

нейная скорость перемещения образца вдоль линии обработки составила 1 м/с.

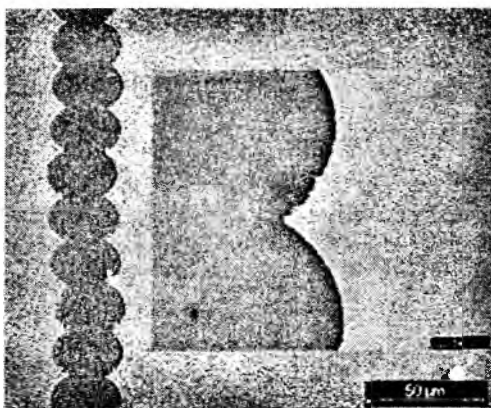


Рисунок 4 – СЭМ снимок канала полученного при абляции тонких плёнок молибдена фемтосекундными импульсами при фокусировке лазерного излучения на задней поверхности плёнки.

Анализ полученных результатов показывает, что при низкой плотности энергии на поверхности образца, до 1 Дж/см², и при частоте следования импульсов до 1 кГц можно производить абляцию тонких плёнок молибдена не повреждая материал нижней расположенной подложки. Так же в работе показано, что количество энергии необходимое для абляции тонких плёнок

молибдена при фокусировке лазерного излучения через подложку в несколько раз ниже, чем при использовании прямой фокусировки и составляет 30 Дж/см³. Количество энергии необходимое для абляции тонких плёнок молибдена при фокусировке лазерного излучения при непосредственной фокусировке на поверхности образца составляет 260 Дж/см³. Таким образом, абляция тонких плёнок молибдена, применяемого в фотовольтаике, при фокусировке на задней поверхности позволяет увеличить скорость до 4 м/с, что позволяет применять полученные результаты для промышленного производства фотовольтаических элементов.

Дальнейшие эксперименты будут направлены на оптимизацию технологических параметров процесса обработки тонких плёнок металлов на прозрачных подложках.

1. А.Е. Delahoy, L. Chen “Advanced CIGS Photovoltaic Technology”, Annual Technical Report–Phase II 15 November 2002–14 November 2003, NREL/SR-520-35922, May 2004.
2. Кисель, В.Э. Материалы 9-й Международной научно-технической конференции «Лазерная физика и оптические технологии» / В.Э. Кисель, А.С. Руденков, А.Е. Гулевич, Н.В. Кулешов, 30.05-02.06 2012, Гродно 2012, с.12.

УДК 539.375

СТАТИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНА В УПРОЧНЯЮЩЕМСЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ С УЧЕТОМ РАЗГРУЗКИ

Гундина М.А.

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь*

Построение поверхностных и контурных графиков полей напряжений и деформаций для статической трещины в упругопластическом материале позволяет наглядно и детально представить напряженно-деформированное состояние в окрестности ее вершины. Учитывается момент перехода из зоны активного накопления повреждений к зоне разгрузки.

Рассматривается окрестность вершины конечной трещины нормального отрыва в неограниченном упругопластическом теле.

Нахождение точных решений, описывающих напряженно-деформированное состояние тел с концентраторами напряжений типа трещин, представляет значительные математические и вычислительные трудности из-за нелинейности определяющих уравнений и сингулярности полей напряжений и деформаций.

Невозможность формулировки задачи непосредственно для конечных значений внешних

усилий и перемещений при сложных траекториях нагружения приводит к тому, что большинство применяемых методов ориентированы на дискретизацию исходной задачи, и ее непосредственную алгебраизацию на начальном этапе, что серьезно осложняет анализ результатов, увеличивает затраты на подготовку и время вычислений.

Метод асимптотических разложений позволяет представить деформации и напряжения в виде полных рядов по степеням полярного радиуса [1,2]. Нелинейная задача при этом редуцируется к последовательности связанных краевых задач относительно неизвестных коэффициентов разложений деформаций (или напряжений). Каждая из задач формулируется как задача о собственных значениях и функциях нелинейного или линейного дифференциального оператора на разных этапах. Отыскивается нетривиальное решение, удовлетворяющее специальным краевым условиям.

