

М. И. Чебаков, С. А. Данильченко*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул.
Большая Садовая, 105/42*

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

M. I. Chebakov and S. A. Danil'chenko*

THEORETICAL-EXPERIMENTAL APPROACH TO DETERMINING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THIN POLYMER COMPOSITE COATINGS

Keywords: indentation, polymer composite coatings, finite-element modeling, yield strength

A method is proposed for determining the mechanical characteristics of thin polymer composite coatings by comparing the results of a numerical modeling and an indentation experiment. An elastoplastic axisymmetric problem for a two-layer base modeling the indentation process of thin coatings is considered. To solve it, the finite-element method and the ANSYS software package were used. A cone with special parameters of the taper angle and rounding radius at the vertex was used as an indenter. Such an indenter has the same function of area and depth projection as the standard Berkovich indenter, which was used during the experiments. The resulting model allows one to build “loading-unloading” curves similar to those obtained in an instrumental indentation. The main idea of this work was to obtain the yield strength of thin polymer composite coatings by comparing and approximating experimental and calculated curves for a set of known input parameters. In the future, the value obtained in this way can be taken as an approximate yield strength of the material. It is shown that, by applying an optimization algorithm to adjust the yield strength of the coating, it is possible to achieve a good agreement between the results of modeling and experiment.

*Автор, с которым следует вести переписку: michebakov@yandex.ru
Corresponding author: michebakov@yandex.ru

Ключевые слова: индентирование, покрытия полимерные композитные, моделирование конечно-элементное, предел текучести

Предложен способ определения механических характеристик тонких полимерных композитных покрытий путем сопоставления результатов численного моделирования и эксперимента по индентированию. Рассмотрена упругопластическая осесимметричная задача для двухслойного основания, моделирующая процесс индентирования тонких покрытий. Для ее решения был применен метод конечных элементов и программный комплекс ANSYS. В качестве индентора использован конус со специальными параметрами угла конусности и радиуса закругления при вершине. Такой индентор имеет ту же функцию проекции площади и глубины, что и стандартный индентор Берковича, который применяли при проведении экспериментов. Полученная модель позволяет строить кривые нагрузка—разгрузка, аналогичные получаемым при инструментальном индентировании. Основная цель работы — получить значение предела текучести тонких полимерных композитных покрытий путем сравнения и приближения экспериментальных и расчетных кривых, имея набор входных параметров. В дальнейшем найденную таким образом величину можно принять за приближенное значение предела текучести материала. Показано, что применение алгоритма оптимизации для корректировки значения предела текучести покрытия обуславливает хорошее согласование результатов моделирования и эксперимента.

Введение

Современная инженерия поверхности включает в себя процессы модифицирования поверхности изделий путем нанесения на нее различных покрытий [1—4]. Среди материалов, применяемых для создания покрытий, широкое распространение получили полимерные композитные материалы [5—7]. Эти композиты имеют матрицу на основе полимерного материала с наполнителем. В качестве наполнителя используются различные вещества (углеродные, стеклянные, органические синтетические волокна, мелкодисперсные порошковые наполнители) [8—11]. Как правило, такие поверхностные структуры обладают малой или сверхмалой толщиной. В связи с этим возникает проблема определения их физико-механических свойств, поскольку классические методы в данном случае малоэффективны. Так, например, для определения прочностных характеристик покрытий согласно классическим методам, таким как испытания на растяжение/сжатие, необходимо предварительно отделить покрытие от основания. Даже для металлических покрытий относительно большой толщины данная задача является непростой, а для тонких поли-

мерных покрытий практически невыполнимой. В связи с этим активно внедряются новые методики исследований, в том числе и компьютерное моделирование [12—14].

