

УДК 539.3

О КОНФИГУРАЦИИ ЗОН ЛОКАЛИЗОВАННОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЯМИ

Деревягина Л. С., Стрелкова И. Л., Дураков В. Г., Донская Т. А.

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия,
strela@ispms.tsc.ru*

АННОТАЦИЯ

Исследованы механические свойства и влияние профиля границы раздела «покрытие-подложка» на развитие деформации и разрушения композиции «Ст3 – упрочняющее покрытие ПГ-10Н-01» при растяжении. Количественная аттестация напряженно-деформированного состояния в зоне трещины проводится с помощью оптико-телевизионного измерительного комплекса TOMSC. В исследуемой композиции выявлена природа концентраторов напряжений, инициирующих локализованный характер ее пластического течения.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы проведены обширные экспериментальные [1-12] и теоретические [13-17] исследования процессов пластической деформации и разрушения материалов с покрытиями. Используемые технологические способы обработки поверхности разнообразны: азотирование, борирование, электронно-лучевая наплавка, ультразвуковая обработка и др. Проанализировано влияние геометрических, микроструктурных, фазовых, морфологических, технологических факторов на характер развития пластического течения и разрушения. Основной фактор, влияющий на развитие неоднородной пластической деформации: зарождение трещин в покрытии. Вызванное этим усложнение напряженного состояния, инициирует в окрестности одной из трещин формирование шейки и разрушение композиции. Однако, прогнозировать деформационное поведение новой композиции не удастся, т.к. на процесс пластического течения влияет много факторов.

В работе [2] исследовали особенности характера пластической деформации композиции «Ст3 – покрытие ПГ-10Н-01» с плоской внутренней границей раздела. Показано, что за счет несовместности деформаций материалов основы и покрытия на внутренней границе раздела композиции возникают мезоконцентраторы напряжений, которые генерируют трещины в покрытии и мезополосы в подложке по сопряженным направлениям τ_{\max} . Была выявлена особая роль фронта Людерса, заключающаяся в том, что при его прохождении накапливается изгибающий момент, предопределяющий место возникновения каждой новой трещины.

Цель настоящей работы – всесторонне исследовать механические свойства и развитие локализованного пластического течения при активном одноосном растяжении композиции «Ст3-покрытие ПГ-10Н-01», в которой внутренняя граница не плоская. В ходе исследования необходимо было решить следующие задачи:

- исследовать закономерности развития зон повышенной пластичности при растяжении материала с покрытием и не плоской границей раздела;

- с помощью оптико-телевизионного измерительного комплекса TOMSC в пластической области деформаций аттестовать локальное напряженно-деформированное состояние образца в зонах повышенной пластичности;
- сопоставить количественно аттестованное напряженно - деформированное состояние с конфигурацией зон локализованной пластической деформации;
- рассчитать картину распределения сдвигов в окрестности трещины, используя измеренные локальные деформации, и сравнить ее с построенной по результатам численного моделирования;
- рассмотреть взаимосвязь конфигурации зон локализованного пластического течения с природой концентраторов напряжений на границе раздела «покрытие – подложка».

1. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования использованы образцы из стали марки Ст3 с покрытием ПГ-10Н-01, нанесенным методом электронно-лучевой порошковой наплавки [18]. В покрытии выявляются частицы двух видов: темные, неправильной формы, и более светлые, часто имеющие гранные формы роста - полые шестигранники. Объемная доля всех частиц, измеренная методом точек, составляет ~ 22%. Размер частиц по высоте наплавки неоднородный. Вблизи границы раздела основы и покрытия наблюдаются мелкие частицы (~10мкм). По мере удаления от границы размер частиц увеличивается (~25мкм). Размер зерен основы d равен ~ 10 мкм.

