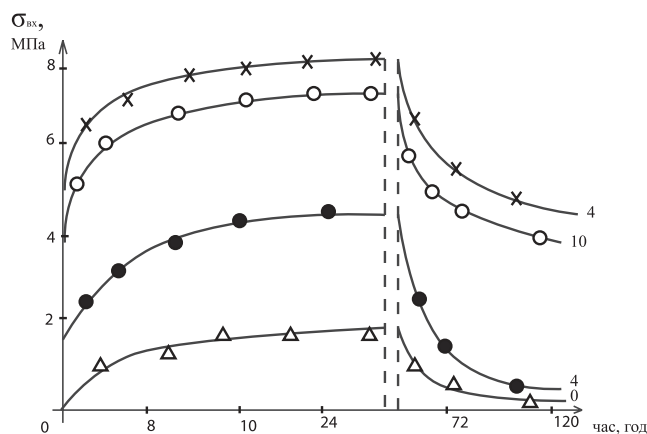
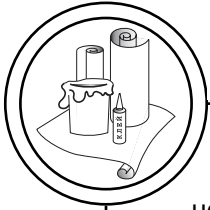


Рис. 1. Збільшення і релаксація внутрішніх напружень в полімерних покриттях з різним вмістом наповнювача [4]



ПОЛІГРАФІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Якщо пігменти доволі активно взаємодіють з полімерною основою, внутрішні напруження збільшуються унаслідок підвищення шорсткості молекул плівкоутворювача поблизу поверхні пігментних частинок і уповільнення релаксаційних процесів в покритті на стадії отвердження (рис. 1) [4]:

Сама поверхня полімерної плівки може бути джерелом дислокацій за рахунок утворення дислокаційного кільця. Специфічна роль поверхні у розмноженні дислокацій полягає у тому, що вона, являючи собою потужне джерело і стік вакансій, інтенсифікує процеси переповзання лінійних дефектів. Це, в свою чергу, призво-

дить до утворення поверхневих джерел, при активації яких відбувається ковзання дислокаційної лінії. Існування на поверхні металізованої плівки мікровиступу з радіусом кривини ребра атомного розміру незалежно від висоти самого виступу створює за рахунок сил поверхневого натягу локальну концентрацію напружень порядком теоретичної міцності, що направлені вглиб матеріалу.

Розглянемо енергетичні особливості найбільш розповсюдженої схеми гетерогенного зародження дислокацій — утворення їх поблизу поверхневих виступів. Можлива схема генерації дислокації поверхневими виступами надана на рис. 2 [5].

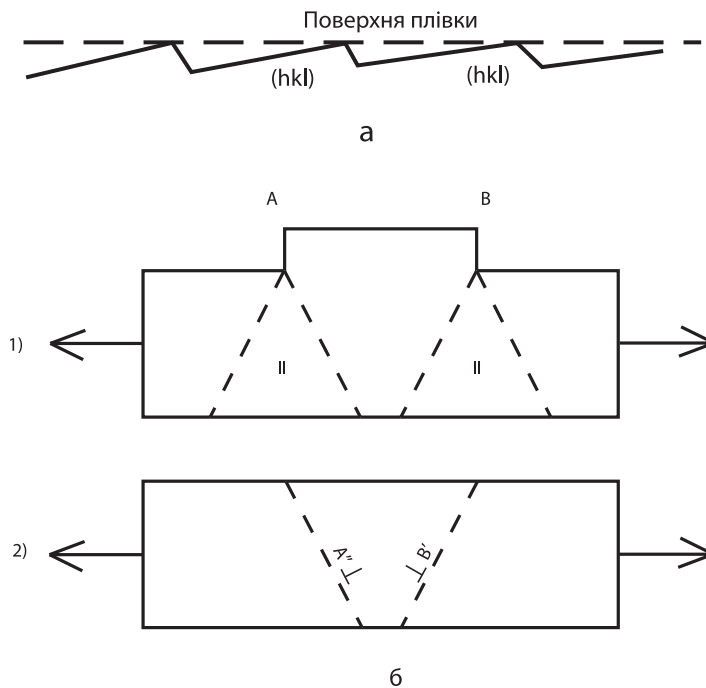
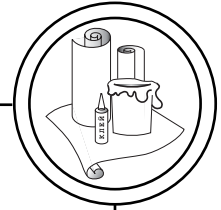


Рис. 2. Схематичне зображення поверхні металізованої плівки (а) і схема утворення дислокацій із моноатомних сходинок на поверхні покриття (б) [5]

ПОЛІГРАФІЧНІ МАТЕРІАЛИ



Сходинки різних знаків А і В перетворюються при розтязі мікрооб'єму полімеру в дислокації А' і В'' у різних системах ковзання I і II. Моноатомна сходинка на поверхні здатна утворювати не тільки поодинокі дислокації, але і при певних умовах може діяти як джерело множини дислокацій по двох системах ковзання. Коефіцієнт концентрації напружень К на сходинці росту визначається формулою:

$$K = 1 + \alpha \left(\frac{a}{r} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

де a — висота сходинки; r — радіус кривини її основи; α — постійний коефіцієнт [5].