Одним из методов, широко применяемых при исследовании тонких покрытий и пленок, является метод непрерывного индентирования [15, 16]. Он заключается в одновременном измерении силы вдавливания и перемещения индентора специальной формы для построения кривой нагрузка—разгрузка. Анализ такой кривой позволяет оценить твердость, модуль упругости, ползучесть и другие характеристики материала. Однако экспериментальное определение некоторых характеристик, таких как предел текучести, для данных структур достаточно трудоемкое, а порой, и невозможное. Как известно, пределом текучести называют напряжение, после которого в разгруженном образце остается необратимая деформация (обычно принимают 0,2%). По достижении предела текучести в подавляющем количестве материалов происходит деформационное упрочнение, и для того чтобы его деформировать, необходимо прикладывать всё большую нагрузку. Предел текучести является важным параметром, с помощью которого рассчитывают допустимые напряжения для пластичных материалов.

В настоящей работе сделана попытка оценить предел текучести тонких покрытий из полимерных композитных материалов с матрицей на основе фенилона С-2 и различными мелкодисперсными наполнителями с помощью сравнения конечно-элементной модели индентирования и экспериментальных данных. В [17, 18] показано, что с помощью конечно-элементной модели индентирования можно достаточно точно воспроизводить результаты эксперимента.

Была рассмотрена осесимметричная контактная задача для двухслойного основания. Конечно-элементное моделирование выполняли с помощью программного комплекса ANSYS. В качестве индентора применяли конус со специальными параметрами угла конусности и радиуса скругления при вершине. Такой индентор имеет ту же функцию проекции площади и глубины, что и стандартный индентор Берковича [19]. Полученная модель позволяет строить кривые нагрузка—разгрузка, аналогичные экспериментальным. Для каждого покрытия был проведен эксперимент на комплексе NanoTest 600 (Micro Materials Limited, UK). Полученные экспериментальные значения упругих характеристик композитов использовали в качестве входных параметров при расчетах. На основании сравнения кривых нагрузка—разгрузка проведена оптимизация значения предела текучести с целью получения максимального совпадения кривых.

Результаты исследования показали, что, применив алгоритм оптимизации для корректировки значения предела текучести покрытия, удастся добиться хорошего согласования между результатами моделирования и эксперимента.

Описание эксперимента и постановка соответствующей контактной задачи

В качестве инструментария для определения упругих характеристик покрытий использовали метод индентирования и комплекс для определения физико-механических характеристик материалов в субмикро- и наномасштабе NanoTest 600. Индентирование представляет собой процесс многократного погружения с линейно нарастающей нагрузкой индентора с заранее известными геометрическими параметрами и механическими свойствами в исследуемый материал. Общая схема данного процесса нагружения приведена на рис. 1. Здесь t_{up} — время линейного нарастания нагрузки от 0 до максимальной величины P_{max} ; t_{cr} — время выдержки при неизменном значении P_{max} (для исследования ползучести); t_{down} — время линейного снижения нагрузки до 10% от P_{max} ; t_0 — время выдержки при неизменном значении P_0 (для исследования кинетики восстановления глубины отпечатка после разгрузки, для коррекции на тепловой дрейф и др.). Процедура индентирования заключалась в выполнении 10 уколов в различных местах поверхности образца индентором Берковича по схеме, представленной на рис. 1. Места уколов выбираются таким образом, чтобы избежать влияния боковых границ образца. Величину усилия, прикладываемого к индентору, подбирали такой, чтобы максимальная глубина погружения не превышала 1/10 толщины покрытия. Таким образом, удается исключить влияние подложки на результаты измерений [20]. Для каждого цикла нагружения строили кривую индентирования (P — h -диаграмма) и с помощью метода Оливера—Фарра [21] рассчитывали искомые параметры микротвердости, модуля упругости. Полученные данные усредняли и строили итоговую кривую индентирования, которую впоследствии и сравнивали с расчетной.

