

# ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРИРОВАНИЯ В АДГЕЗИОННОМ СЛОЕ ПРИ СОЗДАНИИ ЛАМИНИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

Сайфуллин Э.Р.<sup>1,a</sup>, Князева А.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 36, 634050*

<sup>2</sup> *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/4, 634055*

<sup>a</sup> E-mail: elmir.saifullin@mail.ru

## Введение

Процесс создания трехмерных объектов в технологии laminated object manufacturing (LOM) заключается в последовательном, послойном соединении листовых материалов. Технологический процесс включает в себя несколько стадий: предварительное создание в САД-системе модели определенной геометрической формы; придание листовому материалу заданной формы при помощи лазера; соединение листовых материалов путем применения адгезионного слоя и прокатывании нагретого ролла по поверхности верхнего слоя материала. Благодаря данному технологическому процессу технологию LOM относят как к аддитивным, так и к субтрактивным способам создания материалов. Однако к последнему относится только придание лазером нужной формы листовому материалу.

Первоначально метод LOM применялся для производства изделий из бумаги и дерева. Преимущества технологии, такие как высокая скорость производства, низкий температурный порог, незначительное деформирование и низкие остаточные напряжения в готовом изделии, повлияли на быстрое развитие LOM. Например, в работах [1] исследуется возможность соединения металлических фольг. Результаты исследования возможности соединения керамических материалов представлены в [2]. Возможность использования в технологии низких температур позволяет применять метод для соединения полимерных материалов, также метод LOM применяется в сфере строительства и микроэлектроники.

При этом расширяется не только разновидность применяемых материалов, но и совершенствуется сам технологический процесс. В работе [3], используя метод LOM, комбинируют соединение целлюлозного волокна с полимерными добавками для получения прекерамической бумаги, а в методе, названном The Composite Metal Foil Manufacturing (CMFM) металлические фольги совместно соединяют с другими финальными соединительными материалами [4].

Несмотря на существование множества исследований, малоизученными остаются процессы, происходящие непосредственно в адгезионном слое. Данные физические процессы приводят к протеканию химических реакций, формированию новых структур, выделению или поглощению тепла в слое клея. В работе [5] предложена и подробно изучена теплофизическая модель с химически активным адгезионным слоем.

В данной статье исследуется влияние технологических параметров (температура и скорость движения ролла, давление прижатия) на эволюцию степени структурных превращений в слое клея. За основу взята модель [5], однако вместо химических реакций анализируются структурные превращения.

## Постановка задачи

Исследуется модель соединения двух инертных слоев материала с использованием адгезионного слоя. Как показано на рисунке 1, по поверхности инертного слоя А движется нагретый ролл радиуса ( $R_0$ ) с заданной линейной скоростью.

При движении ролла в области контакта ролла и инертного слоя А возникает максимальное напряжение, определяющееся по формуле [6]:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{P}{2R_0(\alpha_1 + \alpha_2)}}. \quad (1)$$

Полуширину площадки контакта определяют из выражения (2):

$$s = 0,789\sqrt{2PR_0(\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (2)$$

Здесь  $\alpha_1 = (1 - \nu_k^2)/E_k$ ,  $P$  – давление прижатия,  $E_k$ ,  $\nu_k^2$  – модули упругости и коэффициенты Пуассона контактирующих материалов.

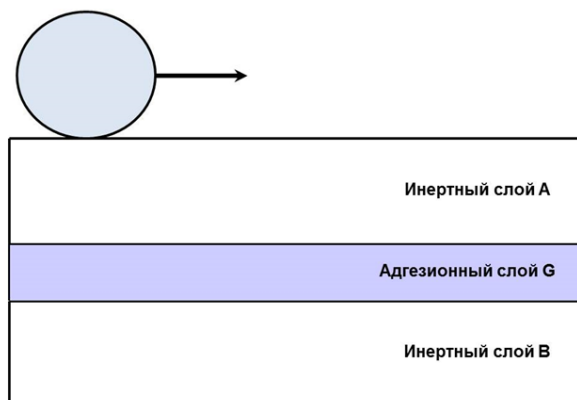


Рисунок 1. Иллюстрация к постановке задачи

Поле температуры находится из решения сопряженной задачи теплопроводности, включающей уравнения

$$c_k \rho_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k \left[ \frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_k}{\partial y^2} \right]. \quad (3)$$

