

DOI: [10.7242/1999-6691/2022.15.1.1](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.1.1)
УДК 536.46

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРИЗАЦИИ В АДГЕЗИОННОМ СЛОЕ ПРИ СОЗДАНИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБЪЕКТОВ

Э.Р. Сайфуллин¹, А.Г. Князева²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Российская Федерация

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Российская Федерация

В настоящей работе предложена теплофизическая модель структуризации в слое клея при создании изделий методом ламинирования. Моделирование заключается в решении трехслойной сопряженной задачи теплопроводности. Тепловой контакт между слоями считается идеальным. Предполагается, что активируемая в промежуточном слое (слое клея) структуризация может приводить к изменению коэффициента теплопроводности клея. Управление процессом ламинирования осуществляется горячим роллом с заданным радиусом и фиксированной температурой. Ролл движется по внешней поверхности с постоянной скоростью; усилие прижатия ролла к поверхности определяет размер области контакта и максимальные действующие напряжения, которые известны из решения контактной задачи и в предлагаемой модели являются параметрами. Структуризация представляется как обратимая реакция, скорости прямой и обратной стадий которой зависят от температуры и действующих напряжений. Задача реализуется численно. Тепловая задача решается с использованием разностной схемы расщепления по координатам и метода прогонки, кинетическая – с помощью полуявного метода Эйлера. Рассчитываются поля температуры и степени структуризации в различные моменты времени при варьировании значений параметров модели. Для нахождения стационарного или квазистационарного режимов процесса структуризации исследуется поведение средненитегральных значений степени структуризации и температуры. Выявлено, что параметры модели влияют на характер распределения температуры и степени структуризации неоднозначно; процесс структуризации не протекает до конца. Степень структуризации в слое клея зависит от технологических параметров (температуры ролла, давления прижатия и скорости его движения), а также от геометрических и физических параметров слоев.

Ключевые слова: ламинирование, трехслойная система, структуризация, адгезионный слой, теплофизическая модель

MODELING OF STRUCTURIZATION IN THE ADHESIVE LAYER IN THE CREATION OF MULTILAYER OBJECTS

E.R. Saifullin¹ and A.G. Knyazeva²

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

²Institute of Strength Physics and Material Science SB RAS, Tomsk, Russian Federation

In this paper, we propose a thermophysical model of structurization in the adhesive layer during the creation of products by laminating. Modeling is reduced to the solution of a three-layer conjugate thermal conductivity problem. The thermal contact between the layers is assumed to be ideal. It is suggested that structurization activated in the intermediate layer (adhesive layer) can lead to a change in the thermal conductivity coefficient of the adhesive. The lamination process is controlled by a hot roll with a given radius and a fixed temperature. The roll moves along the outer surface at a constant velocity; the force of the roll pressing on the surface determines the size of the contact area and the maximum effective stresses, which are known from the solution of the contact problem and are the parameters in the proposed model. The structurization is represented as a reversible reaction, the forward and reverse rates of which depend on the temperature and the acting stresses. The problem is implemented numerically. The thermal problem is solved using the coordinate splitting difference scheme and the double-sweep method; the kinetic problem is solved using the semi-implicit Euler method. The fields of temperature and structurization level at different moments of time are calculated by varying the values of model parameters. To find stationary or quasi-stationary modes of the structurization process, the behavior of the average integral values of the structurization level and temperature is investigated. It was found that the model parameters have an ambiguous effect on the nature of the temperature distribution and the structurization level; the structurization process does not proceed to its end. The structurization level in the adhesive layer depends on the process parameters (roll temperature, applied pressure and velocity of its movement), as well as on the geometric and physical parameters of the layers.

Key words: laminated object manufacturing, three-layer system, structurization, adhesive layer, thermophysical model

1. Введение

Создание многослойных объектов путем ламинирования (Laminated Object Manufacturing или Sheet Lamination — LOM), относится к широко распространенным технологиям получения трехмерных изделий. Если изначально способ LOM использовался в изготовлении бумаги с защитным слоем, то в настоящее время эта технология применяется в таких сферах, как строительство, микроэлектроника, производство керамических/стеклокерамических объектов, различного рода композитов, органических изделий, склеивание фольг и в другом. Разнообразие областей внедрения LOM объясняется простотой осуществления и высокой скоростью выхода конечного продукта [1, 2].

В процессе создания трехмерного объекта способом LOM условно выделяются 4 этапа. Первый этап заключается в разработке с помощью системы автоматизированного проектирования модели будущего изделия — CAD модели, которая загружается в промышленный компьютер установки.

На втором этапе происходит подача на рабочую платформу установки листового материала с предварительно нанесенным между листами адгезионным слоем. Третий этап включает вырезание лазером контуров изготавливаемого изделия. На четвертом этапе полученные листы подлежат послойному склеиванию посредством прокатывания нагретого рола, а излишки расходных материалов — удалению.

Несмотря на значительные преимущества технологии, существуют проблемы, которые требуют решения. Способ LOM хорошо работает при соединении листов бумаги, пластика, органики. Высокая точность производства и простота склеивания однотипных материалов достигается за счет варьирования толщин их слоев в пределах от 0,05 до 0,1 мм. Однако замена одного из них, к примеру, на металл, отражается как увеличение толщины листа от 0,2 до 0,5 мм, что приводит к усложнению операции склеивания. Тогда, например, как в работе [3], для соединения металлических фольг используют двухступенчатый процесс. Сначала с помощью LOM придают листам металлической фольги необходимую форму, затем слои соединяют диффузионной сваркой. Еще одной проблемой соединения фольг является зубчатость границ металлических функциональных изделий сложной формы и большой объем обрезаемого материала. Данная проблема подробно рассмотрена в статье [4], в которой проведено теоретическое исследование по улучшению точности технологии LOM для производства изделий сложной формы. Авторы получили результаты, позволяющие влиять на погрешность производства за счет изменения поверхности среза лишнего материала посредством лазера. Так, для изделия в форме четверти цилиндра радиусом 100 мм и высотой 50 мм при толщине слоя в 1 мм удалось в 3,7 раза уменьшить отходы. В работе [5] для создания функционально-градиентного материала Ti–C–Ni осуществлен двухступенчатый технологический процесс. На первом этапе для соединения листов металлов применялась технология LOM, на втором — синтез горением. Благодаря этому авторы достигли непрерывного распределения связки Ti+C+Ni в объеме материала, что привело к однородному распределению свойств.

В соединительных составах при получении слоистых изделий способом LOM могут наблюдаться физико-химические процессы. Так, традиционно используемые для этой цели органические материалы и клеи разного состава претерпевают фазовые переходы и структурные изменения, способствующие образованию соединения. Поскольку процесс синтеза в адгезионном слое сопровождается явлениями физической природы разнонаправленного действия и с отличающимися пространственными и временными масштабами, то возможно появление критических условий, которые необходимы для его начала. Непосредственное наблюдение за структурными изменениями не представляется возможным. Для изучения и объяснения закономерностей, приводящих к формированию многослойных объектов, требуется прибегать к математическому моделированию. Прототипами моделей процессов, сопровождающих LOM, могут быть модели макрокинетики, в которых описываются режимы экзотермических реакций в слоевых системах. Например, в [6] рассматривается горение в системе, состоящей из чередующихся слоев горючего и инертной прослойки заданных толщин. Реакция в горючем протекает без участия газовой фазы, теплофизические свойства слоев неизменны. Предложена условная корреляция горения в модельной системе и в реальном гетерогенном материале. В работе [7] обсуждается роль конкурирующих механизмов переноса тепла — теплопроводности и излучения — в установлении разных режимов горения.

В [8, 9] исследуются особенности распространения экзотермической реакции между слоями инертного материала. Температура горения в модели регулируется за счет разбавления экзотермического состава инертными частицами, на нагрев которых идет часть тепла. Публикации [10–12] связаны с изучением формирования соединения разнородных материалов; анализируется влияние различия теплофизических свойств всех материалов на скорость горения и максимальную температуру во фронте.

Работа [13] посвящена горению в двухслойных системах, состоящих из низкоплавких металлов или сплавов и высокоэнергетических смесей с образованием пористых продуктов. В результате между слоями образуется слой композитного материала, толщина которого определяется глубиной проникновения расплава в пористый продукт горения. Горение слоевого пакета исследуется в [14]. Одни слои представляют собой высококалорийные составы, вторые — инертные либо низкокалорийные составы. Для обеих систем авторы выявили стационарные и нестационарные режимы горения, показали возможность перехода между режимами. В работе [15] анализируется горение слоевой композиции из двух пористых реакционных слоев, разделенных слоем легкоплавкого инертного вещества. Фронт горения перемещается в направлении, перпендикулярном положению слоев, показана возможность сопутствующего процесса пропитки пористого слоя расплавом.