В качестве математической модели, соответствующей эксперименту, рассматривали осесимметричную квазистатическую контактную задачу об индентировании упругого цилиндра с композитным упруго-

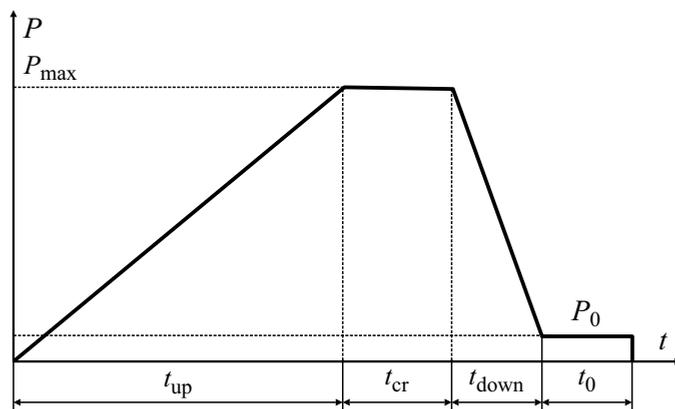


Рис. 1. Типовой трапециoidalный импульс нагружения. Пояснения в тексте.

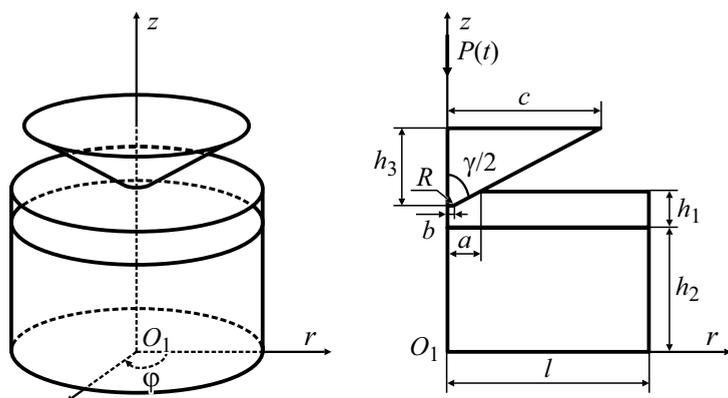


Рис. 2. Геометрия задачи. Пояснения в тексте.

пластическим покрытием жестким штампом. Основание представляет собой двухслойную конструкцию $\{0 \leq r \leq l; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq h_1 + h_2\}$, нижний слой которой $\{0 \leq r \leq l; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq h_2\}$ упругий, а верхний $\{0 \leq r \leq l; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; h_2 \leq z \leq h_1 + h_2\}$ — упругопластический (рис. 2—а), где r, φ, z — цилиндрические координаты. Штамп имеет сфероконическую форму с углом конусности γ и радиусом скругления при вершине R . Его геометрия описывается следующим образом: $\{0 \leq r \leq c; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; h_1 + h_2 \leq z \leq h_1 + h_2 + h_3\}$, где $h_3 = (c - b) \cdot \operatorname{tg} \gamma + R(1 - \cos \gamma)$ — высота индентора; $b = R \sin \gamma$ — радиус окружности, по которой соприкасаются сферическая и коническая поверхности индентора, $c = l/3$.

Поверхность основания $\{0 \leq r \leq l; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; z = 0\}$ жестко закреплена, боковая поверхность $\{r = l; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq h_1 + h_2\}$ и поверхность $\{a \leq r \leq l; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; z = h_1 + h_2\}$ вне штампа свободны от напряжений; a — радиус области контакта. Штамп вдавливается в основание нормальным усилием $P(t)$ в соответствии со схемой, показанной на рис. 1, трение под штампом при этом отсутствует.