В работе [19] рентгеновским методом показано, что типичная микроструктура самодиффундирующихся сплавов на никелевой основе ПГ-10Н-01 состоит из дендритов γ - твердого раствора на основе никеля, эвтектики из боридов никеля и того же твердого раствора, сложной эвтектики на основе тугоплавких боридов и карбидов хрома. Последние имеют форму отдельных или сросшихся попарно продолговатых гексагонов, иногда с внутренней полостью.

В таблице представлены результаты измерений микротвердости исходной структуры исследуемой композиции.

Таблица. Микротвердость композиции «Ст3-покрытие ПГ-10Н-01»

м и к р о т в ё р д о с т ь Н, кг/мм ²			
основа	покрытие вблизи границы	покрытие вдали от границы	частицы покрытия
212 ± 2	774 ± 21	833 ± 24	1585 ± 51

Деформационное поведение композиции наблюдали на образцах в форме двойной лопатки при растяжении на установке ИМАШ-2078 со скоростью перемещения захватов 9,6 мм/час. Размер образцов 15×3×0,9.

Схема исследуемых образцов приведена на рис. 1. Исследовали образцы двух типов: тип I с наплавленным на широкой лицевой грани образца слоем ($h \sim 0,15$ мм) и тип II с наплавленным на боковой грани слоем ($h \sim 1,5$ мм).

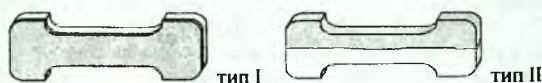


Рис.1. Схемы образцов

Развитие процессов макропластического течения наблюдали с помощью оптико-телевизионного измерительного комплекса TOMSC. Схема и принцип действия комплекса опубликованы в [20, 21]. На образцах типа I наблюдения вели со стороны узкой боковой, а на образцах типа II – со стороны широкой лицевой грани. Размер исследуемого поля зрения составил (0,8×0,6)мм и (4,9×3,6)мм для образцов типа I и II соответственно. С помощью измерительного комплекса TOMSC получали распределения продольных U_x и поперечных U_y компонент векторов смещения относительно оси растяжения. Затем выявляли изотеты – линии равных смещений U_x , U_y и рассчитывали компоненты деформаций вдоль декартовых осей:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U_x}{\partial x} \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial U_y}{\partial y} \quad \tau_{xy} = \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x}. \quad (1.1)$$

По формуле:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \tau_{xy}^2} \quad (1.2)$$

рассчитывали главные компоненты деформации ε_1 и ε_2 . Третью компоненту ε_3 находили из условия несжимаемости объема твердого тела при пластической деформации: $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$. Компоненты скорости главных деформаций $\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \dot{\varepsilon}_3$ находили путем деления соответствующих компонент деформации на время, равное интервалу между сравниваемыми металлографическими картинками. Далее вычисляли величину интенсивности скорости деформации по формуле:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2)^2 + (\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_3)^2 + (\dot{\varepsilon}_3 - \dot{\varepsilon}_1)^2} \quad (1.3)$$

строили картину ее распределения в пространстве и проводили анализ напряженно-деформированного состояния образцов. Подробно описание методики расчета изложено в работе [22].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Механические свойства композиций

На рис.2. представлены типичные диаграммы растяжения основы (кривая 1), композиции «основа (Ст3) – покрытие ПГ-10Н-01»: образцы типа I (кривая 2) и типа II (кривая 3), рассчитанные в приближении гомогенной однородности образца. Диаграмма растяжения основы с площадкой текучести, обусловленной неоднородным развитием пластической деформации в образце в виде фронта Людерса (кривая 1), типична для Ст3. Предел текучести, предел прочности, и величина пластичности до момента формирования шейки равны: ~300 МПа, ~550 МПа и ~28% соответственно, что совпадает с соответствующими параметрами для этой стали, имеющимися в литературе.