для инертных слоев  $k = A, B$ ,

$$c_G \rho_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( 1 + a \left\{ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right\} \right) \frac{\partial T_G}{\partial x} \right) + \lambda_2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \left( 1 + a \left\{ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right\} \right) \frac{\partial T_G}{\partial y} \right) + W. \quad (4)$$

для адгезионного слоя G. Здесь  $c_k$ ,  $\rho_k$ ,  $\lambda_k$  – теплоемкость, плотность и коэффициенты теплопроводности соответствующих слоев;  $x, y$  – пространственные координаты;  $t$  – время;  $W$  – объемный источник тепла вследствие химических реакций,  $Y$  – степень превращения в реакции;  $a$  – степень структурных превращений.

Структурные превращения в адгезионном слое описываются уравнением:

$$\frac{da}{dt} = Y[k_2(1-a) - k_1a]. \quad (5)$$

где  $\varphi(Y)$  – кинетическая функция, отражающая механизм химической реакции на микроуровне,  $E$  – энергия активации,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $k_1, k_2$  – константы скорости обратной и прямой реакции структуризации. На границах раздела зададим условия идеального контакта (на границах раздела равны температуры слоев и их потоки тепла):

$$y = H_B: \quad \lambda_B \frac{\partial T_B}{\partial y} = (\lambda_2(1-a) + \lambda_1a) \frac{\partial T_G}{\partial y}, \quad T_B = T_G, \quad (6)$$

$$y = H_B + H_G: \quad (\lambda_2(1-a) + \lambda_1 a) \frac{\partial T_G}{\partial y} = \lambda_A \frac{\partial T_A}{\partial y}, \quad T_G = T_A. \quad (7)$$

На нижней и боковых поверхностях имеем условие адиабатичности. При  $y = H_B + H_G + H_A$  в зоне соприкосновения нагретого ролла с поверхностью инертного слоя А имеем:

$$T_A = T_S, \quad \text{если} \quad vt + x_0 - s(P) \leq x \leq vt + x_0 + s(P), \quad (8)$$

вне зоны соприкосновения ролла

$$\partial T_A / \partial y = 0, \quad \text{если} \quad x \leq vt + x_0 - s(P) \quad \text{и} \quad x \geq vt + x_0 + s(P).$$

Система (1)-(8) замыкается начальными условиями  $t = 0: T = T_0, a = 0$ .

Требуется рассчитать поле температуры и степень структурных превращений в слое G при варьировании технологических параметров установки.

### Безразмерные переменные

Для качественного исследования переменных необходимо перейти к безразмерным переменным:

$$\theta_k = \frac{T_k - T_S}{RT_S^2} E; \quad \xi = \frac{x}{H_G}; \quad \eta = \frac{y}{H_G},$$

где  $T_S$  – температура ролла,  $E$  – энергия активации прямой реакции структуризации;  $H_G$  – высота адгезионного слоя,

$$t_a = (z_0)^{-1} \exp\left(\frac{E}{RT_S}\right) -$$

время, в течение которого полностью завершается прямая реакция в адиабатических условиях.