Для описания напряженно-деформированного состояния верхнего слоя $\{0 \leq r \leq l; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; h_2 \leq z \leq h_1 + h_2\}$ используем соотношения теории упругопластичности [22, 23], а нижнего слоя $\{0 \leq r \leq l; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq h_2\}$ — соотношения теории упругости [24]. В качестве модели, описывающей поведение материала покрытия, выбрана модель билинейного изотропного упрочнения. Билинейное изотропное упрочнение описывается билинейной зависимостью эффективного напряжения от эффективной деформации. Начальный наклон диаграммы зависимости напряжение—деформация — это модуль упругости материала. За пределами заданного начального предела текучести развивается пластическая деформация, и зависимость напряжения от общей деформации продолжается вдоль линии с наклоном, определяемым заданным касательным модулем. Будем предполагать, что деформация квазистатическая, без учета инерциальных членов в уравнениях.

Параметры слоев следующие: верхнего — $E^{(1)}$ — модуль упругости, $\nu^{(1)}$ — коэффициент Пуассона, $\sigma_y^{(1)}$ — предел текучести, $G^{(1)}$ — касательный модуль упругости; нижнего — $E^{(2)}$, $\nu^{(2)}$ — модуль упругости, коэффициент Пуассона соответственно.

Граничные условия примут вид

$$\begin{aligned} u_r^{(2)} = u_z^{(2)} = 0, \quad \{0 \leq r \leq l; z = 0\}, \\ u_r^{(1)} = u_r^{(2)}, \quad \{0 \leq r \leq l; z = h_2\}, \\ \sigma_r^{(1)} = \sigma_r^{(2)}, \tau_{rz}^{(1)} = \tau_{rz}^{(2)}, \quad \{0 \leq r \leq l; z = h_2\}, \\ \tau_{rz}^{(1)} = 0, \quad \{0 \leq r \leq l; z = h_1 + h_2\}, \\ \sigma_r^{(1)} = 0, \quad \{r > a; z = h_1 + h_2\}, \\ u_z^{(1)} = -\delta(t) + \frac{r^2}{2R}, \quad \{0 < r < b; z = h_1 + h_2\}, \\ u_z^{(1)} = -\delta(t) + \text{tg } \gamma \cdot r + b, \quad \{b < r < a; z = h_1 + h_2\}. \end{aligned}$$

Здесь $u_r^{(i)}$, $u_z^{(i)}$ — перемещения вдоль осей r и z соответственно; $\sigma_r^{(i)}$, $\tau_{rz}^{(i)}$ — нормальные и касательные напряжения в верхнем при $i = 1$ и нижнем при $i = 2$ слое соответственно; a — радиус области контакта; $\delta(t)$ — смещение штампа под действием силы $P(t)$.

При проведении расчетов использовали метод конечных элементов и программный комплекс ANSYS [25, 26]. На специальном языке Mechanical APDL была разработана программа, позволяющая строить и рассчитывать поставленную задачу при разных значениях входных параметров.

Основная идея работы — найти значение предела текучести тонких полимерных композитных покрытий путем сравнения и приближения экспериментальных и расчетных кривых, имея набор входных параметров. В дальнейшем полученное значение можно принять за приближенное значение предела текучести материала.

Проведение расчетов и сопоставление результатов

При расчетах использованы следующие геометрические параметры: толщина покрытия $h_1 = 50$ мкм (соответствует толщине покрытия экспериментальных образцов), толщина подложки $h_2 = 100$ мкм, радиус $l = 150$ мкм. Радиус подобран таким образом, чтобы исключить влияние боковой границы на напряжения и деформации. При аппроксимации индентора Берковича применяли упрощенную модель, описанную в [27]. Согласно этой модели для штампа угол конусности γ задавали равным $140,6^\circ$, а радиус скругления при вершине был рассчитан по приведенной

Табл. 1

Физико-механические характеристики покрытий

Характеристика	Материал покрытия		
	Фенилон	Фенилон + 5% Ф4МБ	Фенилон + 5% ПФМС-4
$E^{(1)}$, ГПа	6,4	5,11	6,32
$H^{(1)}$, МПа	366	289	330
$\nu^{(1)}$	0,3	0,33	0,3
$\sigma_y^{(1)}$, МПа	215	-	-
$G^{(1)}$, ГПа	2,46	1,92	2,43

в [27] формуле и был равен $R = 400$ нм. Сфероконический индентор с такими параметрами имеет ту же функцию проекции площади и глубины, что и стандартный индентор Берковича, использованный при проведении эксперимента. Остальные необходимые параметры вычисляют из этих значений. Для всех рассмотренных покрытий в качестве материала подложки использовали сталь с модулем упругости $E^{(2)} = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu^{(2)} = 0,28$.

