

УДК 539.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА, УПРУГИХ И ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ – ПОЛИМЕРНОЕ ОСНОВАНИЕ – МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ОСНОВА В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ

© И.В. Ушаков

Ushakov I.V. Mass transfer modelling of composites elastic and plastic deformation. Plating – the polymer base – metallic base in conditions of local loading. The processes of deformation and destruction of composite plating – polymer substrate – a metallic base in condition of local loading were investigated by modelling experiments. The quantitative characteristics of horizontal and vertical displacement of composite material of polymer plastic substrate were defined. The regularities of elastic deformation of composite characterized by good elastic properties were established. The features of deformation and destruction patterns in real and model experiments were discussed.

Определение механических характеристик твердых тел является важной задачей как при практическом использовании материалов, так и при проведении прикладных и фундаментальных исследований [1–3]. Одним из широко распространенных способов механических испытаний является метод микроиндентирования [4]. Данный метод широко используется в ходе проведения механических испытаний как традиционных, так и новых материалов. Однако, в связи с тем, что некоторые материалы, например металлическое стекло, достаточно тонкие (≈ 30 мкм), такие исследования часто проводятся методом микроиндентирования образца, нанесенного на различные подложки, в том числе на подложки, изготовленные из сравнительно мягкого, пластичного материала [5]. После проведения подобных испытаний остаются неясными многие аспекты, такие как механизм формирования зоны индентирования, движение материала подложки, величина упругого прогиба системы металлическое стекло – полимерная подложка и т. д. Из-за малой толщины исследуемого материала подложка неизбежно вносит погрешности в получаемые результаты. Таким образом, существующие методы микроиндентирования тонких лент металлического стекла на полимерной подложке [6–8] не дают полной информации о механизме формирования зоны индентирования, движении материала подложки, величине упругого прогиба системы металлическое стекло – полимерная подложка и т. д. Непосредственное исследование данных явлений затруднено в связи с микроскопическими размерами зоны деформирования и разрушения. В связи с этим исследования, посвященные физико-механическому моделированию процессов деформирования и разрушения композитов тонкое металлическое покрытие – полимерное основание, являются достаточно актуальными [9].

Целью данной работы является исследование методом модельного экспериментирования особенностей локального нагружения композита металлическое покрытие – полимерное основание – металлическая основа, с использованием увеличенной копии пирамидки Виккерса и соответствующего нагружающего устройства.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

С учетом поставленной задачи была разработана экспериментальная установка по осуществлению модельного нагружения. Нагружение осуществляется увеличенной копией пирамиды Виккерса, выполненной из стали. Пирамида закреплена на держателе. Держатель опускается за счет передачи усилия от электродвигателя, через специально разработанную систему приводов. После включения, в течение двух секунд, осуществляется выход установки на рабочий режим. В рабочем режиме пирамида Виккерса опускается с постоянной скоростью 19 мм/с. Максимальное нагружающее усилие равно 719 Н. Регулирование максимального нагружающего усилия осуществляется применением ременного привода, имеющего фиксированное значение коэффициента трения. При превышении максимального усилия, ремень начинает проскальзывать, чем обеспечивается ограничение величины прикладываемого усилия со стороны электродвигателя. Возможно осуществление нагружения согласно двум режимам. В первом режиме нагружение осуществляется пирамидой Виккерса. Во втором режиме нагружение осуществляется пирамидой Виккерса, разрезанной по плоскости симметрии, проходящей через середину ребер в основании и вершину. Плоскость среза плотно прилегала к стеклу (рис. 1). Кинетику нагружения фиксировали на видеокамеру с последующим кадровым анализом на компьютере.

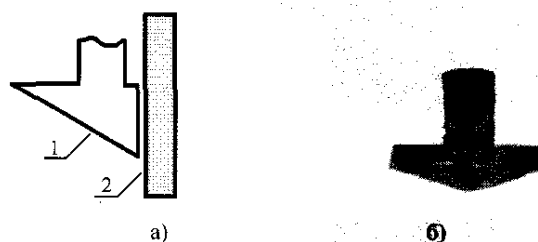


Рис. 1. Схема нагружения пирамидой Виккерса разрезанной по плоскости симметрии (1) вдоль стеклянной пластины (2); б) фотография пирамидки

Сконструированное устройство позволяет визуализировать процесс массопереноса при индентировании системы металлическое покрытие – полимерная подложка.

