

УДК 541.64:539.199

НОВЫЙ МЕХАНИЗМ ПОВЕРХНОСТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ПОЛИМЕРАХ С ТОНКИМ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ¹

© 2001 г. С. Л. Баженов*, А. Л. Волынский**, О. В. Лебедева*,
Е. Е. Воронина**, Н. Ф. Бакеев*

*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколова Российской академии наук
117393 Москва, Профсоюзная ул., 70

**Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Химический факультет
119899 Москва, Воробьевы горы

Поступила в редакцию 22.06.2000 г.
Принята в печать 30.10.2000 г.

Исследован механизм образования волнообразного рельефа на поверхности тонкого пластичного металлического покрытия при его сжатии на термопластичной подложке (ПЭТФ и ПВХ) при температуре выше температуры стеклования полимера. Обнаружен ряд принципиальных расхождений между экспериментальными данными и классической теорией потери устойчивости стержня на упругом основании. Сделан вывод о том, что существует не известный ранее механизм поверхностной неустойчивости покрытия при деформировании полимера-подложки. Предложена новая модель, предполагающая, что металлическое покрытие изгибается (теряет устойчивость), если напряжение в нем достигает значения предела текучести. На основании теоретического анализа модели получено соотношение, описывающее длину поверхностной волны в зависимости от механических характеристик покрытия и подложки. Обнаружено удовлетворительное соответствие теории и эксперимента. Сделан вывод, что увеличение модуля упругости подложки приводит к изменению механизма неустойчивости покрытия. При низком модуле упругости подложки волна образуется вследствие классической неустойчивости стержня на упругом основании. При повышении жесткости подложки в некий момент механизм потери устойчивости изменяется, и волна образуется вследствие пластического течения покрытия.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы начато интенсивное исследование нового класса полимерных композиционных материалов, построенных по принципу твердое покрытие–податливая подложка. Растворение таких композитов сопровождается по крайней мере двумя общими явлениями [1–4]. Впервые эти явления были продемонстрированы при растворении каучука, покрытого тонкой пленкой платины толщиной ~10 нм [1]. При растворении такой системы на изначально ровной поверхности платины возникает регулярный волнообразный микрорельеф [1, 2]. Гребни волн и ложбины такого рельефа ориентированы строго параллельно направле-

нию удлинения. Кроме того, в результате деформирования такого рода систем наблюдается сравнительно регулярное растрескивание покрытия на полосы определенной ширины [3, 4]. Эти трещины ориентированы перпендикулярно направлению вытяжки и соответственно направлению гребней волн.

Установлено, что оба указанных явления (явление волны и множественное растрескивание покрытия) носят общий характер для двуслойных композитов, которые были названы твердое покрытие на податливом основании [5]. Такое структурно-механическое поведение наблюдали при использовании в качестве подложки НК, ПЭТФ, ПВХ, ПЭ, ПС, ПП и т.д. Покрытием служили различные металлы (золото, платина, алюминий, свинец, сталь), а также кварц и углерод.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 00-03-33151 и 00-03-81201 Бел 2000-а).

E-mail: volynskii@mail.ru (Волынский Александр Львович).

Отметим, что эти явления наблюдали при выполнении некоторых условий. Во-первых, необходимым условием является значительная разница в модулях упругости материалов подложки и покрытия, причем модуль упругости подложки должен быть существенно ниже. Во-вторых, толщина покрытия должна быть несоизмеримо (на несколько десятичных порядков) меньше толщины подложки. И, в-третьих, между покрытием и подложкой должна существовать оптимальная адгезия. Указанные явления (появление микроволны и растрескивание покрытия) наблюдаются как при одноосном растяжении, так и при сжатии полимерных пленок, имеющих жесткое покрытие [6].

Появление волнообразного рельефа объясняется механической потерей устойчивости покрытия в результате его сжатия на податливом основании [1, 2]. Особенность явления состоит в том, что покрытие оказывается сжатым даже при одноосном растяжении образца. Причина сжатия покрытия при растяжении образца состоит в сокращении поперечного сечения (ширины) подложки и различия в коэффициентах Пуассона материалов покрытия и подложки. Вследствие этих условий при одноосном растяжении покрытие оказывается в одном направлении растянутым, а в другом (перпендикулярном) – сжатым.