На первом этапе расчетов было выполнено тестирование модели и оценка погрешности получаемых результатов. Для этого в качестве тестового материала был выбран фрагмент образца из чистого фенилона, полученный методом горячего прессования из порошка, для которого были определены все необходимые характеристики (табл. 1).

Для получения экспериментальной кривой нагрузка—разгрузка и последующего сравнения ее с расчетной проведена процедура индентирования тестового образца с покрытием из фенилона на комплексе NanoTest 600. Исходя из соображений, описанных в [20], максимальная нагрузка P_{\max} была установлена равной 100 мН. Для временных параметров нагружения (см. рис. 1) устанавливали следующие значения: $t_{\text{up}} = 20$ с, $t_{\text{cr}} = 0$ с, $t_{\text{down}} = 20$ с, $t_0 = 60$ с. Полученную итоговую усредненную кривую индентирования сравнивали с расчетной. Погрешность результатов моделирования оценивали путем вычисления средней абсолютной процентной ошибки (MAPE) по девяти точкам кривой: при нагрузках 20, 40, 60, 80 и 100 мН на этапе нагружения и 80, 60, 40 и 20 мН — на этапе разгрузки (схема изображена на рис. 3—а) по формуле

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{h_i^{\text{exp}} - h_i^{\text{mod}}}{h_i^{\text{exp}}} \right| \cdot 100\%,$$

где h_i^{exp} — глубина проникновения индентора при нагрузке P_i на экспе-

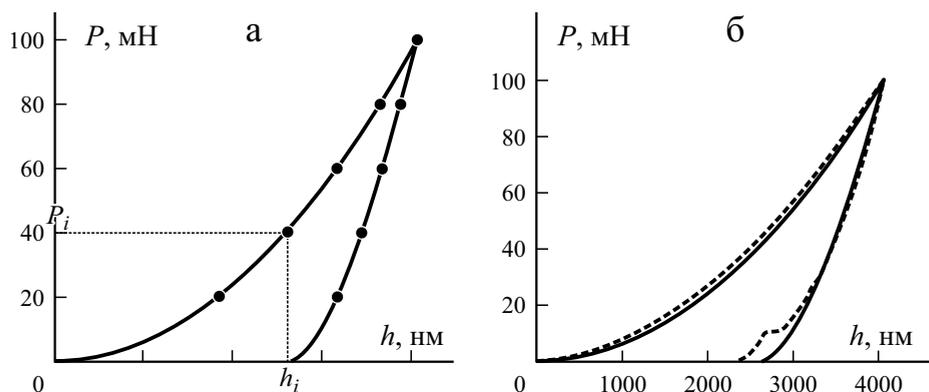


Рис. 3. Схема расположения точек для расчета погрешности моделирования (а) и сравнение экспериментальной (---) и расчетной (—) кривых для образца с покрытием из фенилона (б).

риментальной кривой; h_i^{mod} — глубина проникновения индентора при нагрузке P_i на расчетной кривой, $n = 9$ — количество точек.

Как видно из данных рис. 3—б, с помощью моделирования удалось добиться достаточно хорошего совпадения кривых. Рассчитанная средняя абсолютная процентная ошибка равна 2,22%. Следовательно, можно сделать вывод о том, что модель позволяет с высокой точностью воспроизводить результаты эксперимента. Стоит отметить, что участок кривой разгрузки, на котором производилась выдержка, не учитывали при расчете погрешности, так как коррекцию на тепловой дрейф в модели не проводили.