Для проведения экспериментов использовали композиты полимерное основание – металлическое покрытие. В качестве полимерного основания использовали различные материалы, в т. ч. материалы, реально используемые для изготовления композиционных соединений с металлическим стеклом. Используемые материалы характеризовались различными механическими свойствами: 1) материалы, способные переносить значительные упругие деформации – клси на основе натурального каучука, клей момент; 2) материалы, характеризующиеся хорошими пластичными и плохими упругими свойствами – пластилины; 3) материалы, применяемые при проведении лазерной обработки – высокотемпературные герметики.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первая серия экспериментов посвящена исследованию особенностей деформирования композита на основе полимерного основания и металлического покрытия. В качестве покрытия использовали металлические фольги. Величину деформации изменяли, варьируя усилия. Определяли величины вертикальных и горизонтальных смещений, для чего использовали вертикальные и горизонтальные полосы пластилина. Пластичный материал подложки на основе пластилина обеспечивает хорошее пластическое деформирование при практически полном отсутствии упругой деформации.

На рис. 2 приведены последовательные кадры нагружения композита (с вертикальными и горизонтальными полосами). Фотографии приведены в хронологической последовательности.

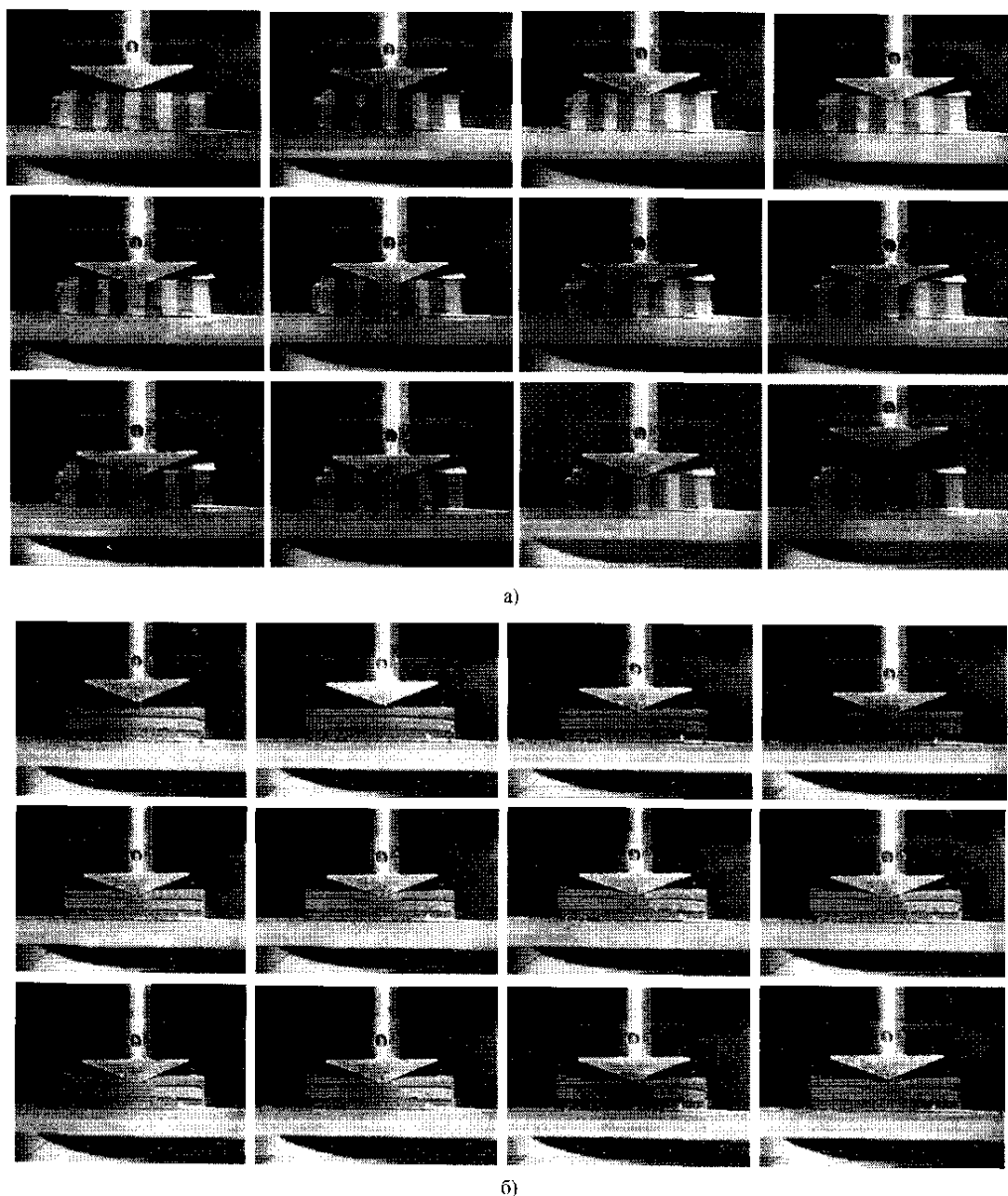


Рис. 2. Пластическое деформирование в горизонтальном и вертикальном направлениях при локальном нагружении неупругого композита

Явления массопереноса в зависимости от прочностных характеристик материала могут протекать двумя способами: 1) однородным массопереносом, когда вертикальные грани остаются параллельными самим себе. Подобный характер массопереноса связан с плохой адгезией полимера к металлическому основанию и металлическому покрытию; 2) массопереносом, связанным с деформированием, в этом случае исходно вертикальные грани могут быть описаны дугой окружности. Указанный характер деформирования характерен для случаев хорошей адгезии полимерного материала к металлическому покрытию и металлическому основанию. Вертикальный массоперенос непосредственно под вершиной индентора имеет свои особенности. Массоперенос активно проходит в верхней и в нижней трети образца, в то время как в центральной части образца он проходит менее интенсивно.

