

XVII Международная конференция
МЕХАНИКА, РЕСУРС И ДИАГНОСТИКА материалов и конструкций
18-22 декабря 2023 г.

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ
УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
МАТЕРИАЛА ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ
ПОЛЗУЧЕСТИ В УСЛОВИЯХ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Авторы: Смирнов С.В., Мясникова М.В.

marina_31076@mail.ru

ФГБУН Институт машиноведения
Уральского отделения Российской академии наук

г. Екатеринбург



Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 24-29-00528

Проблема: накопление деформации в материале при длительном постоянном внешнем механическом воздействии (явление ползучести); необходимость исследований, направленных на установление соотношений, связывающих напряжения и деформации с учетом фактора времени.

Подход: комбинированный подход, сочетающий в себе экспериментальные методы и численное моделирование условий проведения эксперимента с использованием реологической модели вязкоупругости.

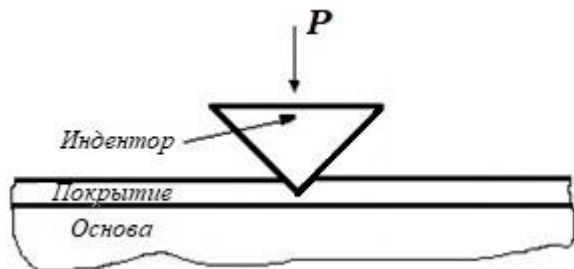
Реологические модели вязкоупругости для описания механики полимеров в виде:

- комбинаций из вязких (демпферов) и упругих (пружин) элементов (модели Максвелла, Фойгта и др.), реализованные в виде соотношений между напряжениями и деформациями как дифференциальных зависимостей от времени. Достаточно корректно описывают ползучесть полимеров на стадии установившегося течения, но непригодны для описания первой стадии кратковременной неустановившейся ползучести;
- интегральных моделей Л. Больцмана и В. Вольтерра. Достоверно описывают деформацию ползучести в переменных условиях нагружения, но трудны для решения практических задач ввиду сложности их численной реализации;
- упрощенных инженерных технических моделей ползучести в виде эмпирических зависимостей степени или скорости деформации ползучести от времени, напряжения и температуры.

Цель работы: по результатам конечно-элементного моделирования процесса индентирования с выдержкой в режиме ползучести идентифицировать одну из эмпирических упруго-вязко-пластических моделей материала полимерного покрытия

Объект исследования: полимерное покрытие на основе коммерческой эпоксидной смолы ЭД-20 с полиэтиленполиаминовым отвердителем. Толщина покрытия - 150 мкм.

Испытания методом инструментального индентирования



Испытание осуществляли с использованием универсальной системы для наномеханических испытаний NanoTriboindenter TI 950*.

Индентор – алмазная трехгранная пирамида Берковича.

Процесс индентирования осуществляли в два этапа:

- стадия внедрения, при котором вертикальное усилие на индентор P линейно возрастало от 0 до своего максимального значения, равного 10 мН за 5 сек;
- стадия выдержки, которая осуществлялась в течении 100 сек при постоянном значении $P = 10$ мН.

Нагружение выполняли при температуре $22 \pm 1^\circ\text{C}$.

В процессе испытания получили диаграмму индентирования, представляющую собой зависимость усилия P от глубины внедрения индентора h .

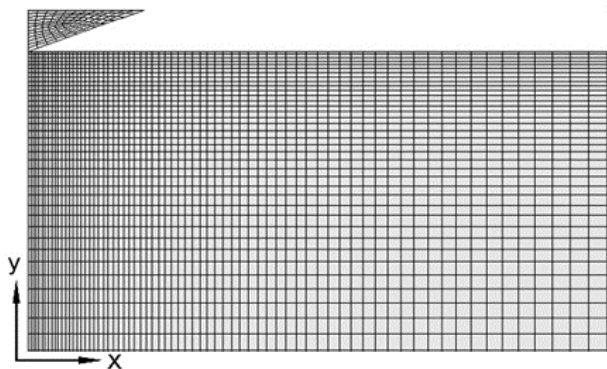
* Экспериментальные исследования проведены на оборудовании Центра коллективного пользования «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН

Численное моделирование процесса индентирования**

1. Пирамидальный индентор Берковича был заменен эквивалентным коническим индентором с углом конусности при вершине $140,6^\circ$. Подобная замена позволила провести моделирование в осесимметричной постановке с использованием 2D вычислительной модели.