В [16] предложена модель распространения экзотермической химической реакции в слое между двумя инертными материалами с разными свойствами при условии, что по внешней поверхности перемещается источник тепла конечных размеров. Фактически моделируется синтез соединительного состава непосредственно в процессе ламинирования. Представлены результаты расчетов, показывающие существование разных режимов процесса.

Следует заметить, что экзотермически реагирующие составы соединительных слоев пока слабо распространены в технологии LOM. В большинстве случаев используются составы, которые в процессе нагрева, совмещенного с механическим нагружением, претерпевают некоторые структурные изменения (структурные фазовые переходы, полимеризацию, рекристаллизацию, уплотнение и другое),

не сопровождающиеся значительными тепловыми эффектами. При описании процесса на макроуровне и для всех подобных ему удобно применять единый параметр. Авторами данной работы не найден в литературе общепринятый термин. Одни и те же явления разные исследователи называют «структурными превращениями», «структуризацией», «структурированием», «структурообразованием», «формированием структуры», а соответствующую величину — «степенью структуризации», «степенью структурирования», «степенью превращения или глубиной превращения».

В рамках предлагаемой вниманию читателя статьи для макроскопического описания процесса будем использовать термины «структуризация» и «степень структуризации», чтобы отличать ее от степени превращения в реакциях, сопровождающихся значительными тепловыми эффектами. Впервые формулируется термокинетическая модель структуризации в адгезионном слое, приводящая к изменению свойств этого слоя. В зависимости от температуры регулирующего склеивание ролла, скорости его движения и давления прижатия реализуются разные условия для формирования структуры. Площадь пятна контакта и максимальные напряжения следуют из решения известной контактной задачи. Таким образом, цель работы состоит в изучении роли управляющих факторов, таких как давление прижатия ролла, его температура и скорость его движения, в установлении стационарного или квазистационарного режима ламинирования.

2. Постановка задачи

Рассмотрим трехслойную систему, состоящую из двух инертных слоев и адгезионного слоя между ними, как показано на рисунке 1. Для соединения слоев A и B по поверхности верхнего слоя с постоянной скоростью v движется ролл радиуса R_0 , нагретый до температуры T_s . Ширина ролла совпадает с шириной образца.

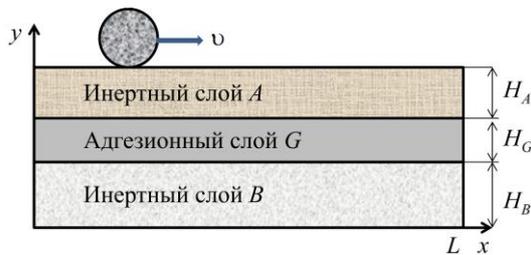


Рис. 1. Схема задачи

Максимальное напряжение в зоне контакта, возникающее при приложении давления к роллу, движущемуся по поверхности инертного слоя A , равняется [17]:

$$\sigma_{\max} = \mu \sqrt{\frac{p}{2R_0(\theta_1 + \theta_2)}}, \quad (1)$$

а полуширина площадки контакта находится по формуле:

$$s = \mu \sqrt{2pR_0(\theta_1 + \theta_2)}. \quad (2)$$

Здесь: $\mu = 0,798$ — размерный коэффициент, следующий из приближенного решения контактной задачи; p — давление прижатия ролла; $\theta_k = (1 - \nu_k)/E_k$ — комплексы, включающие коэффициенты Пуассона ν_k и модули упругости E_k контактирующих тел ($k = 1, 2$). Именно это напряжение передается на весь образец и оказывает влияние на процессы в адгезионном слое.

В результате определение поля температуры сводится к решению двумерной сопряженной задачи теплопроводности, включающей уравнения теплопроводности для инертных слоев:

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

где индекс k описывает инертные слои A и B , c_k — теплоемкость, ρ_k — плотность, T_k — температура, λ_k — коэффициент теплопроводности, x и y — пространственные координаты, t — время.

В зависимости от вида соединяемых между собой материалов и ожидаемых свойств ламинированного композита берутся разные адгезионные материалы (порошки, пленки, органические и неорганические

материалы), в которых могут наблюдаться химические реакции и разнообразные структурные изменения: фазовые переходы, полимеризация, рекристаллизация, уплотнение и другое. Положим, что химические реакции, приводящие к изменению состава, в адгезионном слое отсутствуют, однако возможна перестройка структуры его материала. Чтобы отделить этот процесс от вызываемого собственно химической реакцией, назовем его структуризацией. Этим модель в данной работе отличается от используемой в [16].

Согласно работам [18–21], процесс изменения структуры может быть представлен в виде обратимой реакции, не сопровождающейся сколько-нибудь значительными тепловыми эффектами. Тогда степень структурных превращений a будет следовать из кинетического уравнения:

$$\frac{da}{dt} = w_2 - w_1, \quad (4)$$

где $w_2 = k_2(1-a)$, $w_1 = k_1a$ — соответственно скорости прямой и обратной реакции. В неизотермических условиях k_2 , k_1 — функции температуры. Все перечисленные выше процессы являются термически активируемыми, их скорости зависят от температуры по закону Аррениуса. В случае реакций, протекающих с участием твердых веществ, закон для скорости реакции может быть более сложным [22, 23]. Активировать реакцию можно не только за счет изменения температуры (внутренней энергии), но и совершив работу [24]. Этому отвечает еще один экспоненциальный закон. Например, в химии твердого тела большое распространение получила формула Эйринга–Козмана

$$w \sim k_0 \exp\left(\frac{E - \sigma V^\ddagger}{RT}\right),$$

где V^\ddagger — активационный объем, σ — действующее напряжение, k_0 — предэкспоненциальный множитель, E — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная, T — температура. При записи этого уравнения подразумевается, что действующие напряжения облегчают переход через энергетический барьер, но не влияют на его высоту [25].

Заметим, что детальная схема превращений (стадийность реакций), как правило, не ясна или является сложной и неоднозначной. Скорость превращений в твердой фазе определяют не только химические реакции, но и многочисленные физические процессы, которые сложны для непосредственного изучения; протекают эти процессы на микроуровне (на уровне отдельных частиц, зерен, границ раздела). Самый простой выход в данной ситуации — это использовать такое макроскопическое понятие как степень превращения [22–25]. Именно так поступают в макрокинетике [26]. В законах для скорости реакций появляется кинетическая функция, вид которой зависит от процессов на микроуровне. Кроме того, практически любая реакция потенциально может идти как в прямом, так и в обратном направлении. Это верно в отношении всех перечисленных процессов. В соответствии с данными эксперимента [3–5, 27, 28], структура за единичный проход ролла полностью не формируется, что частично связано с обратимостью этого процесса, а частично — с действием конкурирующих факторов. Сочетание температуры и механической нагрузки позволяет контролировать процесс. В результате для скоростей прямого и обратного процессов запишем:

$$w_1 = k_1a = k_{10}a \exp\left(\alpha_1 \sigma_{\max} - \frac{E_1}{RT_G}\right), \quad w_2 = k_2(1-a) = k_{20}(1-a) \exp\left(\alpha_2 \sigma_{\max} - \frac{E_2}{RT_G}\right).$$

Здесь: k_{10} , k_{20} — предэкспоненты; α_1 , α_2 — коэффициенты чувствительности скоростей реакции к действующему напряжению; E_2 , E_1 — энергия активации прямой и обратной стадий структуризации; R — универсальная газовая постоянная; T_G — температура адгезионного слоя; a — степень структурных превращений (степень структуризации).

Заметим, что даже в относительно изученных процессах конкретные кинетические параметры требуют специального экспериментального определения, что в цели данной работы не входит. Однако известно, что структуризация может приводить к изменению свойств [18–21]. Так, согласно работе [29], коэффициент теплопроводности аморфных и частично закристаллизовавшихся полимеров может быть различным. Коэффициенты теплопроводности картона разной структуры отличаются почти на порядок [30]. Таков же порядок расхождения коэффициентов теплопроводности сухого и утрамбованного грунта. В рассматриваемой в данной работе задаче наибольший интерес представляет именно теплопроводность, так как от соотношения теплопроводностей слоев зависит степень неоднородности распределения

температуры и, как результат, характер структуризации. Предположим, что структуризация вызовет изменение коэффициента теплопроводности адгезионного слоя: $\lambda_G = \lambda_2(1-a) + \lambda_1 a$, где λ_2 и λ_1 — коэффициенты теплопроводности неструктурированного (индекс 2) и полностью структурированного (1) адгезионных слоев. Возможно использование только линейной зависимости от состава (или правила смеси), поскольку конкретная структура на микроуровне в рамках данной модели не известна. Итак, существует либо реагент $(1-a)$, либо продукт (a) , либо их смесь. Тогда уравнение теплопроводности для адгезионного слоя примет вид:

$$c_G \rho_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(1 + a \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right) \right) \frac{\partial T_G}{\partial x} \right) + \lambda_2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(1 + a \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right) \right) \frac{\partial T_G}{\partial y} \right). \quad (5)$$