На рис. 3 показана характерная зависимость величины относительного увеличения ширины (смещения материала в горизонтальном направлении) под пирамидой для случая вдавливания пирамиды на величину 75 и 95% от глубины подложки. Отмечается сильное смещение материала под вершиной пирамиды.

Можно выделить две стадии бокового массопереноса. Непосредственно под погруженным индентором – явления деформирования и массопереноса. Вне области погруженного индентора – явления однородного массопереноса.

Значительные смещения материала должны вызывать растягивающие напряжения, что приводит к формированию соответствующих складок и трещин (рис. 4). Механические напряжения, возникающие при этом, могут влиять на экспериментально наблюдаемые особенности деформирования композита металлическое стекло – полимерное основание. В частности, отмечено в [5] разветвление линий деформации при локальном нагружении исходного металлического стекла пирамидкой Виккерса может инициироваться возникновением механических напряжений при формировании складок [5, 10].

В зависимости от типа материала возможно формирование различных микрокартин разрушения: в том числе схожих с наблюдаемыми при индентировании композитов [8]. Модельным экспериментированием установлено, что формирование трещин аналогичных наблюдаемым на рис. 4б связано с растягивающими напряжениями.

На рис. 5 приведены экспериментальные данные по нагружению и разгрузке композита на основе натурального каучука. Экспериментально установлено, что при величинах относительного погружения пирамиды Виккерса не более ¼ от толщины подложки, остаточная величина прогиба не превышает нескольких процентов (восстановление продолжается в течение нескольких часов). В модельных экспериментах величина смещения могла на порядки превосходить размеры макромолекул. В реальных экспериментах микронные смещения могут практически не вызывать остаточного деформирования, что приводит к полному восстановлению поверхности. Реально используемый материал подложек способен к значительным упругим деформациям и практически полному восстановлению.

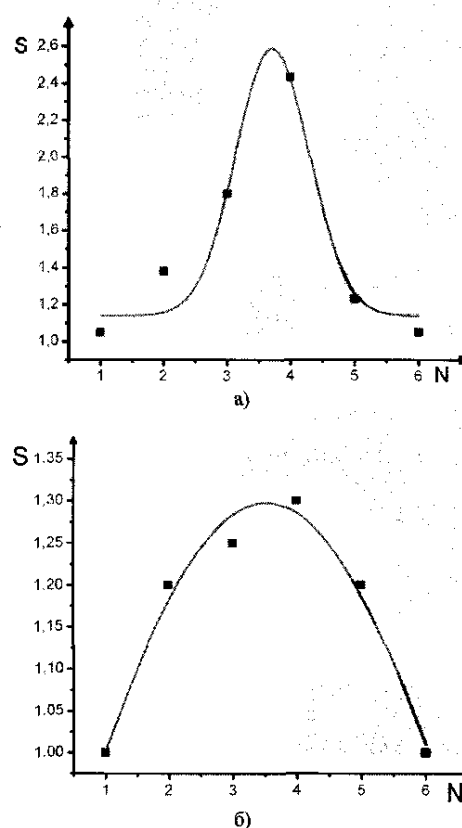


Рис. 3. Зависимость увеличения ширины вертикальных полос. N – номер полосы подложки (индентор находится между четвертой и третьей (а) и над четвертой (б) полосой). S – ширина вертикальной полосы, для случаев вдавливания пирамидки на 75% от глубины подложки (а) и на 95% от глубины подложки (б).