В работах [1, 2, 6] исследовано влияние механических характеристик подложки на период микроволны. Анализ проводили по классической схеме, введенной Эйлером для анализа устойчивости упругого стержня под действием сжимающей силы. Если стержень лежит на упругом основании, то при потере устойчивости он принимает форму волны. Это обусловлено тем, что существует некоторая оптимальная длина волны, при которой минимальна полная упругая энергия, расходуемая на совместное деформирование стержня и подложки после изгиба стержня. Именно такой подход использован ранее для анализа складкообразования осадочных слоев в толщинах горных пород [7, 8].

Период микрорельефа (длина волны) λ связан со свойствами покрытия и подложки соотношением [2]

$$\lambda = 4.15 h_3 \sqrt{\frac{E_1}{E}}, \quad (1)$$

где h – толщина покрытия, E_1 и E – модули упругости покрытия и подложки соответственно. Уравнение (1) прошло экспериментальную проверку для композита, состоящего из каучуковой подложки и покрытия из платины. Было обнаружено удовлетворительное соответствие теории и

эксперимента (расхождение между предсказанием уравнения (1) и экспериментальными данными не превышало 10%) [2].

Механическая потеря устойчивости стержня на упругом основании является принципиально критическим явлением. Согласно теории [9], при напряжениях ниже критического покрытие должно оставаться плоским, а при достижении критического напряжения должно терять устойчивость одновременно по всей своей поверхности. В системах на основе каучука наблюдали именно такое образование волны [1, 2]. Однако недавно было обнаружено, что в системе ПЭТФ–платиновое покрытие появление поверхностной волны происходит принципиально иначе, не одновременно по всей поверхности покрытия, а имеет стадию зародышеобразования и развития [10, 11]. Формирование регулярной волны происходит постепенно в достаточно широком диапазоне деформаций. Начинается оно при деформации 2–5%, а завершенным его можно считать лишь при деформации 50–100%. В отличие от сшитого каучука, ПЭТФ является термопластичным полимером и, возможно, этим обусловлено обнаруженное в работах [10, 11] различие в поведении композитов на их основе.

Цель настоящей работы – исследование и анализ структурно-механического поведения систем платиновое покрытие на податливом основании с использованием термопластичных подложек, таких как ПЭТФ и ПВХ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали промышленные пленки аморфного неориентированного ПЭТФ толщиной 100 мкм ($T_c = 75^\circ\text{C}$), а также промышленные пленки ПВХ толщиной 80 мкм, содержащего 10% пластификатора диоктилфталата (ДОФ) ($T_c = 53^\circ\text{C}$), и пленки ПВХ, содержащего 15% каучукового модификатора (тройной сополимер метилметакрилата, бутадиена и стирола – МБС) ($T_c = 65^\circ\text{C}$). Из указанных пленок вырубали образцы в виде двусторонних лопаток с размерами рабочей части 6 × 22 мм. На поверхность образцов наносили тонкие слои платины различной толщины методом ионно-плазменного напыления. Полученные образцы растягивали до необходимой степени удлинения с помощью динамометра “Instron-1122” в интервале 90–100°C при скоростях растяжения от 1 до 10 мм/мин. Электронно-микроскопические исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе “Hitachi S-520”. Температурную зависимость динамического модуля определяли на реовибромет-

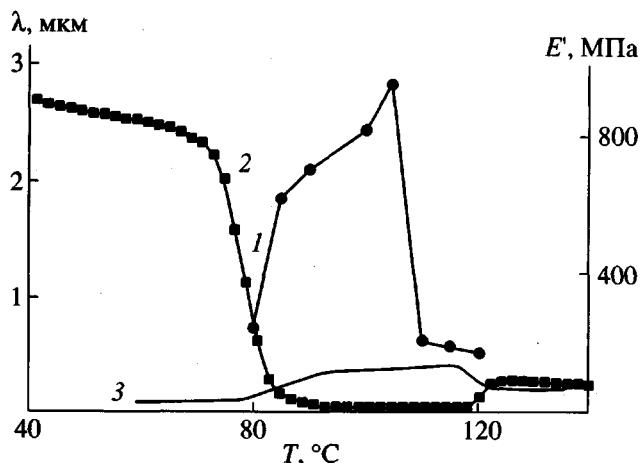


Рис. 1. Зависимости периода λ (1) и динамического модуля упругости E' ПЭТФ (2) от температуры в системе ПЭТФ–платиновое покрытие, а также теоретический расчет λ по формуле (1) (3). Толщина покрытия 3.8 нм.