Примем условия адиабатичности на торцах и в плоскости $y = 0$:

$$x = 0, \quad x = L: \quad \lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x} = 0 \quad (k = B, G, A), \quad (6)$$

$$y = 0: \quad \lambda_B \frac{\partial T_B}{\partial y} = 0. \quad (7)$$

На границах раздела слоев положим выполнение условий идеального теплового контакта:

$$y = H_B: \quad \lambda_B \frac{\partial T_B}{\partial y} = (\lambda_2(1-a) + \lambda_1 a) \frac{\partial T_G}{\partial y}, \quad T_B = T_G, \quad (8)$$

$$y = H_B + H_G: \quad (\lambda_2(1-a) + \lambda_1 a) \frac{\partial T_G}{\partial y} = \lambda_A \frac{\partial T_A}{\partial y}, \quad T_G = T_A. \quad (9)$$

На поверхности слоя A , вследствие движения горячего ролла, присутствует подвижный источник тепла ограниченного размера $2s$. Для $y = H_B + H_G + H_A$ имеют место условия:

– в зоне соприкосновения ролла со слоем A , то есть при $\nu t + x_0 - s \leq x \leq \nu t + x_0 + s$

$$T_A = T_s; \quad (10)$$

– вне зоны контакта, то есть при $x \leq \nu t + x_0 - s$ и $x \geq \nu t + x_0 + s$

$$\frac{\partial T_A}{\partial y} = 0. \quad (11)$$

В начальный момент времени образец имеет температуру T_0 , слой G неструктурированный ($a = 0$).

Модель содержит физические параметры, которые можно найти в литературе, получить из экспериментов или рассчитать на основе химической термодинамики, однако точность их определения будет невысокой. В подобных случаях в макрокинетике (то есть при изучении химических процессов с учетом сопутствующих физических стадий) используется анализ моделей в безразмерных переменных, что позволяет установить наиболее существенные для процесса параметры, выявить критерии, характеризующие процесс. Поэтому представим систему (1)–(11) в безразмерном виде.

Анализ задачи в безразмерных переменных выгоден еще и потому, что модель, представленная в статье, охватывает общие свойства разных технологий, в которых свойства материалов, размеры изделий, скорость и температура ролла значительно различаются. Размеры объектов, которые создаются в технологиях ЛОМ, самые разные. Возможность быстрого получения деталей больших размеров (до нескольких метров) относится к одним из преимуществ данной технологии. Размеры ролла и давление прижатия также варьируются в довольно широких пределах и зависят как от параметров производственного оборудования, так и от применяемых материалов. Например, в [31], где представлена упрощенная теплофизическая модель, данные для ролла были следующими: $s = 9$ мм; $\nu = 25,4$ мм/с; $T_s = 91$ °С, и теплофизические свойства керамики. В [32] технологические параметры варьировались, задавались нагрузки: $p = 12, 25, 40, 51$ кг; температуры ролла: $T_s = 120, 170, 220, 270, 320$ °С; скорости: $\nu = 5, 10, 20, 40$ мм/с. Полагалось, что стальные листы соединяются посредством акрилового клея.

С помощью термопар осуществлялись измерения температуры в разных слоях, которые позволили построить типичную кривую «температура–время» для задач с подвижными источниками тепла. В [33] на основе полуаналитической модели рассчитывались размер пятна контакта, температура и напряжения в окрестности ролла при его параметрах: $T_S = 200^\circ\text{C}$; $v = 1,27$ см/с. В статье указана и теплопроводность $0,501$ Вт/(мК). В целом процедура изготовления ламинатов из металлических листов подобна процедуре создания ламинированной бумаги. В технологии используются органические материалы, полимеры, керамика, спрессованные порошковые материалы и другие. Получают ламинаты не только при соединении разнородных материалов, но и при постепенном изменении состава и свойств слоев.

Поэтому для нахождения наиболее общих результатов и параметрического исследования модели перейдем к безразмерным переменным:

$$\theta_k = \frac{T_k - T_S}{RT_S^2} E_2, \quad \xi = \frac{x}{H_G}, \quad \eta = \frac{y}{H_G}, \quad \tau = \frac{t}{t_a}, \quad t_a = (k_{20})^{-1} \exp\left(\frac{E_2}{RT_S}\right),$$

где t_a — характерное время протекания прямой реакции структуризации.

После обезразмеривания модель принимает вид:

$$K_{ck} \frac{\partial \theta_k}{\partial \tau} = \frac{K_{\lambda k}}{\delta} \left(\frac{\partial^2 \theta_k}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta_k}{\partial \eta^2} \right) \quad (k = A, B), \quad (12)$$

$$\frac{\partial \theta_G}{\partial \tau} = \frac{1}{\delta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(((1-a) + \kappa a) \frac{\partial \theta_G}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(((1-a) + \kappa a) \frac{\partial \theta_G}{\partial \eta} \right) \right], \quad (13)$$

$$\frac{da}{d\tau} = (1-a)\phi_2(\theta, \sigma) - \gamma a \phi_1(\theta, \sigma). \quad (14)$$

Здесь

$$\gamma = \frac{k_{10}}{k_{20}}, \quad \phi_1(\theta, \sigma) = \exp\left(\bar{\alpha}_1 \sigma + \frac{\varepsilon + \theta_G}{1 + \beta \theta_G}\right), \quad \phi_2(\theta, \sigma) = \exp\left(\bar{\alpha}_2 \sigma + \frac{\theta_G}{1 + \beta \theta_G}\right).$$

Запишем граничные условия:

$$\xi = 0, \quad \xi = \bar{L}: \quad \frac{\partial \theta_k}{\partial \xi} = 0 \quad (k = A, G, B); \quad (15)$$

$$\eta = 0: \quad \frac{\partial \theta_B}{\partial \eta} = 0; \quad (16)$$

$$\eta = \Delta_B: \quad K_{\lambda B} \frac{\partial \theta_B}{\partial \eta} = ((1-a) + \kappa a) \frac{\partial \theta_G}{\partial \eta}, \quad \theta_B = \theta_G; \quad (17)$$

$$\eta = 1 + \Delta_B: \quad ((1-a) + \kappa a) \frac{\partial \theta_G}{\partial \eta} = K_{\lambda A} \frac{\partial \theta_A}{\partial \eta}, \quad \theta_G = \theta_A; \quad (18)$$

$$\eta = 1 + \Delta_B + \Delta_A: \quad \theta_A = 0, \quad \text{если} \quad \omega\tau + \xi_0 - \xi_A \leq \xi \leq \omega\tau + \xi_0 + \xi_A; \quad (19)$$

$$\frac{\partial \theta_A}{\partial \eta} = 0, \quad \text{если} \quad \xi \leq \omega\tau + \xi_0 - \xi_A \quad \text{и} \quad \xi \geq \omega\tau + \xi_0 + \xi_A; \quad (20)$$

начальные условия ($\tau = 0$):

$$a = 0; \quad \theta_k = -\theta_0, \quad \text{где} \quad k = B, G, A. \quad (21)$$

Задача (12)–(21) включает следующие безразмерные величины:

– геометрические параметры (длину образца, высоты инертных слоев A и B):

$$\bar{L} = L/H_G, \quad \Delta_A = H_A/H_G, \quad \Delta_B = H_B/H_G;$$

высота слоя G в безразмерных переменных становится единичной ($\Delta_G = 1$);

– параметры, связанные с теплофизическими свойствами материалов слоев и структурными превращениями:

$$K_{Ck} = \frac{c_k \rho_k}{c_G \rho_G}, \quad K_{\lambda k} = \frac{\lambda_k}{\lambda_G} \quad (k = B, A),$$

$$\beta = \frac{RT_s}{E_2}, \quad \theta_0 = \frac{T_s - T_0}{RT_s^2} E_2, \quad \delta = \frac{H_G^2 c_G \rho_G}{\lambda_2 t_a},$$

$$\kappa = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \quad \varepsilon = \frac{E_2 - E_1}{RT_s}, \quad \gamma = \frac{k_{10}}{k_{20}}, \quad \bar{\alpha}_1 = \alpha_1 p^*, \quad \bar{\alpha}_2 = \alpha_2 p^*;$$

– характеристики технологической установки, при этом принято:

$$\Pi = \frac{p}{p^*}, \quad \xi_A = \sqrt{\Pi}, \quad \sigma = \alpha \sqrt{\Pi}, \quad \xi_0 = \frac{x_0}{H_G}, \quad \omega = \frac{v t_a}{H_G}, \quad p^* = \frac{H_G^2}{2\mu^2 R_0 (\theta_1 + \theta_2)}.$$

В процессе исследования значения безразмерных величин варьировались в достаточно широких пределах. Иллюстрации представлены для ограниченного набора их значений.