На основании приведенного вывода сделано предположение о том, что возможно количественно оценить значение предела текучести тонкого полимерного композитного покрытия путем сравнения экспериментальной и расчетной кривых индентирования и минимизации средней абсолютной процентной ошибки. Данная задача была решена на втором этапе исследований. В качестве материалов покрытий использовали двухфазные композиты с матрицей на основе фенилона и наполнителями в виде мелкодисперсного порошка Ф4МБ (политетрафторэтилен) и 5% по объему кремнийорганической жидкости ПФМС-4. Были изготовлены соответ-

Табл. 2

Значения предела текучести и МАРЕ, полученные для покрытий из фенилона + 5%Ф4МБ и фенилона + 5%ПФМС-4

Характеристика	Материал покрытия	
	Фенилон + 5% Ф4МБ	Фенилон + 5% ПФМС-4
σ_T , МПа	6,5	6,9
МАРЕ, %	2,77	2,42

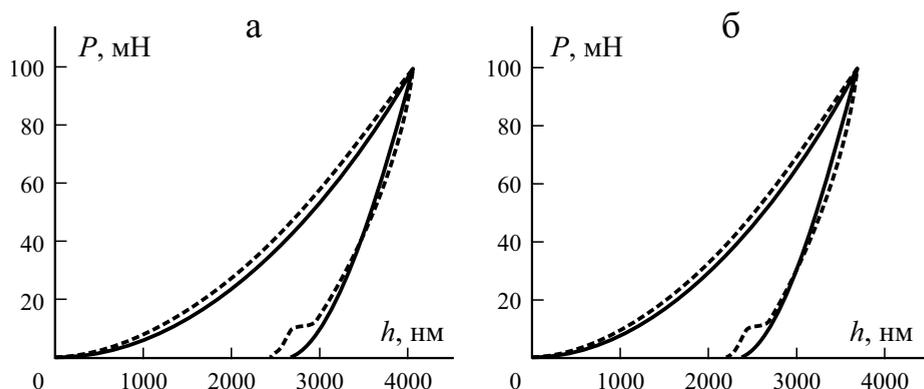


Рис. 4. Сравнение экспериментальной (---) и расчетной (—) кривых для образцов с покрытием из фенилона + 5%Ф4МБ (а) и фенилона + 5%ПФМС-4 (б).

ствующие образцы и для каждого проведена процедура индентирования, аналогичная процедуре с тестовым образцом с покрытием из фенилона (см. табл. 1). Первоначально неизвестное значение предела текучести $\sigma_y^{(1)}$ задавали равным 1/3 от полученного значения микротвердости $H^{(1)}$. Далее осуществляли оптимизацию данного параметра таким образом, чтобы добиться значения МАРЕ не более 3%. На рис. 4 проведено сравнение итоговых кривых, удовлетворяющих поставленному условию. Значения предела текучести и МАРЕ представлены в табл. 2.

Используя определенные значения предела текучести, рассчитали напряжено-деформированное состояние покрытий и определили максимальную глубину погружения индентора h_{max} , остаточную глубину отпечатка после снятия нагрузки Δh , нормальные $\sigma_y^{(1)}$, $\sigma_y^{(1\Delta)}$ и эквивалентные напряжения по Мизесу $\sigma_{EQV}^{(1)}$, $\sigma_{EQV}^{(1\Delta)}$ при максимальной нагрузке и после разгрузки соответственно в окрестности узла с координатами