2. Внедрение индентора осуществляется на глубину, не превышающую 10 % толщины покрытия, влияние подложки на результаты моделирования исключается. Поэтому вычислительная модель состояла из двух компонентов: пластины, имитирующей полимерное покрытие, и конического индентора.

3. С учетом симметрии процесса деформации спроектирована $\frac{1}{2}$ часть композиции. При этом ось симметрии y закреплена от перемещений в горизонтальном направлении x .



Процесс индентирования осуществляли в динамической постановке, накладывая на индентор силовые граничные условия, представляющие собой зависимость вертикального усилия на индентор P от времени t , в два этапа согласно условиям проведения эксперимента.

** Выполнено в программной среде ANSYS на супервычислителе кластерного типа URAN в Центре коллективного пользования Института математики и механики УрО РАН

Реология материала компонентов вычислительной модели

Материал индентора: изотропная линейно-упругая среда (модуль Юнга $E_{indentor} = 1,14$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu_{indentor} = 0,07$)

Реология материала покрытия: комбинированной моделью изотропной упруго-вязко-пластической среды.

Полагали, что полная эквивалентная деформация материала покрытия складывается из суммы упругой, пластической деформации и деформации ползучести:

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{cr}$$

До достижения эквивалентным напряжением σ значения σ_0 (условный предел текучести) материал подчиняется линейному закону Гука:

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma}{E}, \quad \sigma < \sigma_0 \quad \sigma_0 = 0,33HV$$

При $\sigma \geq \sigma_0$ отвержденная эпоксидная смола находится в стеклообразном состоянии и проявляет свойства близкие к идеально-пластической среде, что позволяет описать ее поведение в пластической области линейной функцией с модулем деформационного упрочнения E_T :

$$\varepsilon_{pl} = \frac{1}{E_T} (\sigma - \sigma_0), \quad \sigma \geq \sigma_0 \quad E_T = 0,001$$

Вязкостные свойства материала покрытия описывали эмпирической зависимостью скорости эквивалентной деформации ползучести от эквивалентного напряжения σ , времени нагружения t и абсолютной температуры T , реализованной в ANSYS как Time Hardening Creep Model:

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3} e^{-C_4/T}$$

Поскольку индентирование осуществляется в изотермическом режиме, то:

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = C_1^* \sigma^{C_2} t^{C_3} \quad C_1^* = C_1 e^{-C_4/T}$$

Определение механических характеристик компонентов комбинированной модели материала покрытия

Коэффициент Пуассона $\nu = 0,35$ заимствовали из работы [Jia U., Ke P., Gong X., Zhang Z. Creep and recovery of polypropylene/carbon nanotube composites // International Journal of Plasticity. 2011. No.27. P. 1239–1251].

Модуль упругости E и твердость HV определяли по результатам серии испытаний на внедрение индентора Берковича с помощью программного обеспечения прибора NanoTriboindenter TI 950 по методике Оливера-Фарра .

В соответствии с данной методикой приведенный модуль упругости рассчитывается по формуле:

$$E^* = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A}}$$

Контактная площадь A индентора Берковича определяется по контактной глубине невосстановленного отпечатка h_c :

$$A(h_c) = 24,5h_c^2$$

Контактную глубину h_c находили из соотношения: $h_c = h_{max} - \beta \frac{P_{max}}{S}$

где P_{max} – максимальное значение приложенной нагрузки; h_{max} – максимальная глубина вдавливания индентора при достижении P_{max} ; $S = dP/dh$ – контактная жесткость на начальном участке стадии разгрузки; β – коэффициент, зависящий от геометрии индентора ($\beta=0,75$ для инденторов Виккерса и Берковича).