3. Метод численного исследования

Для численной реализации задачи (12)–(21) использовались неявная разностная схема, метод расщепления по координатам и линейная прогонка [34]. Проверка сходимости численного решения проводилась на решении задачи для подвижного ролла при параметрах: $\beta = 0,1$; $\gamma = 0,2$; $\theta_0 = 5$; $\delta = 50$; $\bar{L} = 24$; $\omega = 0,01$; $\Pi = 1$; $\varepsilon = 0,87$; $\kappa = 0,1$; $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_2 = 0$; $K_{CA} = K_{CB} = K_{\lambda A} = K_{\lambda B} = 1$. Как видно из таблицы 1, при изменении шагов по пространству и времени результаты вычисления температуры в точках наблюдения расходятся не более чем на 2%, что подтверждает хорошую сходимость выбранного алгоритма.

Таблица 1. Проверка сходимости численного решения при $\omega = 0,01$, $\Pi = 1$, $\tau = 1200$

Шаг по времени ($\Delta\tau$)	Шаг по пространству ($\Delta\xi = \Delta\eta$)	Значение температуры образца в точках наблюдения			
		$\theta(0, H/2)$	$\theta(L/4, H/2)$	$\theta(L/3, H/2)$	$\theta(L/2, H/2)$
1,00	0,02	-2,8144	-2,7724	-2,7381	-2,6287
	0,01	-2,8087	-2,7668	-2,7326	-2,6232
	0,005	-2,8073	-2,7655	-2,7313	-2,6221
	0,0025	-2,8065	-2,7648	-2,7306	-2,6215
0,50	0,02	-2,7980	-2,7558	-2,7213	-2,6114
	0,01	-2,7931	-2,7511	-2,7166	-2,6067
	0,005	-2,7900	-2,7480	-2,7136	-2,6037
	0,0025	-2,7891	-2,7472	-2,7128	-2,6030
0,25	0,02	-2,7844	-2,7420	-2,7075	-2,5971
	0,01	-2,7815	-2,7393	-2,7047	-2,5944
	0,005	-2,7787	-2,7366	-2,7020	-2,5917
	0,0025	-2,7770	-2,7349	-2,7003	-2,5900

4. Результаты работы

Характер распределения температуры и степени структурных превращений в образце зависит от скорости движения ролла и давления прижатия, а также от соотношения теплофизических свойств материалов. Необходимые для получения хороших адгезионных соединений температуры и скорости могут отличаться значительно, а свойства слоев — на целый порядок. Все расчеты, результаты которых представлены далее на рисунках 2–5, выполнены при $\omega = 0,01$, $\Pi = 1$, $\gamma = 0,5$, $\delta = 5$, $\varepsilon = 0,87$, $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_2 = 0$. Границы адгезионного слоя нанесены пунктирными линиями. В случае подвижного ролла (центр пятна контакта находится в точке с переменной координатой ξ), распределение температуры (см. Рис. 2)

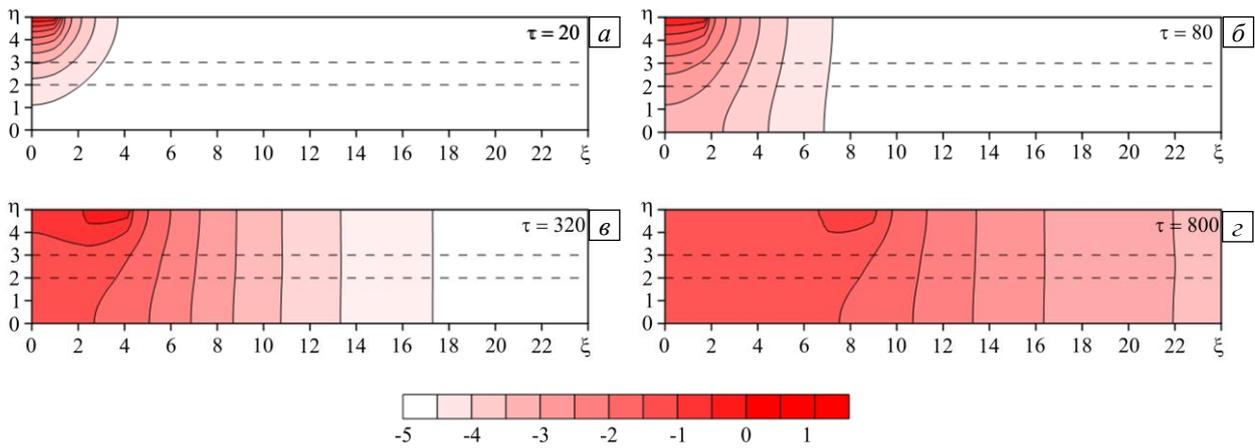


Рис. 2. Двумерные распределения температуры в образце в разные моменты времени τ при $K_{CA} = K_{CB} = K_{\lambda A} = K_{\lambda B} = 1$; центр пятна контакта находится в точке с координатой ξ : 0,2 (а); 0,8 (б); 3,2 (в); 8,0 (г)

неоднородно даже при одинаковых теплофизических свойствах слоев *A* и *B*. При высокой скорости движения ролла образец может не успеть прогреться до температуры, необходимой для начала структуризации.

По мере продвижения ролла образец постепенно нагревается. Неоднородность прогрева хорошо видна на начальной стадии движения ролла. Например, на границах адгезионного слоя фиксируется различие значений температуры вплоть до времени $\tau = 1280$ — момента прихода ролла в точку $\xi = 12,8$ (см. Рис. 3а). Аналогичная ситуация наблюдается со степенью структурных превращений до $\tau = 320$ (Рис. 3б); в этот момент ролл находится в точке $\xi = 3,2$.

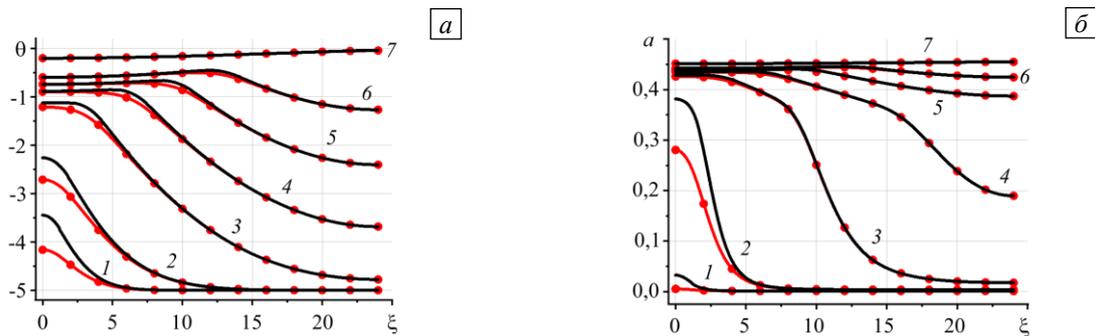


Рис. 3. Распределение температуры (а) и степени структурных превращений (б) на верхней (сплошные линии) и нижней (линии с точками) границах адгезионного слоя в разные моменты времени τ : 20 (кривая 1), 80 (2), 320 (3), 640 (4), 960 (5), 1280 (6), 2400 (7)

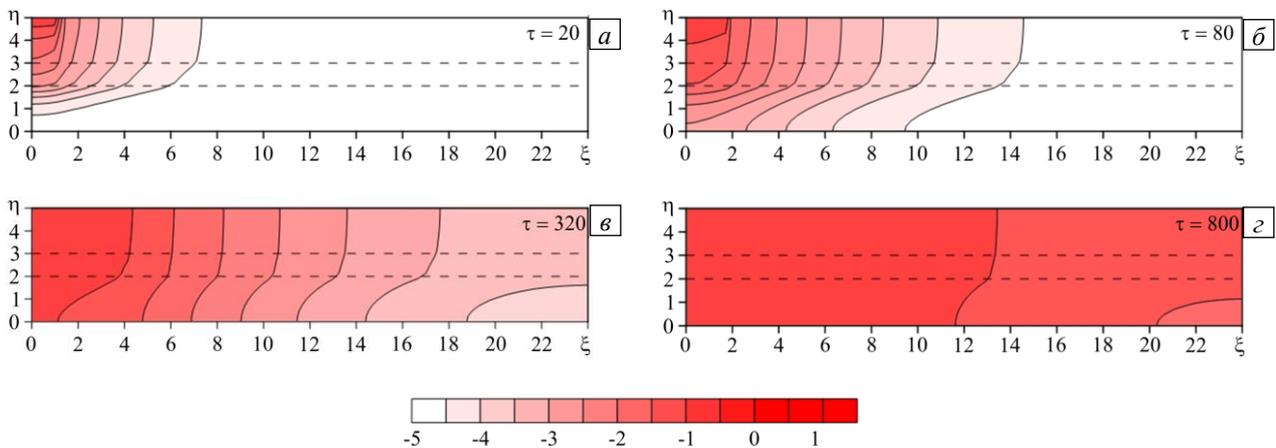


Рис. 4. Двумерные распределения температуры в образце в разные моменты времени τ при $K_{CA} = K_{CB} = 1$, $K_{\lambda A} = 5$, $K_{\lambda B} = 0,2$; центр пятна контакта находится в точке с координатой ξ : 0,2 (а); 0,8 (б); 3,2 (в); 8,0 (г)