Качественные и количественные характеристики кривых σ - ε у образцов типа I существенно отличаются от таковых для стали Ст.3 (кривая 2). Площадка текучести отсутствует, диаграмма имеет вид параболы с тремя зубцами, появление которых связано с растрескиванием тонкого покрытия. Предел текучести ($\sigma_T \sim 280$ МПа) и пластичность ($\varepsilon = 7\%$) у образца с покрытием значительно ниже, чем у образца без покрытия.

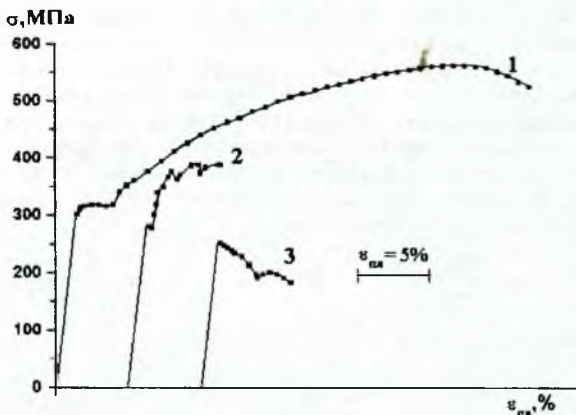


Рис. 2. Диаграммы растяжения:
1 – образец из Ст3; 2 – композиция тип I; 3 – композиция тип II

Еще более низкими показателями характеризуется диаграмма нагружения образца типа II. В данном образце (кривая 3) зарождение зоны пластического течения фиксируется уже на стадии квазиупругого нагружения при $\sigma < 250$ МПа. При напряжении $\sigma \sim 250$ МПа в образце зарождается и быстро распространяется в направлении, перпендикулярном к оси растяжения, трещина, нарушающая целостность наплавленного слоя. В результате выше предела текучести происходит падение деформирующего напряжения. Деформационное упрочнение ненадолго приостанавливает спад напряжения. При пластической деформации $\epsilon \sim 5\%$ наступает разрушение композиции.

2.2. Макроскопическая картина развития локализованной пластической деформации в образцах с покрытием

Образцы типа I. Трещины в тонком покрытии возникают при внешнем напряжении $\sigma \sim 250$ МПа. Вследствие возникшей геометрической неоднородности вблизи каждой трещины в материале основы развивается локализованная пластическая деформация. Типичная картина деформационного рельефа вблизи трещины представлена на рис.3, а. Наиболее интенсивно деформационный рельеф проявляется в вершине трещины и в области зоны с типичной «двулепестковой» конфигурацией.



Рис.3. а) – металлографическая картина ($\epsilon_{пл} \sim 6\%$); поля продольных U_x (б) и поперечных U_y (в) проекций векторов смещений.

На рис.3, б, в представлены поля продольных U_x и поперечных V_y компонент векторов смещений, характеризующих напряженно-деформированное состояние вблизи трещины при степени макродеформации $\epsilon \sim 6\%$, и соответствующая им экспериментально-расчетная картина распределения интенсивности скорости деформации (рис.4, а, б)

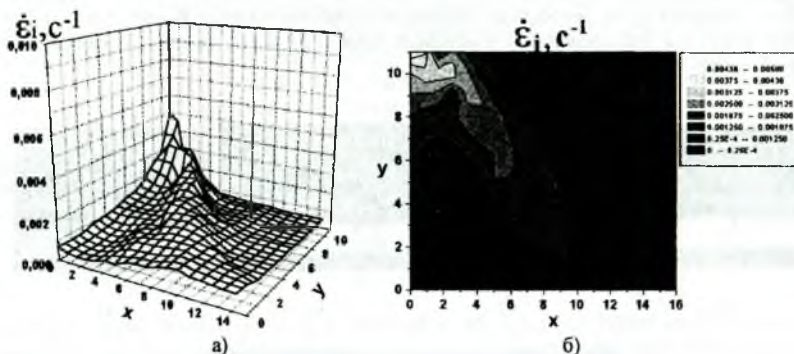


Рис.4. Распределение интенсивности скорости деформации $\dot{\epsilon}_i$ (а) и соответствующие им линии равного уровня (б).