Упругие характеристики материала покрытия E и ν связаны с приведенным модулем упругости соотношением:

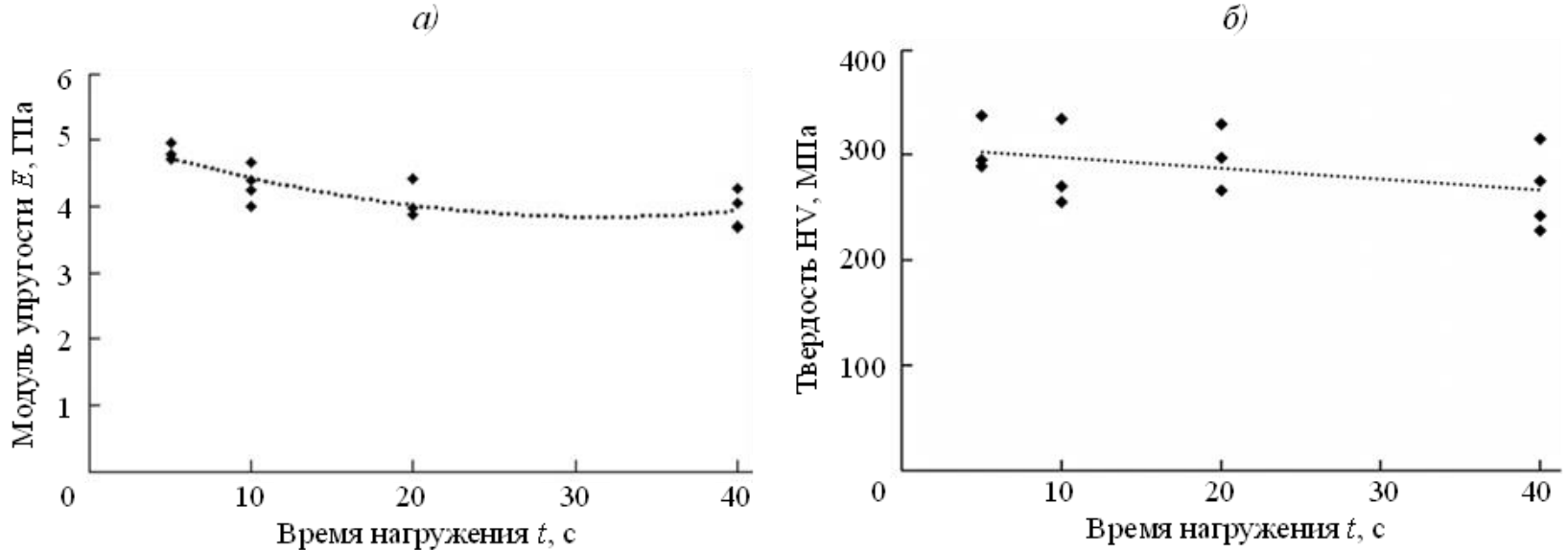
$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_{indenter}^2}{E_{indenter}}$$

Твердость HV определяли, как отношение максимальной приложенной нагрузки P_{max} к контактной площади индентора A :

$$HV = \frac{P_{max}}{A}$$

Процессы ползучести могут происходить и на стадии активного вдавливания индентора. Поэтому, чтобы корректно определить значения модуля упругости E и твердости HV материала покрытия необходимо осуществлять вдавливание индентора с неопределенно высокой скоростью, способной подавить проявление вязкостных свойств. Поскольку такие эксперименты на задействованном оборудовании провести невозможно, то осуществляли испытания на индентирование с разной скоростью вдавливания, а искомые значения E и HV определили экстраполяцией полученных зависимостей в точку с $t = 0$.

Влияние времени нагружения индентора на модуль упругости E (а) и твердость HV (б)



$E = 5100$ МПа и $HV = 310$ МПа. Величина предела текучести σ_0 составляет $=102$ МПа.

Комбинированная упруго-вязко-пластическая модель материала покрытия в общем виде описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \varepsilon_{el} = \frac{\sigma}{E}, \text{ где } \sigma < \sigma_0 \\ \varepsilon_{pl} = \frac{1}{E_T} (\sigma - \sigma_0), \text{ где } \sigma \geq \sigma_0 \\ \dot{\varepsilon}_{cr} = C_1^* \sigma^{C_2} t^{C_3} \end{cases}$$

C_1^* , C_2 , C_3 – эмпирические константы, определяемые в результате идентификации модели.