Разрешающими уравнениями задачи являются уравнения равновесия, соотношения Коши и соотношения теории течения с упрочнением при условиях несжимаемости материала в приращениях в полярной системе координат. Нормировка уравнений производится по параметру нагружения, имеющему размерность коэффициента интенсивности напряжений.

$$\delta s_{ij} = \delta e_{ij} + \mathcal{G} \delta F(\Gamma) e_{ij}, \quad i, j = r, \varphi,$$

$$\delta \sigma_{rr,r} + (\delta \sigma_{rr} - \delta \sigma_{\varphi\varphi})/r + \delta \sigma_{r\varphi,\varphi}/r = 0,$$

$$\delta \sigma_{r\varphi,r} + 2\delta \sigma_{r\varphi}/r + \delta \sigma_{\varphi\varphi,\varphi}/r = 0,$$

$$\delta \varepsilon_{rr} = \delta u_{r,r}, \quad \delta \varepsilon_{\varphi\varphi} = \delta u_{\varphi,\varphi}/r + \delta u_r/r,$$

$$\delta \varepsilon_{r\varphi} = \frac{1}{2}(\delta u_{\varphi,r} + \delta u_{r,\varphi}/r - \delta u_\varphi/r)$$

где $\mathcal{G} = \begin{cases} 1, & \Gamma \geq \Gamma_S, \delta\Gamma \geq 0 \\ 0, & \delta\Gamma < 0 \end{cases}$, $\delta\sigma_{ij}$, $\delta\varepsilon_{ij}$, δu_i – приращения напряжений, деформаций и перемещений,

s_{ij} , e_{ij} – девиаторы напряжений и деформаций, $\Phi(\Gamma)$ – функция интенсивности касательных деформаций, Γ_S – предельное значение интенсивности.

В зоне разгрузки для плоского деформированного состояния деформации имеют вид:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1+\nu}{E}(\sigma_{rr} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi})),$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1+\nu}{E}(\sigma_{\varphi\varphi} - \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi})), \quad \varepsilon_{r\varphi} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{r\varphi}.$$

Для плоского напряженного состояния:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E}(\sigma_{rr} - \nu\sigma_{\varphi\varphi}), \quad \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{E}(\sigma_{\varphi\varphi} - \nu\sigma_{rr}),$$

$$\varepsilon_{r\varphi} = 2 \frac{(1+\nu)}{E}\sigma_{r\varphi},$$

где ν – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга. Нагрузки на кромках трещины равны нулю. Отсюда следуют граничные условия задачи:

$$\delta \sigma_{r\varphi}|_{\varphi=\pi} = 0, \quad \delta \sigma_{\varphi\varphi}|_{\varphi=\pi} = 0,$$

$$\delta \sigma_{r\varphi}|_{\varphi=0} = 0, \quad \delta \sigma_{\varphi\varphi}|_{\varphi=0} = 0.$$

Решение статической задачи можно представить в виде полных разложений по параметру нагружения в окрестности конца трещины:

$$u_r(r, \varphi) = \sum_{n \geq 0} U_n(\varphi) r^{\lambda_n}, \quad u_\varphi(r, \varphi) = \sum_{n \geq 0} V_n(\varphi) r^{\lambda_n},$$

$$\sigma = \frac{2}{3} \sum_{n \geq 0} W_n r^{\lambda_n - 1}.$$

Рекуррентная последовательность $U_n(\varphi), V_n(\varphi), W_n(\varphi)$ и $\{\lambda_k\}_{k=0}^\infty$ подлежит определению.

Графики компонент напряжений и деформаций для статической трещины в условиях плоского деформированного состояния представлены на рис. 1-6.