Тогда система (1)-(8) примет вид

$$K_{Ck} \frac{\partial \theta_k}{\partial \tau} = \frac{K_{\lambda k}}{\delta} \left[ \frac{\partial^2 \theta_k}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta_k}{\partial \eta^2} \right], \quad k = A, B, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta_G}{\partial \tau} = \frac{1}{\delta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ ((1-a) + \kappa a) \frac{\partial \theta_G}{\partial \xi} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ ((1-a) + \kappa a) \frac{\partial \theta_G}{\partial \eta} \right] \right] + \bar{W}, \quad (10)$$

$$\frac{da}{d\tau} = Y[\gamma_2(1-a)\varphi_2(\theta, \sigma) - \gamma_1 a \varphi_1(\theta, \sigma)]. \quad (11)$$

Здесь

$$\phi_1(\theta, \sigma) = \exp\left(\pi_1 \sigma + \frac{1 + \beta \theta - \varepsilon_{12}}{\beta(1 + \beta \theta)}\right); \quad \phi_2(\theta, \sigma) = \exp\left(\pi_2 \sigma + \frac{\theta}{1 + \beta \theta}\right).$$

Граничные условия вдоль оси  $O\xi$ :

$$\xi = 0, \quad \xi = \bar{L}: \quad \frac{\partial \theta_k}{\partial \xi} = 0; \quad k = B, G, A$$

на границах соединяемых слоев В, А, G:

$$\eta = 0: \quad \frac{\partial \theta_B}{\partial \eta} = 0;$$

$$\eta = \Delta_B: \quad K_{\lambda B} \frac{\partial \theta_B}{\partial \eta} = ((1-a) + \kappa a) \frac{\partial \theta_G}{\partial \eta}, \quad \theta_B = \theta_G;$$

$$\eta = 1 + \Delta_B: \quad ((1-a) + \kappa a) \frac{\partial \theta_G}{\partial \eta} = K_{\lambda A} \frac{\partial \theta_A}{\partial \eta}; \quad \theta_G = \theta_A.$$

В зоне контакта ролла с поверхностью слоя А:

$$\eta = 1 + \Delta_B + \Delta_A: \quad \theta = 0 \quad \text{если} \quad \omega\tau + \xi_0 - \xi_A \leq \xi \leq \omega\tau + \xi_0 + \xi_A;$$

$$\frac{\partial \theta_A}{\partial \eta} = 0 \quad \text{если} \quad \xi \leq \omega\tau + \xi_0 - \xi_A \quad \text{и} \quad \xi \geq \omega\tau + \xi_0 + \xi_A.$$

Задача включает безразмерные параметры:

$$\bar{L} = \frac{L}{H_G}, \quad \xi_0 = \frac{x_0}{H_G}, \quad \xi_A = \frac{s(P)}{H_G}, \quad \omega = \frac{vt_a}{H_G},$$

$$K_{CB} = \frac{c_B \rho_B}{c_G \rho_G}, \quad K_{CA} = \frac{c_A \rho_A}{c_G \rho_G}, \quad K_{\lambda B} = \frac{\lambda_B}{\lambda_2}, \quad K_{\lambda A} = \frac{\lambda_A}{\lambda_2}, \quad \kappa = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \quad \delta = \frac{c_G \rho_G H_G^2}{\lambda_2 t_a},$$

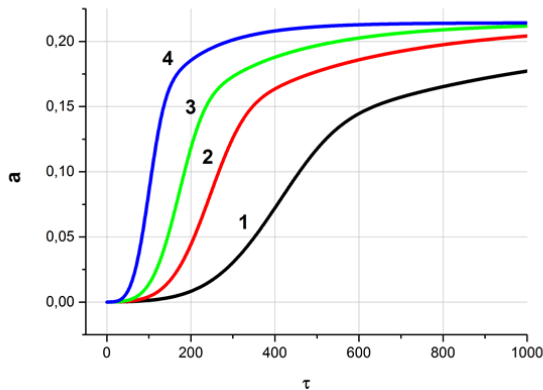
$$\varepsilon_{12} = \frac{E_1}{E_2}, \quad \gamma_1 = \frac{k_{10}}{z_0}, \quad \gamma_2 = \frac{k_{20}}{z_0}, \quad \beta = \frac{RT_s}{E_2}, \quad \pi_1 = p_1 p^*, \quad \pi_2 = p_2 p^*.$$