ре “Rheometrics” при частоте нагружения 31 Гц и скорости нагревания 2 град/мин. Толщину нанесенного металлического покрытия определяли с помощью атомно-силового микроскопа “Nanoscope-2” (“Digital Instruments”, Санта-Барбара, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим основные экспериментальные данные, демонстрирующие принципиальные отличия потери устойчивости твердого покрытия в системе ПЭТФ–платиновое покрытие от классических представлений.

На рис. 1 (кривая 1) представлена температурная зависимость периода микрорельефа λ , возникающего в системе ПЭТФ–платиновое покрытие. Хорошо видно, что зависимость имеет сложный характер. Отметим, что в диапазоне температур от комнатной до 80°C рельеф не образуется, и поверхность покрытия остается плоской. В температурном диапазоне 80–100°C период волны возрастает. Выше температуры 100°C (температура начала кристаллизации ПЭТФ) период рельефа резко понижается, так что на кривой наблюдается максимум при 100°C. Поскольку в данном диапазоне температур свойства металлического покрытия практически не меняются, это означает, что длина волны в системе ПЭТФ–платиновое покрытие решающим образом зависит от свойств подложки. Согласно уравнению (1), длина волны зависит от модуля упругости подложки. На рис. 1 (кривая 2) представлена температурная зависимость динамического модуля ПЭТФ. Хорошо видно, что обе

зависимости коррелируют друг с другом, что более подробно было обсуждено в работе [5].

На этом же рисунке представлена теоретическая зависимость периода волны (кривая 3), вычисленная при помощи формулы (1). Качественно кривые 2 и 3 похожи, однако кривая 3 сдвинута по температурной шкале на $\sim 10^{\circ}\text{C}$ в область более высоких температур. Этот сдвиг обусловлен тем, что модуль упругости полимера определяли динамическим методом, в то время как период волны измеряли в образцах, полученных в режиме постоянной (и сравнительно малой) скорости растяжения. По этой причине кривые 2 и 3 соответствуют скоростям испытания, различающимся на 3–4 десятичных порядка. В соответствии с принципом температурно-временной суперпозиции это должно приводить к сдвигу кривой 3 в высокотемпературную область, что и наблюдается экспериментально.

Более важным представляется тот факт, что теоретические значения λ (кривая 3) в 5–7 раз ниже экспериментально наблюдаемых значений (кривая 1). Столь сильное расхождение теории и эксперимента указывает на то, что уравнение (1) неверно описывает поведение рассматриваемого композита. Заметим, что такое расхождение теории и эксперимента для системы ПЭТФ–платиновое покрытие резко контрастирует с поведением композита на основе каучука, где их согласие было более чем удовлетворительным (расхождение теории и эксперимента не превышало 10% [2, 6]).

Следует обратить внимание еще на следующее обстоятельство. Кристаллизация ПЭТФ при увеличении температуры от 100 до 115°C приводит к четырех–пятикратному снижению длины волны, в то время как формула (1) предсказывает лишь уменьшение в ~ 2 раза. Примерно такое же несогласие наблюдается и при повышении температуры в области температуры стеклования матрицы. Это означает, что формула (1) функционально неверно описывает зависимость длины волны рельефа от модуля упругости подложки.

Еще одно принципиальное противоречие между поведением системы ПЭТФ–платиновое покрытие и теорией выявляется при прямом микроскопическом исследовании [11, 12]. В этих работах был обнаружен ряд неизвестных ранее особенностей процесса возникновения и развития регулярного микрорельефа при деформировании термопластичного полимера–подложки. Было показано, что на начальных этапах растяжения волна появляется не по всей площади покрытия, как это предсказывает теория, а в отдельных местах вблизи зародившихся трещин. На этой стадии растяжения большая часть покрытия сохраняет свой гладкий пер-

воначальный вид и волна отсутствует. По мере развития деформации волна распространяется на все большую площадь покрытия. На этой стадии процесса микрорельеф еще нерегулярен. И только при дальнейшем деформировании (на ~100%) возникшая волна совершенствуется и занимает всю площадь покрытия.