Табл. 3

Характеристика	Значения характеристик исследованных покрытий		
	Материал покрытия		
	Фенилон	Фенилон + 5% Ф4МБ	Фенилон + 5% ПФМС-4
h_{max} , нм	3035	4115	3731
Δh , нм	1334	2652	2369
$\sigma_y^{(1)}$, ГПа	2,12	1,54	1,92
$\sigma_y^{(1\Delta)}$, ГПа	0,065	0,036	0,053
$\sigma_{EQV}^{(1)}$, ГПа	2,09	1,65	2,01
$\sigma_{EQV}^{(1\Delta)}$, ГПа	0,29	0,11	0,16

$\{r = 0; \varphi = 0; z = h_1 + h_2\}$, а также коэффициент упругого восстановления K_e (табл. 3). Значения $\sigma_{\text{EQV}}^{(1)}$ и K_e вычисляли по формулам

$$\sigma_{\text{EQV}}^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r^{(1)} - \sigma_\varphi^{(1)})^2 + (\sigma_\varphi^{(1)} - \sigma_z^{(1)})^2 + (\sigma_r^{(1)} - \sigma_z^{(1)})^2 + 6(\tau_{r\varphi}^{(1)2} + \tau_{\varphi z}^{(1)2} + \tau_{rz}^{(1)2})},$$

$$K_e = \frac{h_{\text{max}} - \Delta h}{h_{\text{max}}}.$$

Расчеты показали, что покрытия с наполнителем оказались более пластичными, чем основа в виде фенилона, что вполне ожидаемо. Это выражено в снижении прочностных характеристик материала, что вытекает из значений эквивалентных напряжений по Мизесу $\sigma_{\text{EQV}}^{(1)}$, а также показателя упруго восстановления K_e .

Заключение

Результаты численных экспериментов по моделированию процесса индентирования относительно тонких полимерных композитных покрытий позволяют сделать вывод о том, что разработанная модель с высокой точностью воспроизводит результаты эксперимента. Таким образом, можно путем максимального приближения расчетной и экспериментальной кривых индентирования проводить количественную оценку физико-механических характеристик материалов.

По результатам расчетов напряженно-деформированного состояния установлено, что введение рассмотренных наполнителей в матрицу обуславливает снижение ее упругих и прочностных характеристик, что необходимо учитывать при изготовлении деталей с такими покрытиями для конкретных условий эксплуатации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Южного федерального университета, внутренний грант № ВнГр-07/2020-04-ИМ (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dwivedi D. K.* Surface engineering: enhancing life of tribological components. — New Delhi: Springer Publications, 2018. — 224 p.
2. *Blednova Zh. M., Rusinov P. O.* Intellectualization of surface layers, working under cyclic loading and reversing friction // *Appl. Mech. Mater.* — 2015. — Vol. 798. — P. 440—446.
3. *Bao W., Deng Z., Zhang S., Ji Z., Zhang H.* Next-generation composite coating system: nanocoating // *Frontiers in Materials.* — 2019. — Vol. 6, Article 72.
4. *Aliofkhazraei M.* Anti-abrasive Nanocoatings. Current and Future Applications. — Elsevier, 2015. — 582 p.

5. *Burriss D. L., Boesl B., Bourne G. R., Sawyer W. G.* Polymeric nanocomposites for tribological applications // *Macromol. Mater. Eng.* — 2007. — Vol. 292, Iss. 4. — P. 387—402.

6. *Friedrich K., Chang L., Hauptert F.* Current and future applications of polymer composites in the field of tribology // L. Nicolais, M. Meo, E. Milella (Eds.) *Composite Materials.* — London: Springer, 2011. — P. 129—167.

7. *Михайлин Ю. А.* Конструкционные полимерные композитные материалы. — М.: НОТ, 2013. — 822 с.

8. *Danilaev M. P., Bogoslov E. A., Kuklin V. A., Klabukov M. A., Khamidullin O. L., Pol'sky Yu. E., Mikhailov S. A.* Structure and mechanical properties of a dispersedly filled transparent polycarbonate // *Mech. Compos. Mater.* — 2019. — Vol. 55, No. 1. — P. 53—62.