Видно, что наиболее узкие области между изотетами, т.е. области с большими скоростями деформаций, наблюдаются в вершине трещины. Области с максимальной величиной сдвигов, где изотеты U_x параллельны изотетам V_y , находятся симметрично справа и слева относительно трещины. Остальная часть образца вне зоны трещины не деформируется. Это подтверждается отсутствием деформационного рельефа и картиной полей компонент векторов смещений вне зоны локализованной пластической деформации.

По мере роста внешнего напряжения появляются новые трещины, инициируя новые зоны пластичности. В зоне трещин в подложке формируется напряженно-деформированное состояние, качественно подобное тому, что наблюдали в области первой трещины. Окончательное разрушение образца происходит путем развития шейки вблизи трещины, зародившейся последней, при наибольшем напряжении.

Образцы типа II. Совершенно иначе развивается деформация в образце типа II с толстым слоем упрочняющего покрытия. На рис. 5 представлены металлографические картины деформационного рельефа для этих образцов. Первые признаки пластической деформации основы появляются на стадии квазиупругой деформации образца (рис.5, а). При этом целостность толстого покрытия сохраняется. Зарождение первичной зоны пластичности происходит в материале основы на границе с покрытием. Зона пластичности формируется в виде полосы, которая спонтанно распространяется поперек образца, затем изменяет траекторию в направлении максимальных касательных напряжений. В данном случае зона пластичности существенно отличается от «двулепестковой» конфигурации зоны пластичности в области трещин у образцов типа I. По мере роста деформации полоса локализованного пластического течения распространяется через все сечение. Вблизи выхода первичной макро полосы на свободную боковую поверхность образца возникает встречная зона пластичности, которая развивается в объе-

ме материала (рис.5, в). Деформационный рельеф в остальной части образца при этом напряжении отсутствует. Последующее увеличение внешнего напряжения приводит к развитию на межфазной границе раздела новых зон пластичности, отдаленных от первичного очага. Развитие локализации пластической деформации в отдельных зонах приводит к образованию трещины в покрытии. Это происходит в зоне наименьшей толщины покрытия. Конфигурация зон локализованной пластической деформации вблизи трещины сразу приобретает типичную «двулепестковую» форму (рис.5, г) подобно тому, как это происходит в образцах типа I. Далее происходит формирование шейки и разрушение образца отрывом.

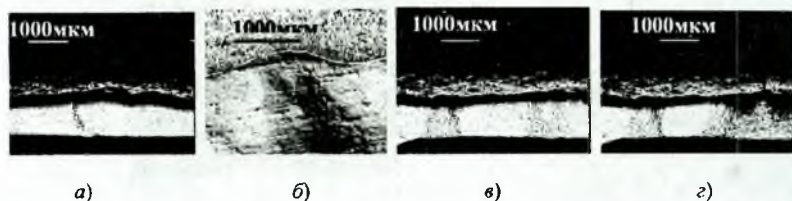


Рис. 5. Деформационный рельеф образца типа II.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Несмотря на высокие прочностные свойства покрытия, механические свойства композиции «сталь Ст3– покрытие ПГ-10Н-01», по сравнению с образцом без покрытия, существенно ниже. Это объясняется наличием концентраторов напряжений, ответственных за крайне локализованное развитие пластической деформации и разрушения. Проанализируем локальное напряженно-деформированное состояние в зонах пластичности.

Образец типа I. В таких образцах первая трещина в покрытии возникает при внешне приложенном напряжении – 250 МПа, что ниже предела текучести основы ($\sigma = 300$ МПа). Этим можно объяснить отсутствие пластической деформации в основе до момента возникновения трещины. Причина появления трещины – несовместность упругих деформаций основы и покрытия. Этот результат согласуется как с экспериментальными данными [2], так и с результатами численного эксперимента, проведенного в работе [17].

