

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

**«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ИНСТИТУТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ, ЭЛЕКТРОНИКИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ РЕСУРС

ПРОГРАММА ДЛЯ ЭВМ

**Программа расчета генерации термических напряжений при  
электронно-лучевой обработке**

г. Таганрог

2017 г.

Методическая разработка программы для ЭВМ «Программа расчета генерации термических напряжений при электронно-лучевой обработке» выполнена: доцентом кафедры НТиМСТ Авдеевым Сергеем Петровичем; доцентом кафедры КЭС Палий Александром Викторовичем; доцентом кафедры КЭС Замковым Евгением Терентьевичем, и рекомендована на заседании учебного совета ИНЭП ЮФУ для включения в банк учебно-методических разработок ЮФУ (протокол заседания совета № 5 от 11 мая 2017 г.). Методическая разработка предназначена для студентов бакалавриата и магистратуры очного отделения ИНЭП ЮФУ. Направления подготовки: 11.03.04, 28.03.01, 28.04.01. Учебный курс «Специальные разделы микро- и нанотехнологии».

## **Программа расчета генерации термических напряжений при электронно-лучевой обработке**

Под влиянием механических или тепловых воздействий в стекле создаются внутренние напряжения. Они подразделяются на временные (переходные) и постоянные (остаточные). Причиной и тех, и других является низкая теплопроводность стекла.

При нагревании стеклянного изделия температура наружных его слоев растет значительно быстрее, чем внутренних. Так как стекло еще не размякло и продолжает сохранять твердое состояние, наружные слои, стремясь под воздействием нагрева расширяться, сделать это не могут.

Внутренние силы, стремящиеся расширить стеклянное изделие, порождают в его наружных слоях напряжения сжатия. Внутренние же слои в это время испытывают под действием наружных напряжений напряжение растяжения. При выравнивании температур между всеми точками изделия напряжения исчезают – это и есть временные напряжения. Именно из-за них лопаются тонкостенный стеклянный стакан, в который налили кипятка – в нем величина напряжений превышает предел механической прочности стекла.

При быстром охлаждении стеклянного изделия, нагретого до точки размягчения стекла или выше, возникает второй, более опасный вид напряжений – постоянные. Причина, порождающая их, та же, однако при выравнивании температуры изделия они не исчезают. В стеклах с высоким коэффициентом термического расширения (КТР) величина остаточных напряжений выше, поскольку сжатие их при охлаждении сильнее.

Остаточные напряжения опасны тем, что без всяких предварительных проявлений изделие, в котором они присутствуют, может самопроизвольно разрушиться при нагреве или при незначительном механическом воздействии – по этой причине иногда взрываются отключенные лампы накаливания и лопаются пустые стеклянные бутылки. Поэтому после выполнения термических работ обязательной является процедура снятия остаточных напряжений. Полностью устранить их невозможно, поэтому задача сводится к сни-

жению их до приемлемой безопасной величины. Для этого выполняется отжиг, сущность которого в нагревании стекла до температуры, при которой оно еще не размягчается, но частицы его уже обретают достаточную подвижность для снятия остаточных напряжений. Диапазон температур, при которых производится отжиг, носит название зоны отжига.

Установлено, что технологические остаточные напряжения при превышении допустимых значений в изделиях с высокой жесткостью в поверхностном слое могут вызвать трещинообразование, а с малой жесткостью – остаточную деформацию, приводящую к короблению с соответствующей потерей точности формы или взаимного расположения поверхностей. При уровне напряжений в пределах допустимых значений видимых изменений не произойдет, но при совпадении знака эксплуатационных нагрузок со знаком остаточных напряжений произойдет разрушение изделия при нагрузках, меньших расчетных.

Остаточные напряжения можно охарактеризовать с помощью особых точек на эпюре распределения (рисунок 1).

Для удобства анализа применяют следующие параметры:

- $\sigma_{\text{п}}$  напряжения на поверхности, МПа;
- $\sigma_{\text{пп1}}$  напряжения максимальные подповерхностные до точки перехода нуля, МПа;
- $\sigma_{\text{пп2}}$  напряжения максимальные подповерхностные после точки перехода нуля, МПа;
- $\sigma_{\text{м}}$  напряжения на выбеге эпюры, МПа;
- $h_0$  точка перехода нуля эпюры напряжений, мкм [17].