9. *Ivanochkin P. G., Danilchenko S. A., Novikov E. S.* Antifriction composites based on phenylene C2 for work under conditions of dry friction // *Proc. Eng.* — 2016. — Vol. 150. — P. 520—526.

10. *Semenov N. A., Kelbysheva E. S.* Creating a new elastomeric material with a polyimide filler and studying its viscoelastic properties under applied external electric fields and dynamic loads // *Mech. Compos. Mater.* — 2020. — Vol. 56, No. 6. — P. 1189—1198.

11. *Yildizel S. A., Timur O., Ozturk A. U.* Abrasion resistance and mechanical properties of waste-glass-fiber-reinforced roller-compacted concrete // *Mech. Compos. Mater.* — 2018. — Vol. 54, No. 2. — P. 371—378.

12. *Ostiguy P.-C., Quaegebeur N., Masson P.* Non-destructive evaluation of coating thickness using guided waves // *NDT & E Int.* — 2015. — Vol. 76. — P. 17—25.

13. *Ahmed R., Ashraf A., El-Ameen M., Faisal N., El-Sherik A., Elakwah Y., Goosen M.* Single asperity nano-scratch behaviour of HIPed and cast Stellite 6 alloys // *Wear.* — 2014. — Vol. 312. — P. 70—82.

14. *Chebakov M. I., Danilchenko S. A.* Wear simulation of a spherical hinge joint with a thin composite coating // *Mech. Compos. Mater.* — 2021. — Vol. 57, No. 5. — P. 667—674.

15. *Islam M., Shakil S. I., Shaheen N. M., Bayati P., Haghshenas M.* An Overview of microscale indentation fatigue: composites, thin films, coatings, and ceramics // *Micron.* — 2021. — Vol. 148. — P. 103110.

16. *Bhushan B.* Nanomechanical Characterization of Solid Surfaces and Thin Films. *Nanotribology and Nanomechanics.* — Springer Int. Publ. AG, 2017. — P. 177—251.

17. *Shojaei P., Scazzosi R., Trabia M., O'Toole B., Giglio M., Zhang C., Liao Y., Manes A.* An approach for material model identification of a composite coating using micro-indentation and multi-scale simulations // *Coatings.* — 2022. — Vol. 12, Iss. 1.

18. *Iankov R., Cherneva S., Stoychev D.* Investigation of material properties of thin copper films through finite element modeling of microindentation test // *Appl. Surf. Sci.* — 2008. — Vol. 254. — P. 5460—5469.

19. *Hay J. L., Pharr G.* Instrumented indentation testing // *Mech. Test. Evaluation.* — Ohio: ASM Int., Mater. Park, 2000. — P. 231—240.

20. *Головин Ю. И.* Наноиндентирование и его возможности. — М.: Машиностроение, 2009. — 312 с.

21. *Oliver W. C., Pharr G. M.* Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // *J. Mater. Res.* — 2004. — Vol. 19. — P. 3—20.

22. *Ильюшин А. А.* Пластичность. Ч. 1. Упруго-пластические деформации. — М.: ОГИЗ, 1948. — 378 с.

23. *Петров В. В.* Нелинейная инкрементальная строительная механика. — М.: Инфра-Инженерия, 2014. — 480 с.

24. *Лурье А. И.* Теория упругости. — М.: Наука, 1970. — 940 с.
25. *Madenci E., Guven I.* The finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS. — N. Y.: Springer, 2006. — 695 p.
26. URL: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v190/ans_ctec/ctec_includewear.html
27. *Pelletier H., Krier J., Cornet A., Mille P.* Limits of using bilinear stress-strain curve for finite element modeling of nanoindentation response on bulk materials // *Thin Solid Films*. — 2000. — Vol. 379, Iss. 12. — P. 147—155.

Поступила в редакцию 05.04.2022
Окончательный вариант поступил 04.07.2022
Received Apr. 5, 2022 (July 4, 2022)