Функция невязки между экспериментальными и расчетными значениями глубины внедрения индентора:

$$\delta = \sum_{i=1}^2 \left| \frac{h_{ex_i} - h_i}{h_{ex_i}} \right| \rightarrow \min,$$

$$C_1^* = 0,12 * 10^{-7};$$

$$C_2 = 0,65;$$

$$C_3 = 0,43.$$

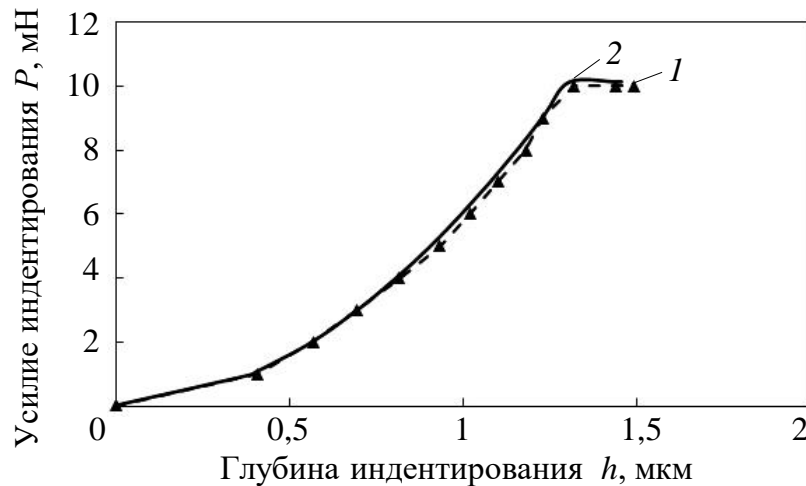
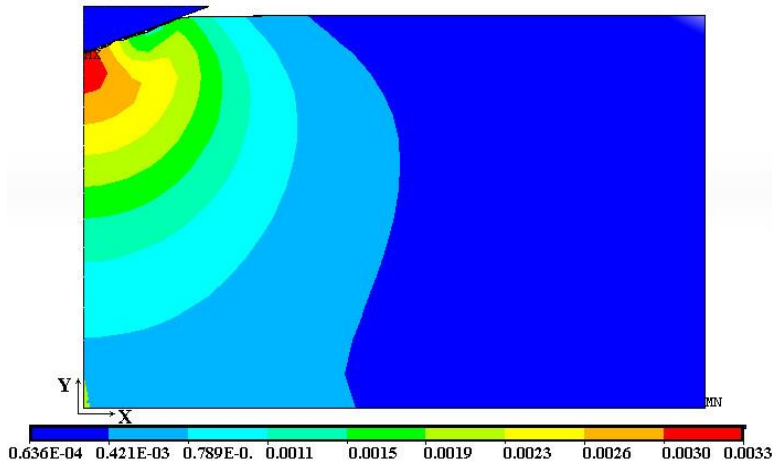
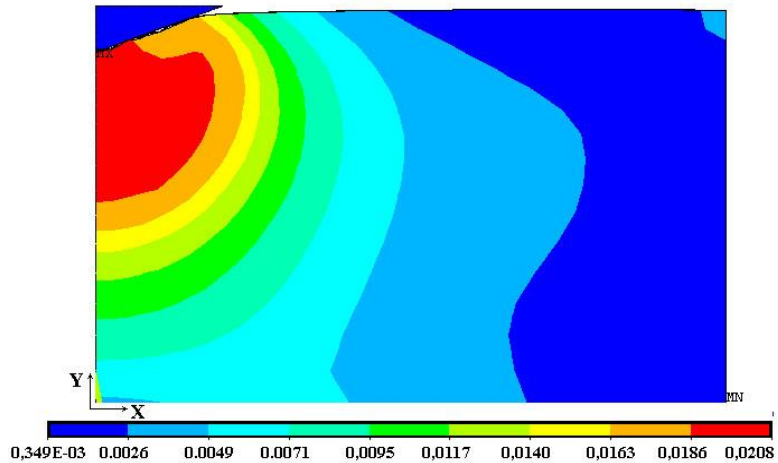