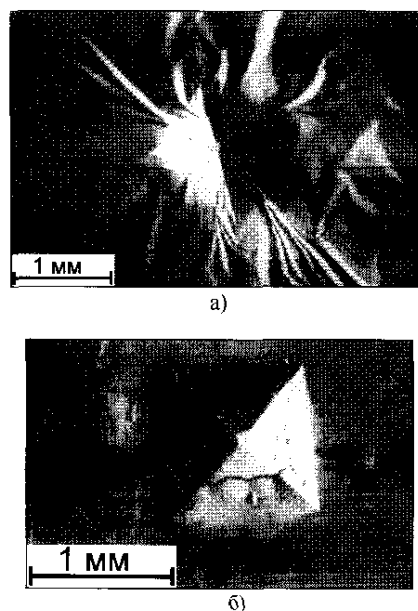


Рис. 4. а) Формирование микрорельефа на поверхности: пластичное полимерное основание – металлическое покрытие. б) Трещины, вызванные растягивающими напряжениями, возникшими при движении материала подложки



Рис. 5. Упругое деформирование при последовательном нагружении и разгрузении композита металлическое основание – клей на основе натурального каучука – металлическое покрытие.

ВЫВОДЫ

1. Модельным экспериментированием установлены качественные характеристики горизонтального смещения материала полимерной пластичной подложки. При соблюдении аналогии между модельными и реальными экспериментами, величины относительного горизонтального увеличения ширины выделенных полос материала под индентором, надежно выявляются при погружении индентора на величину более 0,5 от высоты подложки, а максимальное увеличение ширины полос при приближении индентора к металлическому основанию достигает примерно 250 %.

2. Установлено, что материал подложек на основе термостойкого герметика и натурального каучука способен к значительным упругим деформациям и практически полному восстановлению, в т. ч. в условиях, когда величины смещений многократно превосходят размеры макромолекул материала подложки.

3. На основе модельного экспериментирования получены картины деформации и разрушения, подобные наблюдаемым в реальных экспериментах. Полу-

ченные результаты позволяют предположить, что возникновение подобных картин обусловлено тем, что в модельных и реальных экспериментах возникают схожие поля напряжений, приводящие к деформациям и разрушениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Браун У., Сроули Дж. Испытание высокопрочных материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. М.: Мир, 1972. 246 с.
2. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости материалов. М.: Металлургия, 1975. 456 с.
3. Ресель В.Р., Слущер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
4. Боярская Ю.С., Грабко Л.З., Кац М.С. Физика процессов микроиндентирования. Кишинев: Изд-во «Штиинца», 294 с.
5. Ушаков И.В., Федоров В.А., СудакOVA Л.И. Деформирование и разрушение металлического стекла при индентировании на подложках // Тр. II Междунар. конф. «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений». Вестн. Тамб. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. Тамбов, 2000. Т. 5. Вып. 2-3. С. 384-386.
6. Ушаков И.В. Влияние скорости охлаждения на изменение комплекса свойств аморфного металлического сплава, подвергнутого воздействию лазерного излучения // Тез. докл. XIV Междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности». Вологда, 2005. С. 100.

7. Ушаков И.В., Поликарпов В.М. Особенности деформирования и разрушения аморфных металлических сплавов, подвергнутых локальному нагружению инденторами различной геометрической формы // Тез. докл. XVI Петербургских чтений по проблемам прочности. СПб., 2006. С. 105.
8. Ушаков И.В. Деформирование и разрушение металлического стекла, нанесенного на композиционное основание, в условиях локального нагружения инденторами различной геометрической формы // Вестн. Тамб. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. Тамбов, 2006. Т. 11. Вып. 2. С. 163-167.
9. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника, 1993. 391 с.

10. Ушаков И.В., Поликарпов В.М. Экспериментальное исследование методом локального нагружения аморфных металлических сплавов, подвергнутых лазерному отжигу // Физические свойства металлов и сплавов: тез. докл. 3-й Рос. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2005. С. 172-173.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 05-01-00215.

Поступила в редакцию 20 июля 2006 г.