Вследствие возникновения геометрической неоднородности в виде трещины в покрытии, распределение напряжений в ее зоне становится неоднородным. Конфигурацию формирующейся зоны пластичности определяет конфигурация распределения касательных напряжений в окрестности трещины, имеющая типичную «двулепестковую» форму. Так как при малых пластических деформациях приращения касательных напряжений пропорциональны сдвигам, то с помощью оптико-телевизионного измерительного комплекса можно восстановить картину их распределения на любой стадии пластической деформации. На рис.5 представлена картина распределения величины интенсивности скорости деформации в зоне трещины и картина соответствующих линий равного уровня. Конфигурация зоны локализованного сдвига имеет характерную «двулепестковую» форму с максимальной интенсивностью сдвига в вершине трещины и совпадает с картиной наблюдаемого деформационного рельефа. Конфигурации зоны сдвигов, зон повышенной пластичности, наблюдаемых в эксперименте по интенсивно-

сти деформационного рельефа и аналитически рассчитанных для упругой пластины в области надреза – качественно подобны [23]. Картина распределения интенсивности напряжений при распространении трещины в покрытии, полученная в работе [14] численным моделированием, также имеет подобную конфигурацию. По мере увеличения внешнего напряжения из-за большой величины сдвига в области повышенных деформаций происходит упрочнение материала, и деформация образца в ней временно прекращается. Это приводит к возникновению новой трещины в покрытии, вблизи которой формируется своя зона повышенной пластичности «двулепестковой» формы. Характер разрушения такого образца отрывом также определяется напряженно-деформированным состоянием вблизи трещины, зародившейся последней.

Образцы типа II. В таких образцах зона пластичности зарождается на границе раздела покрытие-основа до появления первых трещин. В [24] существующие в композиции структурные напряжения, обусловленные различиями свойств основы и покрытия, оцениваются по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{E_o H^2}{6(1 - \mu_o) \rho h}, \quad (3.1)$$

где H – толщина основы; ρ – радиус кривизны основы; μ_o – коэффициент Пуассона основы; E_o – модуль упругости основы; h – толщина покрытия. Несколько иной вид у выражения для оценки σ_5 , предложенного Бреннером-Сендероффа [24]:

$$\sigma_5 = \frac{E_o H}{6 \rho h} \left[\left(H + \frac{E_H}{E_o} \right)^{3/4} h \right], \quad (3.2)$$

где E_H – модуль упругости покрытия. Из этого следует, что локально в местах с малым радиусом кривизны основы напряжения будут больше приложенных. На рис. 5, б приведена металлографическая картина, снятая при большом увеличении того места границы, где зарождается зона повышенной пластической деформации. Видно, что профиль границы основы в этом месте искривлен в сторону покрытия и имеет малый радиус кривизны. Таким образом, область повышенных касательных напряжений с «двулепестковой» конфигурацией расположена со стороны наплавленного покрытия. Зарождается зона пластичности в месте максимальных касательных напряжений на границе раздела покрытие-основа. Очаг пластической деформации развивается в объем мягкой основы в виде полосы и быстро распространяется под действием концентратора напряжений на границе. Компенсация изгиба образца, обусловленного большим, по сравнению с покрытием, растяжением основы за счет прошедшей полосы локализованной деформации, осуществляется путем зарождения на противоположной стороне основы и последующего роста второй, встречной макрополосы (рис. 5, в). По мере роста внешне приложенного напряжения область прошедшей деформации упрочняется и зарождается новая зона пластичности в другом месте вогнутого по отношению к покрытию участка границы. В отличие от образцов типа I трещина в образцах типа II зарождается из-за несовместности пластической деформации основы и упругой деформации наплавленного покрытия. Сразу же после зарождения трещины изменяется характер распределения касательных напряжений около нее и, соответственно, конфигурация сформированных зон пластичности (рис. 5, д).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Независимо от типа образцов конфигурация зон пластичности под действием концентратора в вершине трещины приобретает типичную «двулепестковую» форму.
2. В материалах с покрытиями концентраторами напряжений, ответственными за возникновение зон пластичности, являются выпуклые в сторону более прочного покрытия участки границы раздела композиции.