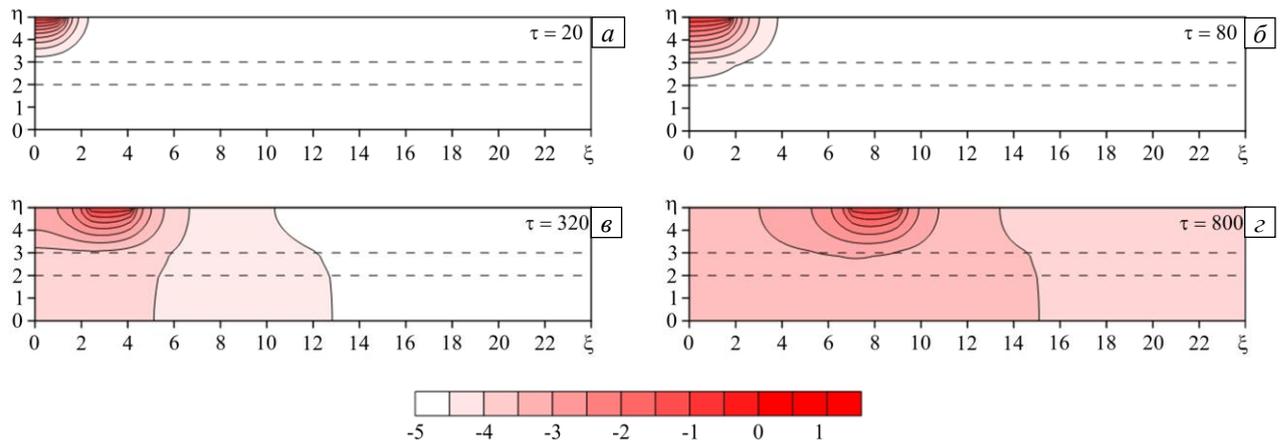


Рис. 5. Двумерные распределения температуры в образце в разные моменты времени τ при $K_{CA} = K_{CB} = 1$, $K_{\lambda A} = 0,2$, $K_{\lambda B} = 5$; центр пятна контакта находится в точке с координатой ξ : 0,2 (а); 0,8 (б); 3,2 (в); 8,0 (г)

На рисунках 4, 5 показаны распределения температуры при различных соотношениях коэффициентов теплопроводности слоев A и B . С увеличением коэффициента теплопроводности слоя A (Рис. 4) наблюдается более быстрый прогрев этого слоя перед роллом, но величина температуры уменьшается. В противоположной ситуации (Рис. 5) температура в слое клея изменяется значительно медленнее.

Представленные примеры не позволяют однозначно судить об установлении режима распространения тепла — стационарного или квазистационарного, и процесса структуризации. Если рассматривается образец конечных размеров, то для определения теплового режима более удобным оказывается исследование поведения среднеинтегрального значения степени структурных превращений I_a и средней по толщине адгезионного слоя степени структуризации $\langle a \rangle$:

$$I_a = \frac{1}{L} \int_{\Delta_B}^{1+\Delta_B} \left(\int_0^{\bar{L}} a(\xi, \eta) d\xi \right) d\eta, \quad \langle a \rangle = \int_{\Delta_B}^{1+\Delta_B} a(\xi, \eta) d\eta.$$

Стационарному режиму будет соответствовать практически постоянная максимальная температура и неизменяющаяся среднеинтегральная степень структурных превращений:

$$\frac{\theta_{\max}^{j+1} - \theta_{\max}^j}{\theta_{\max}^j} < 10^{-5}, \quad \frac{I_a^{j+1} - I_a^j}{I_a^j} < 10^{-5},$$

где j — номер слоя по времени (то есть в числителях стоит изменение величины за один шаг по времени).

На время установления стационарного режима влияют параметры модели. На рисунке 6 показано, что с течением времени оба условия установления выполняются с точностью 10^{-5} , но по-разному для различных наборов параметров. Например, при параметрах $\gamma = 0,5$, $\omega = 0,00048$, $\Pi = 1$, $\varepsilon = 0,87$ с ростом δ увеличивается время установления стационарного режима: при $\delta = 1$ стационарный режим возникает практически мгновенно, а при $\delta = 100$ время установления стационарного состояния составляет 35000 (вследствие увеличения неоднородности в распределении температуры).

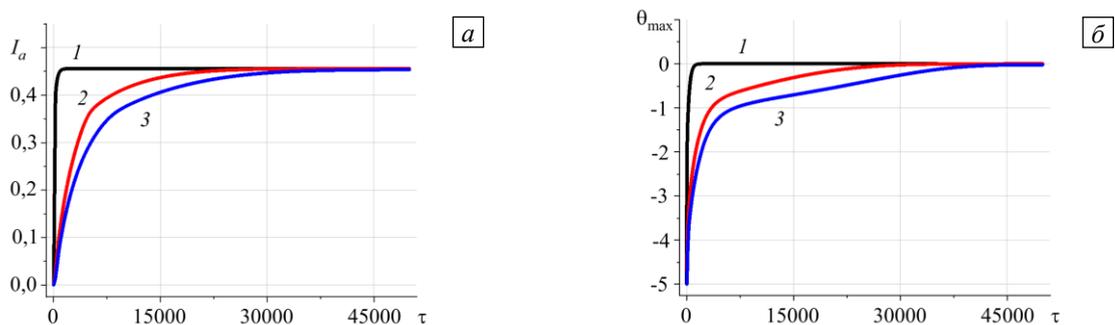


Рис. 6. Зависимость среднеинтегральной степени структурных превращений (а) и максимальной температуры (б) от времени при $\gamma = 0,5$, $\omega = 0,00048$, $\Pi = 1$, $\varepsilon = 0,87$, $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_2 = 0$ и различных значениях δ : 1 (кривая 1); 50 (2); 100 (3)

Большие значения δ соответствуют большим толщинам слоя клея, что тождественно уменьшению характерного теплового масштаба, равного размеру области прогрева, которая может сформироваться за характерное время.

Результаты вычислений, представленные на рисунках 2–6, получены без учета влияния на кинетику коэффициентов чувствительности скоростей реакции структуризации к действующим напряжениям. Из рисунка 7а видно значительное влияние на степень структуризации величин $\bar{\alpha}_1$ и $\bar{\alpha}_2$: с возрастанием значения $\bar{\alpha}_2$ увеличивается среднеинтегральная степень структурных превращений. Аналогичная ситуация, как и ожидалось, повторяется в характере зависимости распределения средней по толщине степени превращения (Рис. 7б).

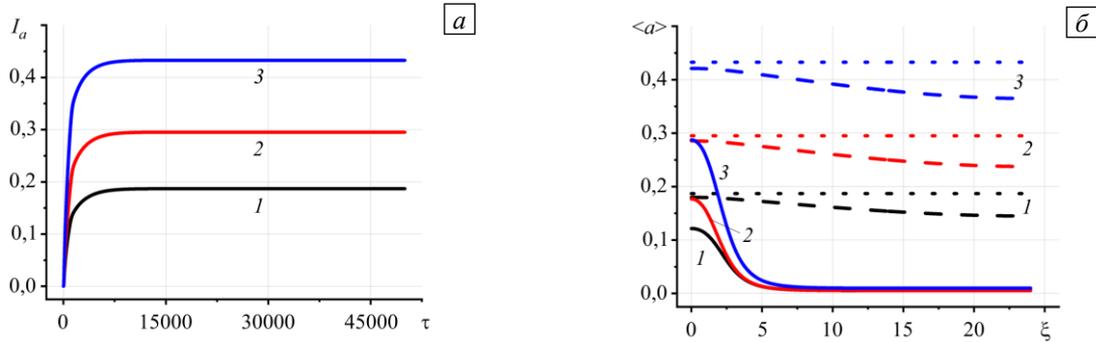


Рис. 7. Зависимость среднеинтегральной степени структурных превращений от времени (а) в разные моменты времени τ : 100 (кривая 1), 2500 (2), 15000 (3); распределение средней степени превращения по толщине слоя клея вдоль координаты ξ (б) в разные моменты времени τ : 100 (сплошные линии), 2500 (штриховые), 15000 (пунктирные) при $\gamma=1$, $\delta=10$, $\omega=0,00048$, $\Pi=1$, $\varepsilon=0,87$ и различных сочетаниях значений безразмерных коэффициентов чувствительности скоростей реакции к напряжению $\bar{\alpha}$: $\bar{\alpha}_1=5$, $\bar{\alpha}_2=0,2$ (кривые 1); $\bar{\alpha}_1=0,2$, $\bar{\alpha}_2=0,2$ (2); $\bar{\alpha}_1=0,2$, $\bar{\alpha}_2=5$ (3)