Таким образом, в работах [11, 12] был установлен принципиальный факт, что волна появляется не одновременно по всей поверхности покрытия, а инициируется преимущественно вблизи трещин. И только при увеличении степени деформации волна распространяется на всю поверхность образца. Таким образом, в отличие от каучука, при использовании в качестве подложки ПЭТФ появление волны не является критическим явлением. Волна инициируется локально у дефектов, после чего постепенно распространяется на всю поверхность образца [10, 11]. Этот факт указывает на то, что потеря устойчивости покрытия на подложке ПЭТФ происходит принципиально иначе, чем на каучуковой подложке.

На рис. 2 показана зависимость периода возникающего микрорельефа, приведенного к толщине нанесенного покрытия, от величины приложенного напряжения для ряда полимерных подложек, растягиваемых выше температуры стеклования. Отметим, что при этих температурах все использованные подложки деформируются пластично (необратимо). Данные рис. 2 приведены при одной степени сжатия подложки, поскольку от нее зависит длина волны микрорельефа. Отметим, что экспериментальные результаты для целого ряда полимеров, разных скоростей и температур растяжения, а также различной толщины покрытий хорошо укладываются на единую кривую. Это свидетельствует о том, что длина волны определяется не столько жесткостью подложки, как предсказывается формулой (1), сколько напряжением в подложке. Приведенная на рис. 2 экспериментальная зависимость длины волны микрорельефа от напряжения в полимере-подложке не соответствует зависимости, следующей из формулы (1).

Отмеченное выше свидетельствует о том, что, несмотря на внешнее сходство поверхностного рельефа в композитах каучук-платиновое покрытие, с одной стороны, и в аналогичных системах на основе ПЭТФ и ПВХ – с другой, при деформациях 20% и более, механизмы образования волн в этих системах различаются. Это позволяет сделать основной вывод настоящей работы: в композитах на основе подложек ПЭТФ и ПВХ механизм образования волн принципиально отлича-

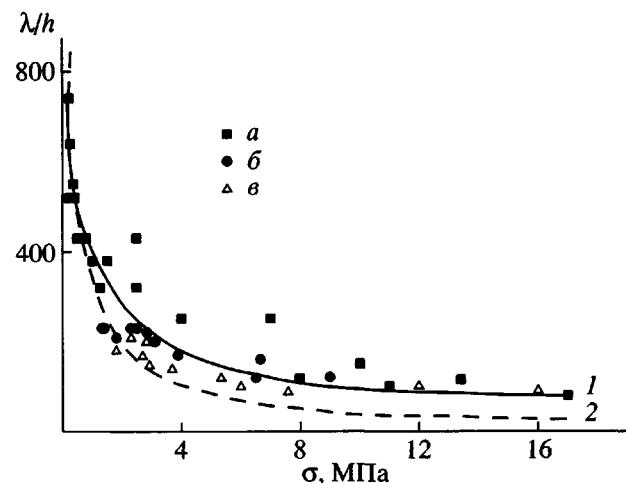


Рис. 2. Зависимость периода возникающего микрорельефа, приведенного к толщине платинового покрытия λ/h , от величины приложенного напряжения σ для систем на основе ПЭТФ (a), ПВХ(ДОФ) (b) и ПВХ(МБС) (c), деформированных выше температуры стеклования (1), и теоретическая кривая, рассчитанная по уравнению (6) (2).

ется от классической механической потери устойчивости стержня на упругом основании [1, 2].

Теперь перейдем к выяснению механизма рельефообразования. Ключевым для понимания механизма образования волн в системах ПЭТФ–платиновое покрытие и ПВХ–платиновое покрытие нам представляется следующий момент. В работе [12] было получено выражение для критического напряжения в покрытии, при котором происходит потеря его устойчивости:

$$\sigma = \sqrt[3]{\frac{9E_1E^2}{64(1-v_1^2)(1-v^2)}}, \quad (2)$$

где v_1 и v – коэффициенты Пуассона покрытия и подложки, E_1 и E – модули упругости покрытия и подложки.