Начальные условия:

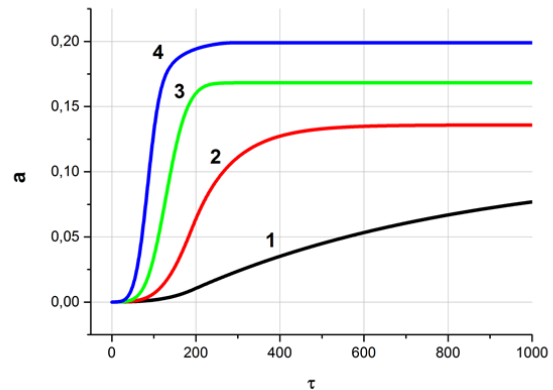
$$\tau = 0: \quad \theta_k = \theta_0, \quad Y = 0, \quad a = 0.$$

### Исследование

Исследуем влияние технологических параметров процесса на величину степени структурных превращений. Примем, что ролл неподвижен. При увеличении давления прижатия ролла, увеличивается степень структурных превращений, как показано на рисунке 2. Для давления прижатия ролла, равном 0,5, значение степени структурных превращений, равное 0,20, достигалось за время  $\tau = 1000$ . Аналогичное значение степени структурных превращений было достигнуто за  $\tau = 500$  при давлении ролла, равном 5 (см. рисунок 2а). Интересным является влияние скорости движения ролла на процессы структуризации в слое клея. Зафиксируем, величину давления прижатия ролла, равной 0,5. При заданной скорости движения ролла  $\omega = 0,0125$  степень структурных превращений достигает максимального значения 0,1625 (рисунок 2б, кривая 3) за  $\tau = 200$ . Однако при неподвижном ролле за  $\tau = 200$  величина степени структурных превращений равна всего 0,125 (рисунок 2а, кривая 3). Причем степень структурных превращений продолжает расти до 0,20.



а) Ролл неподвижен



б) Ролл движется со скоростью  $\omega = 0,0125$

Рисунок 2. Эволюция по времени величины степени структурных превращений при различных значениях давления прижатия: 1 –  $\pi = 0,005$ ; 2 –  $\pi = 0,05$ ; 3 –  $\pi = 0,5$ ; 4 –  $\pi = 5$

Полученные результаты наталкивают на необходимость более подробного изучения влияния скорости движения ролла на процесс структуризации. Для этого зафиксируем величину давления прижатия равной 0,05, варьируя скорость линейного движения ролла как показано на рисунке 3. С увеличением скорости движения ролла степень структурных превращений уменьшается. Например, величина степени структурных превращений падает с  $a = 0,2$  при  $\omega = 0,0025$  до  $a = 0,11$  при  $\omega = 0,025$ .

Сравнение распределения значения степени структурных превращений при скорости ролла равной 0 и 0,007 показывает, что при заданной скорости движения ролла наблюдается более быстрое протекание прямой реакции структуризации (Рис. 4, 5); обратная реакция может и не наблюдаться. Это зависит от соотношения параметров. Скорость движения ролла влияет как на скорость протекания реакции структуризации, так и на значение максимальной степени структурных превращений.

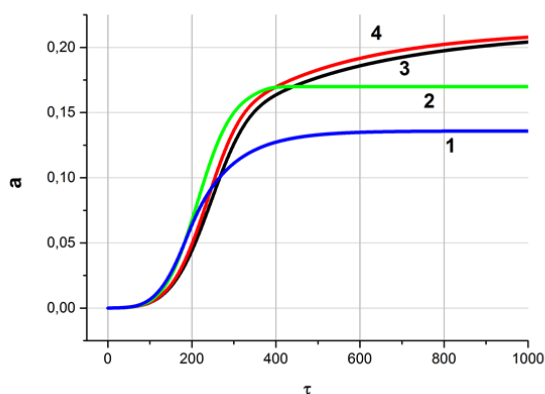


Рисунок 3. Эволюция величины степени структурных превращений при разных значениях скорости движения ролла:  
 1 –  $\omega = 0,025$ ; 2 –  $\omega = 0,0125$ ;  
 3 –  $\omega = 0,0025$ ; 4 –  $\omega = 0$