Треба додати, що поверхневий натяг прагне ліквідувати моноатомний виступ, оскільки це пов'язано з виграшем енергії $\gamma \times \alpha$, де γ — вільна поверхнева енергія, яка чисельно дорівнює величині поверхневого натягу Γ ; a — висота сходинки.

На поверхні полімерної плівки після процесу отвердження є в достатній кількості мікротріщини, які обумовлені різним походженням. Якщо при певних умовах здійснюється адсорбція поверхнево-активних речовин або випадкове попадання рідини із агресивного середовища, активні молекули досягають місць, де зазор дорівнює розміру однієї-двох молекул, адсорбційний шар своїм тиском намагається розкрити тріщину (ефект Ребіндера) [6]. Тиск при цьому на стінці тріщини може досягати до 100 МПа (рис. 3).

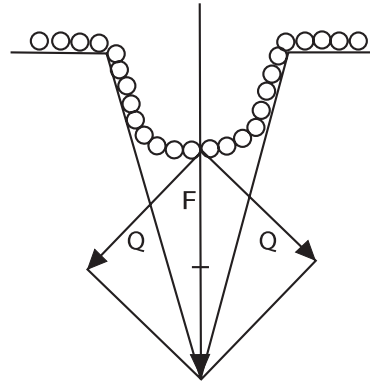


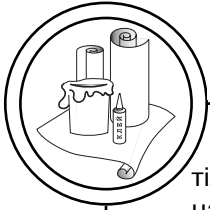
Рис. 3. Схема адсорбційно-розклинюючої дії молекул ПАР (F — тиск адсорбційного шару; Q — розклинюючі сили)

Локальні напруження в твердих покриттях частіше усього являються центрами адсорбції. Вони пов'язані з лініями дислокацій, які знаходяться у стані високого поверхневого напруження і хімічний потенціал настільки великий, що речовина може виходити за межі дислокації, залишаючи за собою порожнину.

Треба відмітити, що практичним засобом зменшення внутрішніх напружень в покриттях поліграфічного призначення є введення наповнювачів, що мають коефіцієнт лінійного термічного розширення, який дорівнює тим самим значенням, як і для задрукованого матеріалу.

Висновки

Підводячи підсумки, можна відзначити, що проведений аналіз дозволяє намітити практичні шляхи зниження внутрішніх напружень, спростувати загальноприйняті уявлення про те, що підвищення взаємодії між структурними елементами полімерної системи повинно приводити



ПОЛІГРАФІЧНІ МАТЕРІАЛИ

тільки до зростання внутрішніх напружень, а також дозволяє цілеспрямовано зменшувати внутрішні напруження при створенні нових полімерних матеріалів, зокрема, полімерних покриттів і других наповнених систем. При створенні нових таких систем треба підбирати теплофізичні параметри дисперсної фа-

зи і матриці в близьких інтервалах, що обумовить кращу адгезію металізованої фарби і задрукованої основи. Подальші дослідження будуть спрямовані на виявлення закономірностей зародкоутворювання внутрішніх напружень при контакті друкарської фарби і підложки із різних матеріалів.

1. Основы механики и технологии композиционных материалов / [Фрегер Г. Е., Аптекар М. Д., Игнатьев Б. Б., Чесноков В. В. и др.]. — К : Аристей, 2004. — 520 с. 2. Липатов Ю. С. Межфазные явления в полимерах / Ю. С. Липатов. — К. : Наукова думка, 1980. — 275 с. 3. Дяченко С. С. Фізичні основи міцності та пластичності металів / С. С. Дяченко. — Харків, 2003. — 226 с. 4. Пахаренко В. А. Переработка полимерных композиционных материалов / В. А. Пахаренко, Р. А. Яковлева, А. В. Пахаренко. — Киев : Воля, 2006. — 550 с. 5. Алехин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / В. П. Алехин. — Москва : Наука, 1983. — 279 с. 6. Латышев В. Н. Повышение эффективности СОЖ / В. Н. Латышев. — Москва : Машиностроение, 1985. — 64 с.

Рецензент — Т. А. Роїк, д.т.н.,
професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 08.03.10