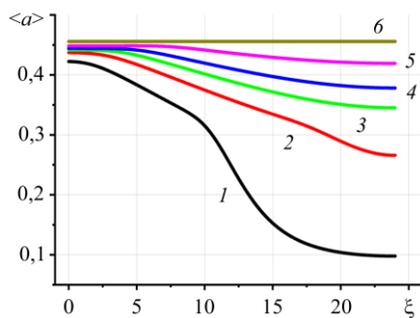


Рис. 8. Зависимость средней по толщине адгезионного слоя степени структуризации при $\gamma=0,5$, $\omega=0,00048$, $\Pi=1$, $\varepsilon=0,87$, $\bar{\alpha}_1=\bar{\alpha}_2=0$ в разные моменты времени τ : 2500 (кривая 1); 5000 (2); 7500 (3); 10000 (4); 15000 (5); 50000 (6)

Степень структуризации в адгезионном слое ко времени окончания процесса ламинирования является функцией всех параметров. Так, с увеличением скорости движения ролла сокращается поступление тепла и, соответственно, уменьшается величина среднеинтегральной степени структурных превращений. По этой же причине укорачивается время до момента окончания технологического процесса (Рис. 8). Слой оказывается структурированным лишь частично, а накопившегося тепла недостаточно для увеличения степени структуризации. На рост давления прижатия ролла значение среднеинтегральной степени структурных превращений реагирует слабо (что вполне объяснимо расширением площади контакта и, следовательно, ростом температуры в слое клея), но заметно короче становится время установления стационарного значения I_a .

Примеры зависимостей времени установления стационарного значения I_a от параметров модели представлены на рисунках 9–12. С увеличением скорости движения ролла быстрее прогревается верхний слой образца, однако тепло может не достичь адгезионного слоя, что уменьшает степень структурных превращений и, соответственно, удлиняет время установления стационарного значения I_a (см. Рис. 9). Из рисунка 10 видно, что увеличение давления прижатия ролла ведет к уменьшению времени установления стационарного значения I_a независимо от значения δ .

В отличие от технологических характеристик изменение кинетических параметров ε и γ приводит к значительному изменению величины среднеинтегральной степени структурных превращений к моменту установления квазистационарного режима. Рост ε влечет за собой увеличение ϕ_1 (см. (14)) и, соответственно, ускорение обратной реакции структуризации, хотя начаться она может позже; в результате этого значительно уменьшается среднеинтегральная степень структурных превращений, что показано на рисунке 11а. Время установления стационарного значения I_a резко возрастает.

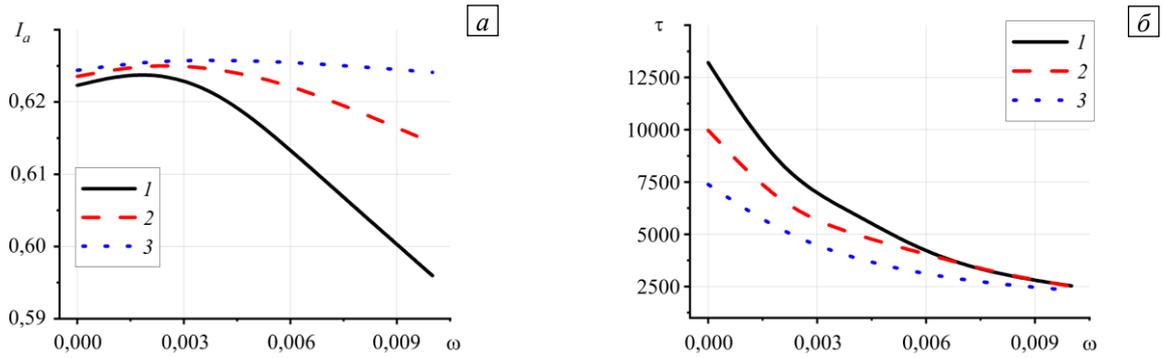


Рис. 9. Зависимость среднеинтегральной степени структурных превращений (а) и времени установления стационарного значения I_a (б) от скорости движения ролла при $\gamma = 1$, $\delta = 10$, $\varepsilon = 0,87$, $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_2 = 0$ и различных значениях давления прижатия ролла Π : 0,1 (кривая 1); 1 (2); 10 (3)

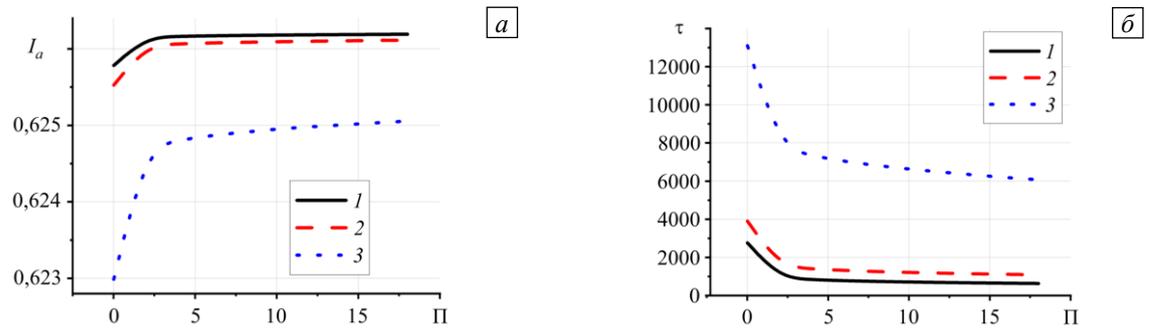


Рис. 10. Зависимость среднеинтегральной степени структурных превращений (а) и времени установления стационарного значения I_a (б) от давления прижатия ролла при $\gamma = 1$, $\omega = 0,00048$, $\varepsilon = 0,87$, $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_2 = 0$ и различных значениях δ : 0,5 (кривая 1); 1 (2); 10 (3)

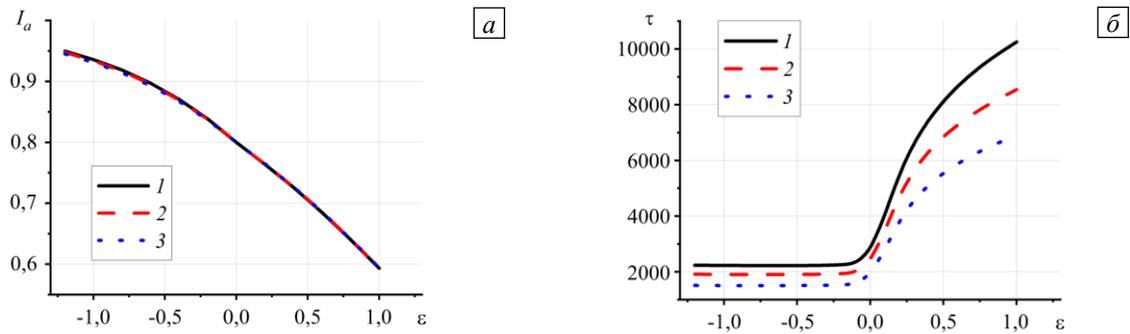


Рис. 11. Зависимость среднеинтегральной степени структурных превращений (а) и времени установления стационарного значения I_a (б) от ε при $\gamma = 1$, $\delta = 10$, $\omega = 0,00048$, $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_2 = 0$ и различных значениях давления прижатия ролла Π : 0,1 (кривая 1); 1 (2); 10 (3)

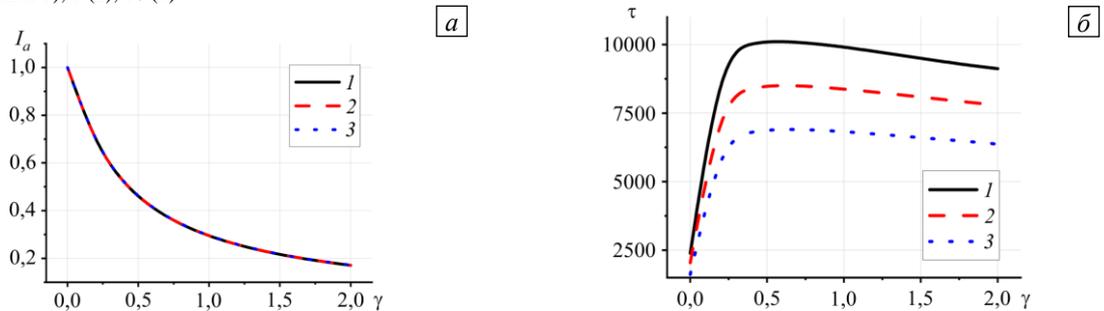


Рис. 12. Зависимость от кинетических свойств среднеинтегральной степени структурных превращений (а) и времени установления стационарного значения I_a (б) при $\delta = 1$, $\omega = 0,00048$, $\varepsilon = 0,87$, $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_2 = 0$ и различных значениях давления прижатия ролла Π : 0,1 (кривая 1); 1 (2); 10 (3)

Величина I_a существенно уменьшается с увеличением параметра γ , при этом время, необходимое для установления его стационарного значения, резко возрастает до $\gamma = 0,45$ (см. Рис. 12), что опять-таки связано с ускорением обратной стадии структуризации.