Диаграмма индентирования:

1 – расчетная кривая;
2 – экспериментальная кривая

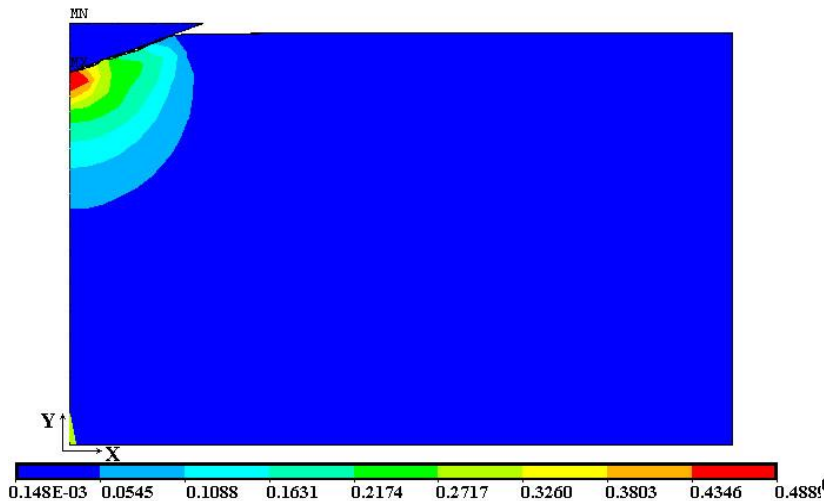


(a)

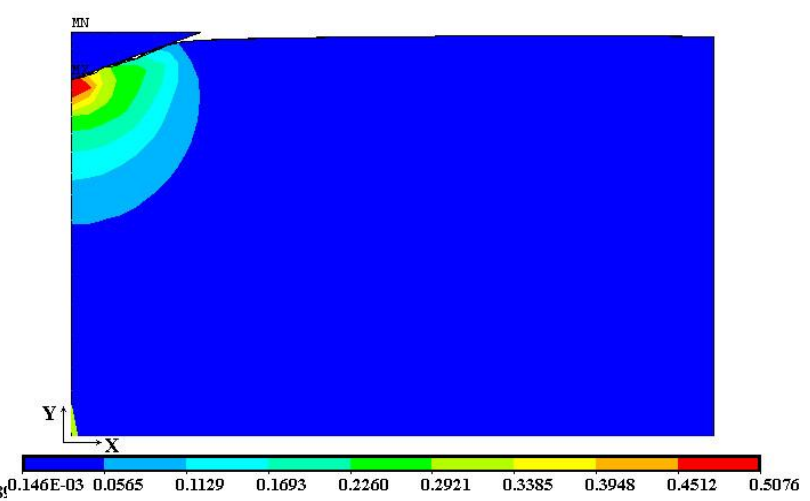


(б)

Распределение эквивалентной деформации ползучести в поверхностном слое покрытия в конце первого (а) и второго (б) этапов нагружения



(a)



(б)

Распределение полной эквивалентной деформации в поверхностном слое покрытия в конце первого (а) и второго (б) этапов нагружения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый подход к анализу результатов испытаний на индентирование с выдержкой при максимальной нагрузке в режиме ползучести полимерных покрытий с использованием численного моделирования позволяет:

- определить эмпирические коэффициенты в модели, описывающей упруговязкопластическое поведение материала полимерного покрытия;
- установить закономерности изменения вкладов упругой, вязкой и пластической деформаций в общую эквивалентную деформацию при индентировании, а также оценить области их распространения;
- проводить испытания по определению упруговязкопластических свойств материала покрытия на элементах поверхности без изготовления специальных образцов вследствие локальности воздействия при применении метода индентирования.

Авторы выражают благодарность инженеру лаборатории микромеханики материалов Института машиноведения УрО РАН **Мичурову Николаю Сергеевичу** за помощь в проведении эксперимента, а также заведующему отделом системного обеспечения Центра коллективного пользования ИММ УрО РАН «Суперкомпьютерный центр ИММ УрО РАН» **Игумнову Александру Станиславовичу** за помощь в проведении численных расчетов.

Спасибо за внимание!