Критическое напряжение не зависит от толщины покрытия, а определяется лишь упругими характеристиками покрытия и подложки. На рис. 3 (кривая 1) приведена зависимость критического напряжения потери устойчивости, вычисленная по формуле (2), от температуры. При расчетах использованы данные рис. 1, коэффициент Пуассона платины $v_1 = 0.36$, $v = 0.5$ для подложки и $E_1 = 160$ ГПа [13]. Прямая 2 на рис. 3 соответствует пределу текучести платины. Отметим то обстоятельство, что критическое напряжение потери устойчивости покрытия существенно превышает предел его текучести. Данные рис. 3 свидетельст-

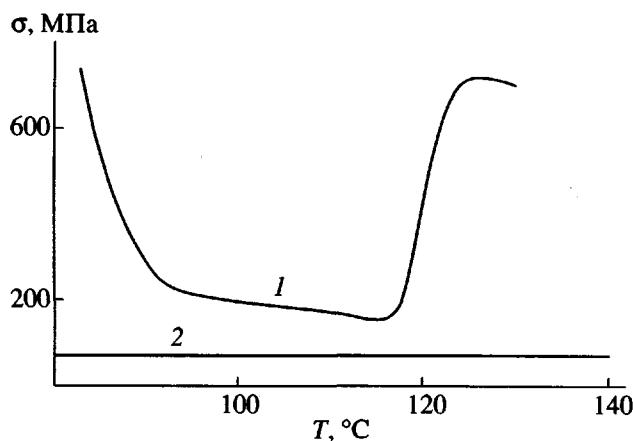


Рис. 3. Расчет критического напряжения потери устойчивости покрытия (1) и предела текучести платины при растяжении (2) в зависимости от температуры.

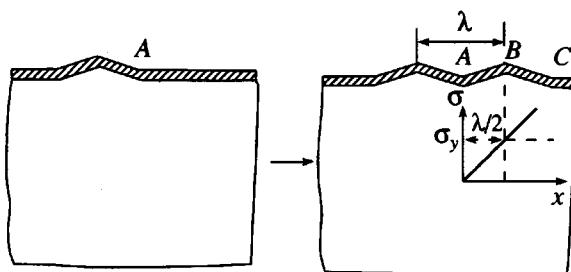


Рис. 4. Схема, иллюстрирующая механизм потери устойчивости покрытия.

вуют о том, что покрытие начинает течь до достижения критического напряжения потери устойчивости. Влияние пластичности на потерю устойчивости одиночных металлических стержней исследовано весьма подробно [14]. Показано, что неупругое поведение металла приводит к существенному понижению напряжения потери устойчивости. Очевидно, что и при наличии подложки течение металла должно уменьшать критическое напряжение потери устойчивости.

Рассмотрим тонкое покрытие под действием сжимающей нагрузки (рис. 4). Исследование формы покрытия при помощи атомно-силового микроскопа показало, что в композитах на основе пластичного ПЭТФ волна имеет гармоническую (синусоидальную) форму лишь при малых деформациях сжатия. С ростом деформации форма покрытия становится похожей на ломаную линию, как показано на рис. 4. Изменение деформации подложки приводит к изменению углов этой ломаной линии. Очевидно, что в углах ломаной линии локализуется пластическая деформация покрытия. В механике балка из пластичного метал-

ла, деформация которой при изгибе сводится к пластическому течению в одной точке, именуется пластическим шарниром. Для простоты вычислений покрытие будем моделировать регулярным набором пластических шарниров. Предположим, что потеря устойчивости покрытия начинается в некоторой точке, когда сжимающее напряжение достигает величины предела текучести покрытия. Из теории упругости известно, что при небольшой амплитуде возмущения форма покрытия является гармонической, и изгиб покрытия не приводит к понижению напряжения. При увеличении амплитуды гармоническая форма постепенно превращается в ломаную линию и одновременно уменьшается напряжение. Предположим, что амплитуда велика и в результате изгиба покрытия в точке A на рис. 4 сжимающее напряжение в этой точке падает до нуля. Тем не менее, напряжение в покрытии должно возрастать по мере удаления от точки A, поскольку оно прочно связано с деформируемой полимерной подложкой.