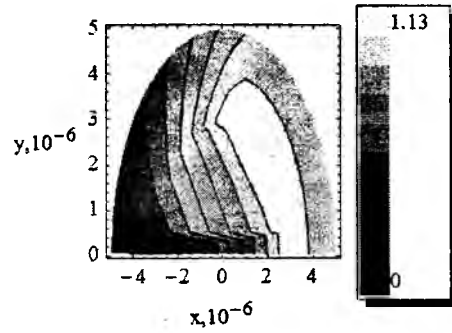


Рисунок 1 - График σ_{rr}

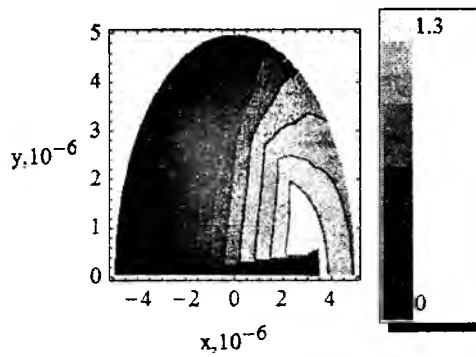


Рисунок 2 - График $\sigma_{\varphi\varphi}$

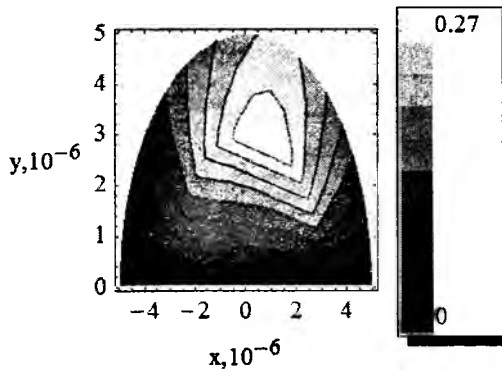


Рисунок 3 - График $\sigma_{r\varphi}$

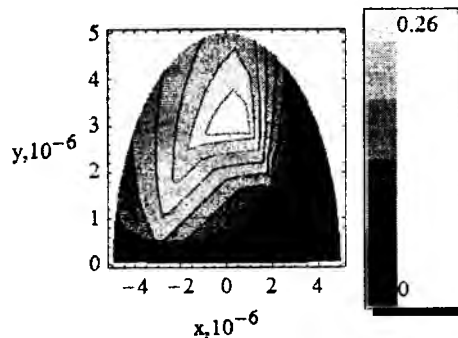
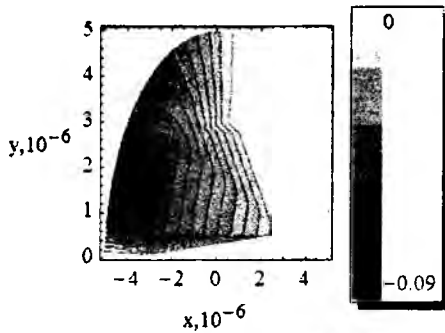
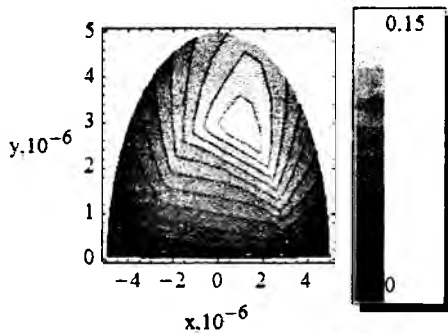


Рисунок 4 - График ε_{rr}

Рисунок 5 - График $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ Рисунок 6 - График $\varepsilon_{r\varphi}$

Сложность компьютерного моделирования данной задачи связана с тем, что уже при нахождении второго приближения задача становится неустойчивой, что определяет большую корреляцию результатов с исходными данными (величина расстояния от вершины трещины, величина погрешности граничных условий). Точ-

ность вычислений задавалась $\varepsilon = 10^{-4}$. Расчеты проводились для стали 12Х18Н9Т, внешнее усилие $P = 300 \text{ МПа}$.

Окружные напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}$ имеют максимум в направлении предполагаемого развития трещины $\varphi = 0$. Распределение напряжений в окрестности вершины трещины становится более равномерным в сравнении с аналогичными результатом в рамках деформационной теории пластичности и нелинейной упругости.

Пластическая область окружена зоной упруго деформированного материала. Заметим, что асимптотические формулы для напряжений и деформаций верны в малой окрестности конца трещины, включающей в себя пластическую область. Область разгрузки примыкает к поверхности трещины, а область полного догружения к поверхности трещины.

1. Нифагин, В.А. Метод асимптотических разложений в теории упругопластических трещин / В.А. Нифагин, М.А. Бубич //Изв. НАН Беларуси, сер. физ.-мат. наук. - 2011. Т. 40. - № 2. - С. 60–66.
2. Нифагин, В.А. Напряженно-деформированное состояние в окрестности вершины трещины для неголономной пластичности в условиях плоского напряженного состояния / В.А. Нифагин, М.А. Гундина //Мех. маш. и мех. - 2012. - №1(18). - С. 47–52.

УДК 621.382.001

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК ОКСИДА СВИНЦА

Гуревич О.В., Ковалёва А.П.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Минск, Республика Беларусь

Тонкие пленки оксида олова используются в качестве контактных слоев с барьером Шоттки в фотовольтаических ячейках, как активный слой видиконов, в электрографии, в лазерах, в качестве электродов в литиевых батареях [1]. Формирование пленок PbO методом реактивного магнетронного распыления показало, что в зависимости от содержания кислорода можно получать пленки разного состава (PbO, PbO_{1,44}, Pb₂O₃ и PbO₂) [2]. Для формирования барьеров Шоттки в фотовольтаических приборах было применено термическое испарение свинца с последующим окислением [3].

Формирование пленок проводили на установке УРМ 3.279.017, оснащенной ионным источником на основе ускорителя с анодным слоем. В качестве рабочих газов использовался аргон и кислород. В качестве подложек приме-

нялись стекло и кремний. Ускоряющее напряжение на аноде составляло 3-4 кВ, ток мишени – 15-55 мА, температура подложки – 40-400°C. Парциальное давление кислорода изменялось в пределах $(1-4) \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.

При низких давлениях O₂ покрытия имели темную окраску и низкую прозрачность. При распылении в чистом кислороде пропускание на $\lambda=555$ нм составило 83% (рисунок 1). При этом температура подложки не превышала 40°C.

На рисунке 2 приведены спектральные зависимости пропускания при давлении кислорода $3 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст (а) и $4 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст (б). Повышение давления кислорода способствовало улучшению прозрачности пленок в ИК диапазоне спектра. Исследование влияния температуры подложки на пропускание показало, что повышение температуры до 200°C