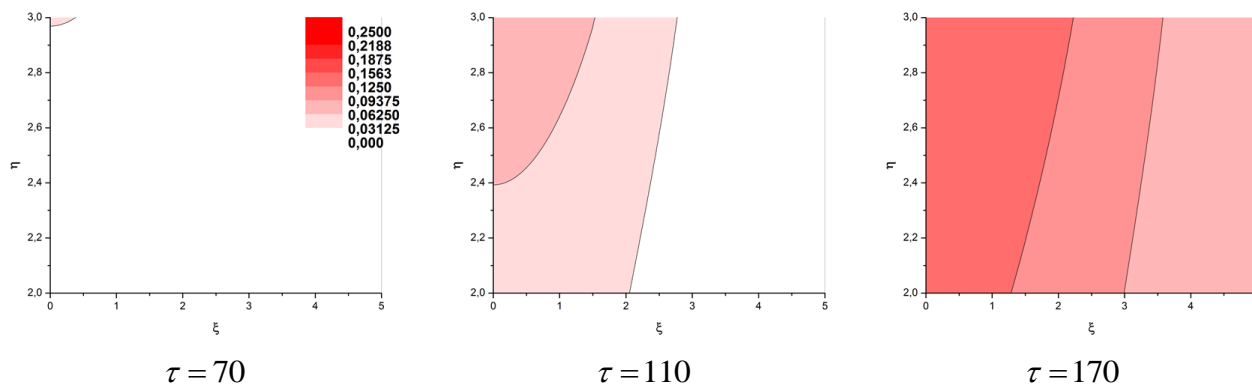


Рисунок 5. Распределение величины степени структурных превращений при неподвижном ролле

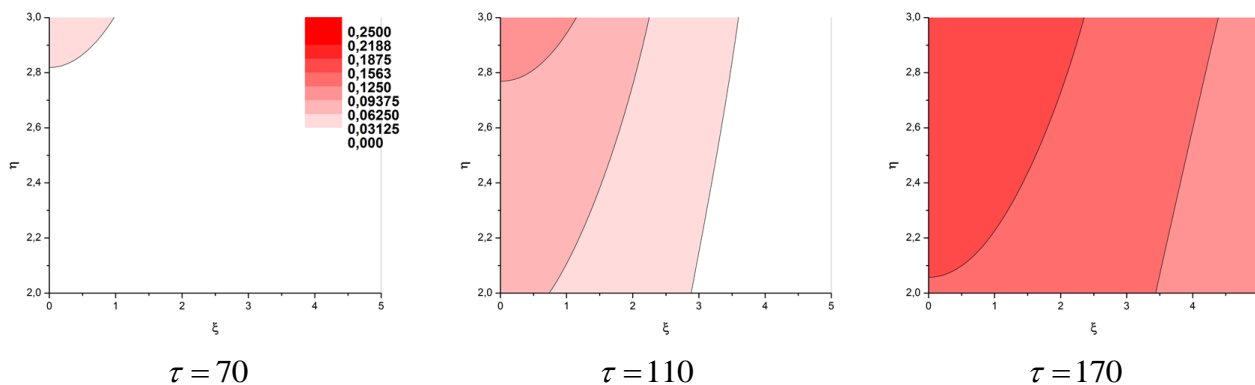


Рисунок 6. Распределение величины степени структурных превращений при скорости движения ролла  $\omega = 0,007$

## **Заключение**

Таким образом, в работе построена математическая модель структурных превращений в адгезионном слое, учитывающая прямую и обратную стадии. Модель реализована численно. Выделены наиболее важные технологические параметры, такие как давление прижатия и скорость движения ролла, влияющие на протекание реакции структуризации в слое клея. В ходе численных экспериментов выявлено, что увеличение давления прижатия ролла приводит к увеличению степени структурных превращений в слое клея, поскольку обратная реакция либо не успевает начаться, либо быстро прекращается. Однако влияние скорости линейного движения не столь однозначно, поскольку скорость движения ролла приводит к ускорению протекания реакции структуризации, но одновременно может ограничить максимальное ее значение.