Далее нужно решать задачу о распределении сжимающих напряжений в покрытии вблизи точки A. Очевидно, что в процессе деформирования на некотором расстоянии от точки A в точке B сжимающее напряжение вновь достигнет величины предела текучести материала покрытия. Как следствие, вновь может произойти изгиб (излом) покрытия, как схематически показано на рис. 4. Задача будет решаться аналогично задаче о растягивающем напряжении вблизи кончика волокна, внедренного в полимерную матрицу [15]. Вблизи места изгиба покрытия на границе полимер-покрытие вновь возникает сдвиговое напряжение. Поскольку подложка ведет себя как жестко-пластическое тело, величина сдвигового напряжения в нем не может превысить предел текучести материала подложки. Поскольку сумма приложенных к покрытию сил равна нулю, для сжимающего напряжения на расстоянии x от точки A имеем

$$F = \tau x, \quad (3)$$

где F – сжимающая сила в покрытии, τ – предел текучести подложки при сдвиге.

Сжимающее напряжение σ получаем делением силы на поперечное сечение покрытия

$$\sigma = \frac{\tau x}{h} \quad (4)$$

(h – толщина покрытия).

Сжимающее напряжение при удалении от точки A возрастает пропорционально расстоянию до

этой точки, как схематически показано на рис. 4. На некотором расстоянии $\lambda/2$ от точки A напряжение в покрытии достигает предела текучести (рис. 4)

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{\sigma_y h}{\tau} \quad (5)$$

Здесь σ_y – предел текучести покрытия. Очевидно, что в точке B на расстоянии $\lambda/2$ от точки A вновь может произойти изгиб покрытия. Таким образом, уравнение (5) дает оценку длины волны потери устойчивости (периода волны). Поскольку предел текучести подложки при сдвиге τ равен половине предела текучести при растяжении [16], длина волны потери устойчивости для жестко-пластичной подложки описывается формулой

$$\lambda \approx \frac{4\sigma_y h}{\sigma}, \quad (6)$$

где σ – предел текучести подложки при сжатии.

Представленные на рис. 2 данные позволяют произвести проверку уравнения (6). Сплошная линия на рис. 2 проведена по экспериментальным точкам, а штриховая рассчитана по уравнению (6) при $\sigma_y = 110$ МПа. Теоретическая кривая проходит несколько ниже экспериментальной, но все же согласие эксперимента и теории можно считать вполне удовлетворительным.

Отметим, что выражение (6) по структуре аналогично полученному ранее уравнению, описывающему растрескивание покрытия на полосы при растяжении полимера-подложки [3]. Это неудивительно, поскольку при его выводе были сделаны качественно похожие предположения: напряжение в покрытии растет по мере удаления от зародышевой трещины, до тех пор, пока не будет достигнут предел его прочности. В точке достижения предела прочности происходит разрушение покрытия, и процесс дробления возобновляется [3, 4]

$$L = \frac{3\sigma^* h}{\sigma} \quad (7)$$

Здесь L – длина фрагмента разрушения покрытия в направлении действующей растягивающей нагрузки, σ – напряжение в подложке, σ^* – прочность покрытия при растяжении. Разделив уравнение (6) на (7), получим

$$\frac{\lambda}{L} = \frac{4\sigma_y}{3\sigma^*} \quad (8)$$

Уравнение (8) предсказывает, что отношение периода волны к длине фрагментов разрушения вообще не зависит от механических свойств плас-

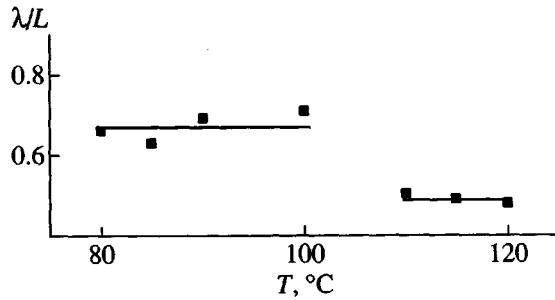


Рис. 5. Зависимость отношения λ/L от температуры растяжения для системы ПЭТФ-платиновое покрытие, деформированной со скоростью 0.1 мм/мин на 100%. Толщина покрытия 3.8 нм.

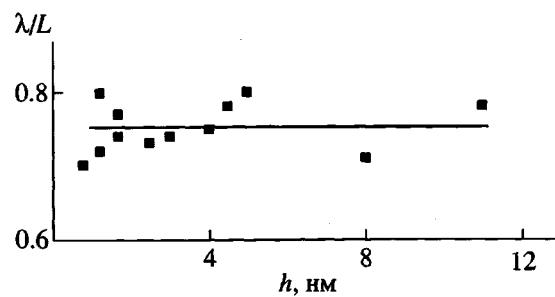


Рис. 6. Зависимость отношения λ/L от толщины покрытия h для системы ПЭТФ-платиновое покрытие, деформированной на 100% при 90°C со скоростью 10 мм/мин.