Список литературы

1. Панин В.Е., Слосман А.И., Колесова Н.А. Закономерности пластической деформации и разрушения на мезоуровне поверхностно упрочненных образцов при статическом растяжении // ФММ. – 1996. – Т.82 – Вып.2. – С.129-136.
2. Панин С.В., Дураков В.Г., Прибытков Г.А. Мезомеханика пластической деформации и разрушения низкоуглеродистой стали с высокопрочным деформируемым покрытием // Физ. мезомех. – 1998. – Т.1 – № 2. – С.51-58.
3. Панин В.Е., Слосман А.И., Колесова Н.А. О механизмах фрагментации на мезоуровне при пластической деформации поверхностно-упрочненной хромистой стали // ФММ. – 1997. – Т.84 – Вып. 2. – С.130-135.
4. Панин С.В., Коваль А.В., Трусова Г.В., Почивалов Ю.И., Сизова О.В. Влияние геометрии и структуры границы раздела на характер развития пластической деформации на мезомасштабном уровне борированных образцов конструкционной стали // Физ. мезомех. – 2000. – Т.3 – № 2. – С.99-115.
5. Антипина Н.А., Панин В.Е., Слосман А.И., Овечкин Б.Б. Волны переключения макрополос локализованной деформации при растяжении поверхностно упрочненных образцов // Физ. мезомех. – 2000. – Т.3 – № 3. – С.37-43.
6. Клименов В.А., Панин С.В., Безбородов В.П. Исследование характера деформации на мезомасштабном уровне и разрушения композиции “газотермическое покрытие – основа” при растяжении // Физ. мезомех. – 1999. – Т.2. – № 1-2. – С.141-156.
7. Панин С.В., Какин О.А., Шаркеев Ю.П. Изучение процессов пластической деформации на мезомасштабном уровне инструментальной стали поверхностно-упрочненной методом электронского легирования // Физ. мезомех. – 1999. – Т.2 – № 4. – С.75-85.
8. Панин В.Е., Колубаев А.В., Слосман А.И. и др. // Износ в парах трения как задача физической мезомеханики // Физ. мезомех. – 2000. – Т.3 – № 1. – С.67-74.
9. Легостаева В.Е., Панин С.В., Гриценко Б.П., Шаркеев Ю.П. Исследование процессов пластической деформации на макро-, мезо- и микромасштабных уровнях при трении и износе стали 45, поверхностно-упрочненной ионной имплантацией // Физ. мезомех. – 1999. – Т.2 – № 5. – С.79-92.
10. Панин С.В., Панин В.Е., Байбулатов Ш.А., Беляев С.А., Дураков В.Г. Изучение пластической деформации на мезо- и макромасштабных уровнях при трении и изнашивании “сталь 20Х13 – упрочняющее композиционное покрытие” // Физ. мезомех. – 2001. – Т.4 – № 4. – С.59-72.
11. Витязь П.А., Панин В.Е., Белый А.В., Колубаев А.В. Механика пластической деформации и разрушений поверхностно упрочненных твердых тел в условиях трения // Физ. мезомех. – 2002. – Т.5 – № 1. – С.15-28.
12. Витязь П.А., Клименов В.А., Панин С.В., Нехорошкова О.Н. и др. Влияние структуры и свойств покрытия и основы на поведение композиции “сталь 40Х13 – малоуглеродистая сталь” в условиях деформации сжатием // Физ. мезомех. – 2002. – Т.5 – № 1. – С.37-49.
13. Романова В.А. Моделирование развития пластической деформации с учетом зарождения дефектов на границе раздела // Физ. мезомех. – 2000. – Т.3 – № 3. – С.73-79.
14. Евтушенко Е.П., Макаров П.В., Смолин И.Ю. Моделирование неоднородной деформации материалов с упрочняющим покрытием // Физ. мезомех. – 2000. – Т.3 – № 3. – С.81-85.