## **Список литературы**

1. Precht M., Otto A., Geiger M. Rapid Tooling by Laminated Object Manufacturing of Metal Foil / *Adv. Mater. Res.* – 2015. – Vol. 6-8., P. 303-311.
2. Weisensel L., Travitzky N., Greil P. Advanced Laminated Object Manufacturing (LOM) of SiSiC Ceramics / *Proceedings of the 15th Solid Freedom Fabrication Symposium.* – 2014. – P. 1-15.
3. Travitzky N., Windsheimrer H., Fey T., and Greil P. Preceramic Paper-Derived Ceramics / *J. Am. Ceram. Soc.* – 2008. – P. 3477-3492.
4. Butt J., Mebrahtu H., Shirvani H. A novel rapid prototyping process for the production of metal parts / *Proceedings of the Second International Conference on Advances in Civil.* – 2014. – P. 26-29.
5. Knyazeva A.G. Model of chemical conversion initiation in the adhesive bonding layer during roll motion in the process of laminated object creation / *Nanoscience and Technology: An International Journal.* – 2018. – Vol. 9, Iss. 1. – P.77-89.
6. Бигер И.А., Шорп Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. / *Справочник.* – М: Машиностроение. – 1993, 640 с.

# INFLUENCE OF PROCESS-DEPENDENT PARAMETERS ON STRUCTURAL TRANSFORMATION IN THE ADHESIVE LAYER

**E.R. Saifullin**<sup>1,a</sup>, **A.G. Knyazeva**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *National Research Tomsk State University, Lenin Ave., 36, 634050, Tomsk, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Strength Physics and Materials Scienc SB RAS*

*pr. Akademicheskii, 2/1, 634055, Tomsk, Russia*

<sup>a</sup> E-mail: elmir.saifullin@mail.ru

Laminated object manufacturing (LOM) is a process of creating three-dimensional objects from sheets of different materials. The technological process of creation objects roughly can be divided on three main stages. The first, development 3D-model of the object with certain geometric shape in CAD-system. The second, clipping waste material using a laser. The third, bonding finished sheets with adhesive layer by LOM machine. Initially, the LOM method was used for manufacturing paper and wooden products. The advantages of technique (such as high fabrication speed, low warping and internal stresses, variety of organic and inorganic materials) have influenced to rapid development of LOM. The possibility of combining metal foil was investigated by Precht et al [1]. Moreover, Weisensel et al (2014) tried to adopt LOM technology for ceramic materials [2]. The possibility of using low-temperature in technology allows joining polymeric materials; also LOM method is used in construction and microelectronics. At the same time researches work on improvement of technological process itself. For example, the principles of creating preceramic paper were investigated in [3]. Furthermore, mixing metal foil with other final joining operation was described in paper [4], and named Composite Metal Foil Manufacturing (CMFM). In spite of numerous studies, the process occurring in adhesive layer was not explored enough, but it leads to heat adsorption or release, and structural transformation.

This article examines the effect of process-dependent parameters (temperature, speed, and nip-force of the roll) on the evolution of structural transformation in the adhesive layer. The mathematical model from [5] was taken as a basis model.

The model was implemented numerically. In the course of numerical experiments, it was revealed that an increase of nip-force of the roll leads to an increase in the magnitude of the degree of structural transformations in the adhesive layer. However, the influence of the linear motion speed is not so unambiguous, since the speed of the roll movement accelerates the structuration reaction, but at the same time can limit its maximum value.