5. Заключение

Таким образом, в работе предложена теплофизическая модель процесса структуризации в адгезионном слое. Наличие у структуризации прямой и обратной стадий и зависимость скоростей их протекания как от температуры, так и от напряжений приводит к тому, что к окончанию движения ролла возможна неполная структуризация. Это говорит о необходимости подбора технологических условий для получения заданной структуры адгезионного слоя. Соотношения теплофизических свойств инертных слоев и их геометрические размеры также влияют на характер распределения температуры и степени структурных превращений. При одинаковых значениях I_a , достигаемых при разных наборах параметров, времена окончания реакции структуризации могут сильно различаться. Показано, что учет прямой и обратной стадий, а также зависимости скоростей стадий от температуры и напряжений позволяет обнаружить и неполноту превращения, и выход на квазистационарный режим, и влияние на процесс внешних управляющих факторов. Надеемся, что описанные закономерности побудят экспериментаторов контролировать не только механические свойства изготавливаемых ламинатов, но и величины, характеризующие сам процесс создания объектов (время начала превращений, размер области, где идут структурные превращения, время окончания структуризации и другие), что важно для идентификации входящих в модель параметров.

Заметим, что в настоящей работе роль отдельных параметров специально не изучалась. И то, что коэффициенты чувствительности скоростей стадий сказываются на величине степени структурных превращений, продемонстрировано лишь на примере. Отношение коэффициентов теплопроводности структурированного (λ_1) и неструктурированного (λ_2) материалов $\kappa = \lambda_1/\lambda_2$ в расчетах кривых, приведенных на всех рисунках, было фиксированным и равнялось 0,1, то есть принималось, что коэффициенты теплопроводности после и до структуризации отличаются на порядок. Однако отдельные результаты, не представленные в статье, показали, что увеличение κ приводит к более однородному распределению температуры в адгезионном слое и ускорению оттока тепла в нижний слой. Подобные выводы будут представлять интерес применительно к конкретным материалам, для которых кинетика структуризации будет изучаться.

О неполноте превращений в структуре и ее зависимости от условий эксперимента имеется информация в экспериментальных работах [27, 28]. Величина скорости $\omega = 0,01$ означает, что за время t_a ролл проходит расстояние, в 100 раз меньшее, чем толщина слоя адгезива. Это может обеспечить его почти однородный прогрев по толщине, однако наличие теплопроводности и потери тепла в нижний слой ситуацию усложняют. Величина $\delta = 50$ означает, что толщина слоя адгезива в 50 раз превышает то расстояние, на которое слой прогревается за счет теплопроводности за то же время t_a . В статье этот параметр варьировался в широких пределах. Увеличение скорости ролла требует, как и в экспериментальных исследованиях, повышения его температуры для того, чтобы стартовал процесс структуризации. При изменении соотношений между масштабами динамика процесса, что очевидно, изменится. Однако использованные в статье критерии будут полезными в любом случае.

Определение входящих в модель кинетических параметров, а также характера зависимости свойств от степени структуризации на основе данных вычислительных экспериментов — предмет дальнейших исследований. Предложенную модель можно усовершенствовать за счет учета температурной зависимости свойств, а также за счет явной постановки и решения связанной задачи нахождения напряженно-деформированного состояния объекта, создаваемого LOM способом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90016.

Литература

1. Lee J.-Y., An J., Chua C.K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials // *Applied Materials Today*. 2017. Vol. 7. P. 120-133. <https://doi.org/10.1016/J.APMT.2017.02.004>
2. Yan Y., Li S., Zhang R., Lin F., Wu R., Lu Q., Xiong Z., Wang X. Rapid prototyping and manufacturing technology: Principle, representative technics, applications, and development trends // *Tsinghua Science and Technology*. 2009. Vol. 14. P. 1-12. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(09\)70059-8](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70059-8)
3. Prechtl M., Otto A., Geiger M. Rapid tooling by Laminated Object Manufacturing of metal foil // *Adv. Mater. Res.* 2005. Vol. 6-8. P. 303-312. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.303>
4. Shuping Y., Murakami T., Nakajima N. Accuracy study on Laminated Object Manufacturing for the metallic functional parts with complex surface // *Proc. of the Annual International SFF Symposium*. 1999. P. 711-718. <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/1999/1999-082-Suping.pdf> (дата обращения: 20.07.2021).
5. Zhang Y., Han J., Zhang X., He X., Li Z., Du S. Rapid prototyping and combustion synthesis of TiC/Ni functionally gradient materials // *Mater. Sci. Eng.* 2001. Vol. 299. P. 218-224. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01377-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01377-0)

6. Кришеник П.М., Мержанов А.Г., Шкадинский К.Г. Нестационарные режимы превращения многослойных гетерогенных систем // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 3. С. 70-79. (English version <https://doi.org/10.1023/A:1015605920193>)
7. Кришеник П.М., Мержанов А.Г., Шкадинский К.Г. Режимы фронтального превращения высокоэнергетических структурированных гетерогенных систем // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 2. С. 51-61. (English version <https://doi.org/10.1007/s10573-005-0019-x>)
8. Чащина А.А., Князева А.Г. Режимы распространения твердофазной реакции в щели между двумя инертными пластинами // Физ. мезомех. 2004. Т. 7. Спец. вып. Ч. 1. С. 82-85.
9. Чащина А.А., Князева А.Г. Режимы соединения материалов с использованием синтеза в твердой фазе // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. Т. 13, № 2. С. 343-350.
10. Князева А.Г., Алигожина К.А. Иницирование тепловым импульсом химической реакции в щели между разнородными материалами // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 12/2. С. 34-38.
11. Алигожина К.А., Князева А.Г. Распространение химической реакции между инертными материалами с разными свойствами с учетом плавления реагента // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 6/2. С. 5-9.
12. Алигожина К.А., Князева А.Г. Моделирование распространения твердофазной реакции в условиях сопряженного теплообмена // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53, № 4. С. 48-57. <https://doi.org/10.15372/FGV20170405>
13. Prokof'ev V.G., Smolyakov V.K. Gasless combustion in two layer structures: A theoretical model // Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. 2013. Vol. 22. P. 5-10. <https://doi.org/10.3103/S1061386213010093>
14. Прокофьев В.Г., Смоляков В.К. Безгазовое горение системы термически сопряженных слоев // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52, № 1. С. 70-75. <https://doi.org/10.15372/FGV20160108>
15. Прокофьев В.Г., Лапшин О.В., Смоляков В.К. Макрокинетика горения слоевых композиций с легкоплавким инертным слоем // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2018. № 52. С. 102-113. <https://doi.org/10.17223/19988621/52/10>
16. 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. P. 77-89. <https://doi.org/10.1615/NANOSCITECHNOLINTJ.2018026088>
17. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчёт на прочность деталей машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
18. Холопов В.М., Худяев С.И. Неединственность стационарной волны горения // Матем. моделирование. 1998. Т. 10, № 5. С. 91-108.
19. Худяев С.И., Ушаковский О.В. Пространственная неоднородность и автоколебания при течении структурированной жидкости // Матем. моделирование. 2002. Т. 14, № 7. С. 53-73.
20. Беляева Н.А. Неоднородное течение структурированной жидкости // Матем. моделирование. 2006. Т. 18, № 6. С. 3-14.
21. Столин А.М., Худяев С.И. Образование пространственно-неоднородных состояний структурированной жидкости при сверханомалии вязкости // ДАН СССР. 1981. Т. 260, № 5. С. 1180-1184.
22. Кнотыко А.В., Пресняков И.А., Третьяков Ю.Д. Химия твердого тела. М.: ИЦ «Академия», 2006. 304 с.
23. Браун М., Доллимор Д., Галвей А. Реакции твердых тел. М.: Мир, 1983. 360 с.
24. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1984. 463 с.
25. Бутягин П.Ю. Проблемы и перспективы развития механохимии // Усп. хим. 1994. Т. 63, № 12. С. 1031-1043. (English version <https://doi.org/10.1070/RC1994v063n12ABEN000129>)
26. Мержанов А.Г., Мукасян А.С. Твердопламенное горение. М: Торус Пресс, 2007. 336 с.
27. Park J., Tari M.J., Hahn H.T. Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process // Rapid Prototyping Journal. 2000. Vol. 6. P. 36-50. <https://doi.org/10.1108/13552540010309868>
28. Dermeik B., Travitzky N. Laminated object manufacturing of ceramic-based materials // Adv. Eng. Mater. 2020. Vol. 22. 2000256. <https://doi.org/10.1002/adem.202000256>
29. Новиченок Л.Н., Шульман З.П. Теплофизические свойства полимеров. Минск: Наука и техника, 1971. 120 с.
30. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
31. Flach L., Klostennan D.A., Chartoff R.P. A thermal model for laminated object manufacturing (LOM) // Proc. of the International Solid Freeform Fabrication Symposium. 1997. P. 677-688. <https://doi.org/10.15781/T2QZ2336G>
32. Zak G., Wang W.X. Adhesive bonding of sheet for laminated metal tooling // Proc. of the International Solid Freeform Fabrication Symposium. 2002. P. 502-509. <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/4512>
33. Park J., Kang M.K., Hahn H.T. Composite material based on laminated object manufacturing (LOM) process simulation // ACL. 2001. Vol. 10. P. 237-245. <https://doi.org/10.1177%2F096369350101000504>
34. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. 616 с.