15. Стефанов Ю.П., Поболь И.Л., Князева А.Г., Гордиенко А.И. Рост трещины вблизи границы раздела разнородных материалов в условиях сжатия // Физ. мезомех. – 2002. – Т.5 – № 1. – С.81-88.
16. Стефанов Ю.П., Смолин И.Ю. Численное исследование деформации и образования трещин в плоских образцах с покрытиями // Физ. мезомех. – 2001. – Т.4 – № 6. – С.35-43.
17. Псахье С.Г., Моисеенко Д.Д., Смолин А.Ю., Шилько Е.В., Дмитриев А.И. Исследование особенностей разрушения хрупких керамических покрытий на основе метода подвижных клеточных автоматов // Физ. мезомех. – 1998. – Т.1 – № 2. – С.95-100.
18. Панин В.Е., Дураков В.Г., Прибытков Г.А. и др. Электронно-лучевая наплавка композиционных материалов на основе карбида титана // Физика и химия обработки материалов. – 1997. – № 2. – С.54-58.
19. Панин В.Е. Белюк С.И. Дураков В.Г. Прибытков Г.А. Ремпе Н.Г. Электронно-лучевая наплавка в вакууме: оборудование, технология, свойства покрытий // Сварочное производство. – 2000. – №2 – С.34-38.
20. Дерюгин Е.Е., Панин В.Е., Панин С.В. Сырямкин В.И. Способ неразрушающего контроля механического состояния объектов и устройство для его осуществления. Патент Российской Федерации №22126523. Опул. Бюллетень изобретений № 5, 20.02.99.
20. Syryamkin V.I., Panin S.V. Television-optical technique for materials investigation and diagnostics of state of loaded materials and structure parts. // Вычислительные технологии. – 2003 – Т8. – С.10-25.
21. Деревязина Л.С., Панин В.Е., Стрелкова И.Л. Количественные оценки напряженно-деформированного состояния в зоне геометрического концентратора напряжений // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2002. – № 4. – С.43-49.
22. Савин Г.Н. Концентрация напряжений около отверстий. М-Л.: Изд-во: техн.-теоз. лит-ры, 1951.-496с.
23. Долгов Н.А. Влияние модуля упругости покрытия на работоспособность системы основания-покрытие // Проблемы прочности. – 2002. – № 2. – С.66-72.

УДК 655.3

ФРАКТАЛЬНЫЙ ПОДХОД В ИССЛЕДОВАНИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ БУМАГИ И ДЕКЕЛЯ

Кулак М. И., Старченко О. П.

БГТУ, г. Минск, Республика Беларусь,
kulak_m@yahoo.com

Свойства поверхности бумаги и ее упругость имеют большое практическое значение и во многих случаях определяют возможность и качество воспроизведения тех или иных изображений. Требования к прочности бумаги в большой степени зависят от назначения продукции. При длительном хранении полиграфической продукции в некоторых случаях необходимо обеспечить прочность бумаги. Из физико-механических свойств бумаги имеет большое значение прочность ее поверхностного слоя, т. е. сопротивление ее разрушению при разрыве красочного слоя, характеризуемое «выщипыванием» волокон или же разрушением мелованного слоя бумаги, и прочность на разрыв. Все это крайне затрудняет процесс печати и приводит к резкому снижению производительности печатного оборудования [1].

Перейдем далее к описанию распределения модулей упругости в приповерхностном слое печатной бумаги. С точки зрения теории структур, бумагу, как неупорядочен-