тичной подложки, а определяется отношением предела текучести покрытия к его прочности. Это обстоятельство позволяет провести еще одну независимую экспериментальную проверку уравнения (6). Действительно, при микроскопических исследованиях можно одновременно измерить период λ и средний размер фрагментов разрушения покрытия L .

На рис. 5 представлена зависимость отношения λ/L от температуры. Это отношение равно ~ 0.7 в диапазоне 80–100°C и ~ 0.5 при температурах выше 110°C. Причины понижения этого отношения неясны. Однако заметим, что в указанном диапазоне температур и длина волны λ , и размер фрагментов разрушения L изменяются в 5–6 раз. Поэтому уменьшение их отношения с 0.7 до 0.5 можно считать не слишком значительным.

На рис. 6 приведено отношение λ/L в зависимости от толщины покрытия. Отношение λ/L в этом случае равно ~ 0.75 . Как следует из рис. 5 и 6, величина λ/L слабо зависит от толщины покрытия и температуры испытаний. Теоретическое значение отношения λ/L , определенное по формуле (8), равно 0.9 на основании значений предела теку-

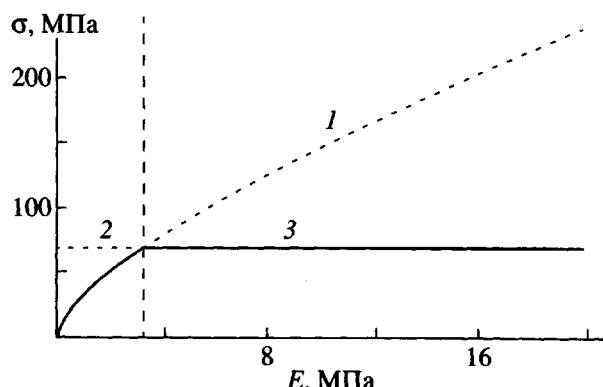


Рис. 7. Зависимость напряжения потери устойчивости металлического покрытия от модуля упругости подложки E : 1 – случай классической потери устойчивости – формула (1), 2 – случай неупругой потери устойчивости – формула (6).

чести и прочности платины $\sigma_y = 110$ МПа и $\sigma^* = 160$ МПа. Этот результат свидетельствует о том, что предположения о механизме потери устойчивости металлического покрытия, видимо, соответствуют реальному механизму наблюдаемых явлений.

Влияние жесткости матрицы на механизм рельефообразования схематически показано на рис. 7, где напряжение потери устойчивости покрытия представлено в зависимости от модуля упругости подложки E . Кривая 1 показывает зависимость критического напряжения потери устойчивости балки на упругом основании, рассчитанную по формуле (2). Расчеты проводили для платинового покрытия. Прямая 2 показывает критическое напряжение рельефообразования вследствие пластического течения покрытия. В этом случае критическое напряжение равно пределу текучести платины, который в рассматриваемом интервале температур является практически константой.

Таким образом, имеется два конкурирующих механизма рельефообразования, каждое из которых характеризуется критическим значением. При нагружении образца рельеф появляется при напряжении, равном минимуму из этих двух значений (сплошная кривая 3 на рис. 7). При модуле упругости подложки ниже 3.3 МПа минимум равен критическому напряжению упругой неустойчивости покрытия на упругом основании, и волна образуется по классическому механизму. Поскольку модуль упругости каучуковой подложки в работе [12] был равен лишь 1 МПа, именно по этому механизму происходило появление волны. С ростом модуля упругости подложки (при $E = 3.3$ МПа) соотношение между критическими напряжениями изменяется и соответственно меняется

механизм рельефообразования. В этом случае волна образуется вследствие пластического течения покрытия. Поскольку жесткость ПЭТФ и ПВХ во всем исследованном интервале температур была выше 9 МПа, этим и обусловлен иной механизм рельефообразования в указанных композитах.