References

1. Lee J.-Y., An J., Chua C.K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied Materials Today*, 2017, vol. 7, pp. 120-133. <https://doi.org/10.1016/J.APMT.2017.02.004>
2. Yan Y., Li S., Zhang R., Lin F., Wu R., Lu Q., Xiong Z., Wang X. Rapid prototyping and manufacturing technology: Principle, representative technics, applications, and development trends. *Tsinghua Science and Technology*, 2009, vol. 14, pp. 1-12. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(09\)70059-8](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70059-8)
3. Prechtl M., Otto A., Geiger M. Rapid tooling by Laminated Object Manufacturing of metal foil. *Adv. Mater. Res.*, 2005, vol. 6-8, pp. 303-312. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.303>
4. Shuping Y., Murakami T., Nakajima N. Accuracy study on Laminated Object Manufacturing for the metallic functional parts with complex surface. *Proc. of the Annual International SFF Symposium*, 1999, pp. 711-718. <http://utw10945.utweb.utexas.edu/Manuscripts/1999/1999-082-Suping.pdf> (accessed 20 July 2021)

5. Zhang Y., Han J., Zhang X., He X., Li Z., Du S. Rapid prototyping and combustion synthesis of TiC/Ni functionally gradient materials. *Mater. Sci. Eng.*, 2001, vol. 299, pp. 218-224. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01377-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01377-0)
6. Krishenik P.M., Merzhanov A.G., Shkadinskii K.G. Nonstationary regimes of transformation of multilayered heterogeneous systems. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2002, vol. 38, pp. 313-321. <https://doi.org/10.1023/A:1015605920193>
7. Krishenik P.M., Merzhanov A.G., Shkadinskii K.G. Frontal transformation modes of structured energetic heterogeneous systems. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2005, vol. 41, pp. 164-173. <https://doi.org/10.1007/s10573-005-0019-x>
8. Chaschina A.A., Knyazeva A.G. Regimes of solid-phase reaction propagation in a slit between two inert plates. *Fiz. mezomekh. – Physical Mesomechanics*, 2004, vol. 7, no. S1-1, pp. 82-88.
9. Chashchina A.A., Knyazeva A.G. Regimes of connecting materials with the help of synthesis in the solid phase. *Chemistry for Sustainable Development*, 2005, vol. 13, no. 2, pp. 343-350.
10. Knyazeva A.G., Aligozhina K.A. Initsirovaniye teplovym impul'som khimicheskoy reaktsii v shcheli mezhduraznorodnymi materialami [Thermal pulse initiation of a chemical reaction in a gap between dissimilar materials]. *Izv. vuzov. Fizika – Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 12/2, pp. 4-38.
11. Aligozhina K.A., Knyazeva A.G. Chemical reaction propagation two inert materials with different properties taking into account the reagent melting. *Izv. vuzov. Fizika – Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58, no. 6/2, pp. 5-9.
12. Aligozhina K.A., Knyazeva A.G. Modeling the solid phase reaction distribution in the case of conjugate heat exchange. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2017, vol. 53, pp. 411-419. <https://doi.org/10.1134/S0010508217040050>
13. Prokofev V.G., Smolyakov V.K. Gasless combustion in two layer structures: A theoretical model. *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.*, 2013, vol. 22, pp. 5-10. <https://doi.org/10.3103/S1061386213010093>
14. Prokofiev V.G., Smolyakov V.K. Gasless combustion of a system of thermally coupled layers. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2016, vol. 52, pp. 62-66. <https://doi.org/10.1134/S0010508216010081>
15. Prokofiev V.G., Lapshin O.V., Smolyakov V.K. Microkinetics of combustion of layered compositions with a low-melting inert layer. *Vestnik TGU. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2018, no. 52, pp. 102-113. <https://doi.org/10.17223/19988621/52/10>
16. 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, pp. 77-89. <https://doi.org/10.1615/NANOSCITECHNOLINTJ.2018026088>
17. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost' detaley mashin: Spravochnik* [Calculation of the strength of machine parts: Reference book]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1993. 640 p.
18. Kholopov V.M., Khudyaev S.I. Neyedinstvennost' statsionarnoy volny gorennya [Uniqueness of the stationary wave of combustion]. *Matem. modelirovaniye – Mathematical Models and Computer Simulations*, 1998, vol. 10, no. 5, pp. 91-108.
19. Khudyayev S.I., Ushakovskiy O.V. Prostranstvennaya neodnorodnost' i avtokolebaniya pri techenii strukturirovannoy zhidkosti [Space nonuniformity and auto-oscillations in the structured liquid flow]. *Matem. modelirovaniye – Mathematical Models and Computer Simulations*, 2002, vol. 14, no. 7, pp. 53-73.
20. Belyaeva N.A. Neodnorodnoye techeniye strukturirovannoy zhidkosti [Heterogeneous flow of the structured liquid]. *Matem. modelirovaniye – Mathematical Models and Computer Simulations*, 2006, vol. 18, no. 6, pp. 3-14.
21. Stolin A.M., Khudyayev S.I. Obrazovaniye prostranstvenno-neodnorodnykh sostoyaniy strukturirovannoy zhidkosti pri sverkhanomalii vyazkosti [Formation of spatially inhomogeneous states of a structured fluid with superviscosity anomaly]. *DAN SSSR – Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1981, vol. 260, no. 5, pp. 1180-1184.
22. Knot'ko A.V., Presnyakov I.A., Tret'yakov Yu.D. *Khimiya tverdogo tela* [Chemistry of solids]. Moscow, "Akademiya", 2006. 304 p.
23. Brown M.E., Dollimore D., Galwey A.K. *Reactions in the solid state*. Elsevier, 1980. 339 p.
24. Emanuel' N.M., Knorre D.G. *Kurs khimicheskoy kinetiki* [Course on chemical kinetics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1984. 463 p.
25. Butyagin P.Yu. Problems in mechanochemistry and prospects for its development. *Russ. Chem. Rev.*, 1994, vol. 63, pp. 965-976. <https://doi.org/10.1070/RC1994v063n12ABEH000129>
26. Merzhanov A.G., Mukas'yan A.S. *Tverdoplamennoye goreniye* [Solid-flame combustion]. Moscow, Torus Press, 2007. 336 p.
27. Park J., Tari M.J., Hahn H.T. Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process. *Rapid Prototyping Journal*, 2000, vol. 6, pp. 36-50. <https://doi.org/10.1108/13552540010309868>
28. Dermeik B., Travitzky N. Laminated object manufacturing of ceramic-based materials. *Adv. Eng. Mater.*, 2020, vol. 22, 2000256. <https://doi.org/10.1002/adem.202000256>
29. Novichenok L.N., Shul'man Z.P. *Teplofizicheskiye svoystva polimerov* [Thermal-physical properties of polymers]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1971. 120 p.
30. Grigor'yev I.S., Meylikhov E.Z. (eds.) *Fizicheskiye velichiny. Spravochnik* [Physical values: Reference book]. Moscow, Energoatomizdat, 1991. 1232 p.
31. Flach L., Klostennan D.A., Chartoff R.P. A thermal model for laminated object manufacturing (LOM). Proc. of the International Solid Freeform Fabrication Symposium. 1997. P. 677-688. <https://doi.org/10.15781/T2QZ2336G>
32. Zak G., Wang W.X. Adhesive bonding of sheet for laminated metal tooling. Proc. of the International Solid Freeform Fabrication Symposium. 2002. P. 502-509. <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/4512>
33. Park J., Kang M.K., Hahn H.T. Composite material based on laminated object manufacturing (LOM) process simulation. *ACL*, 2001, vol. 10, pp. 237-245. <https://doi.org/10.1177%2F096369350101000504>
34. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of difference schemes]. Moscow, Nauka, 1989. 616 p.

Поступила в редакцию 30.09.2021; после доработки 17.01.2022; принята к опубликованию 17.01.2022

Сведения об авторах

Сайфуллин Эльмир Равильевич, асп., Национальный исследовательский Томский государственный университет (НИ ТГУ), 634050, г. Томск, Ленина пр., д. 36; e-mail: elmir.saiFULLIN@mail.ru

Князева Анна Георгиевна, дфмн, проф., гнс, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (ИФПМ СО РАН), 634055, г. Томск, Академический пр., д. 2/4; e-mail: anna-knyazeva@mail.ru