Таким образом, обнаружен новый механизм потери устойчивости покрытия. Если в случае каучуковой подложки потеря устойчивости является примером классической неупругой неустойчивости, то в случае подложек ПЭТФ и ПВХ механизм потери устойчивости иной. Критическое напряжение потери устойчивости превышает предел текучести металла, и картина явления принципиально изменяется. Потеря устойчивости пластичного покрытия обусловлена его течением.

Проведена теоретическая оценка длины волны микрорельефа для системы пластичное покрытие на пластичной подложке. В этом случае аналитическое выражение для длины волны (уравнение (6)), существенно отличается от аналогичного выражения для упругой неустойчивости (уравнение (1)). Получено удовлетворительное соответствие теории и эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волынский А.Л., Чернов И.В., Бакеев Н.Ф. // Докл. РАН. 1997. Т. 335. № 4. С. 491.
2. Баженов С.Л., Чернов И.В., Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф. // Докл. РАН. 1997. Т. 356. № 1. С. 54.
3. Волынский А.Л., Баженов С.Л., Лебедева О.В., Озерин А.Н., Бакеев Н.Ф. // Высокомолек. соед. А. 1997. Т. 39. № 11. С. 1827.
4. Баженов С.Л., Чернов И.В., Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф. // Докл. РАН. 1997. Т. 356. № 2. С. 199.
5. Волынский А.Л., Баженов С.Л., Бакеев Н.Ф. // Рос. хим. журн. (ЖВХО им. Д.И. Менделеева). 1998. Т. 42. С. 57.
6. Волынский А.Л., Баженов С.Л., Лебедева О.В., Яминский И.В., Озерин А.Н., Бакеев Н.Ф. // Высокомолек. соед. А. 1997. Т. 39. № 11. С. 1805.
7. Ramberg H. // Tectonophysics. 1964. V. 9. P. 307.
8. Ramberg H., Stephansson O. // Tectonophysics. 1965. V. 2. P. 281.
9. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1966. Т. 2. С. 289.

10. Волынский А.Л., Воронина Е.Е., Лебедева О.В., Баженов С.Л., Озерин А.Н., Бакеев Н.Ф. // Докл. РАН. 1998. Т. 360. № 3. С. 349.
11. Волынский А.Л., Воронина Е.Е., Лебедева О.В., Баженов С.Л., Яминский И.В., Бакеев Н.Ф. // Высокомолек. соед. А. 1999. Т. 41. № 10. С. 1627.
12. Volynskii A.L., Bazhenov S.L., Lebedeva O.V., Bakkev N.F. // J. Mater. Sci. 2000. V. 35. P. 547.
13. Егоров А.М. // Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1965. Т. 4. С. 42.
14. Hoff N.J. // J. Appl. Mechanics. 1951. V. 18. P. 68.
15. Kelly A., Tyson W.R. // Fiber-strengthened Materials / Ed. by Zackay V.F. New York: Wiley, 1965.
16. Качанов Л.М. // Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969.

A New Mechanism of Surface Instability in Polymers with a Thin Metallic Coating

S. L. Bazhenov*, A. L. Volysnkii, O. V. Lebedeva*,
E. E. Voronina**, and N. F. Bakeev***

**Institute of Synthetic Polymeric Materials, Russian Academy of Sciences,
ul. Profsoyuznaya 70, Moscow, 117393 Russia*

***Department of Chemistry, Moscow State University,
Vorob'evy gory, Moscow, 119899 Russia*

Abstract—For a thin plastic metallic coating on a thermoplastic support (PET or PVC) at temperatures above the glass transition temperature of a polymer, the mechanism of the compression-induced development of a wavy surface relief was studied. Several contradictions between the experimental data and the classical theory of stability loss developed for a rod on an elastic coating were found. It was concluded that an unknown mechanism of surface instability in the coating upon the deformation of polymer support exists. A new model was advanced and, according to this model, a metallic coating is buckled (or loses its stability) when stress attains yield point. Theoretical analysis of the model allows one to derive the relationship relating the surface wavelength and the mechanical characteristics of coating and support. A fair agreement between theory and experiment was obtained. It was also concluded that, with increasing the elastic modulus of the support, the mechanism of stability loss in the coating is changed. At a low elastic modulus of the support, the wave is developed due to a classical instability of a rod on an elastic basement. As the rigidity of the support is increased, the mechanism of stability loss is changed at a certain moment and the wave is developed due to the plastic flow of the coating.