Для определения термических напряжений в стекле используется специальный прибор – полярископ, позволяющий рассматривать стеклоизделие в поляризованном свете. Поскольку слои с разной величиной остаточных напряжений по-разному меняют угол поляризации света, то под стеклом анализатора полярископа можно наблюдать красивую картину, наглядно отображающую распределение напряжений.

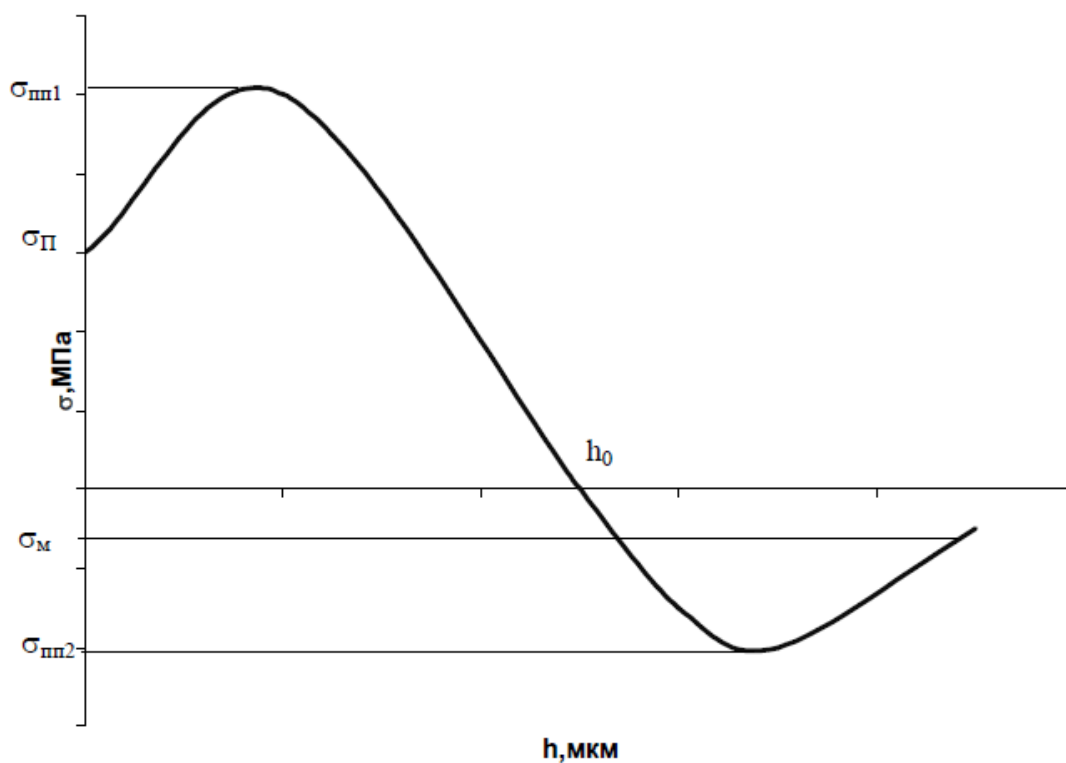


Рисунок 1 – Особые точки на эпюре остаточных напряжений

Формирование при ЭЛО предельно гладкой и чистой поверхности сопровождается созданием под зоной расплава области знакопеременных температурных напряжений. Их действие, кроме деформации изделия, вызывает первоначальное зарождение и накопление микротрещин по термофлуктуационному механизму и определяет параметры последующих технологических этапов отжига, охлаждения и эксплуатации.

Оценка характерных времен прогрева и распространения упругой волны в материале показывает, что при анализе можно пренебречь эффектами инерционности и связности теплого и механического полей. Определение температуры под расплавом будем проводить, воспользовавшись моделью расчета тепловых полей при электронно-лучевой обработки материалов.

Для расчета температурных напряжений при ЭЛО воспользуемся приближением для свободной пластины с изменением температуры только по глубине.

В этом случае выражения для компонентов напряжений записывается в виде

$$\sigma_{xx}(y, t) = \sigma_{yy}(y, t) = \sigma(y, t) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma(y, t) &= \frac{E \cdot \alpha}{1 - \nu_1} \left[ -\Delta T(y, t) + \frac{N_T}{b_1} + \frac{12 \cdot \left( \frac{b_1}{2} - y \right) \cdot M_T}{b_1} \right] \\ N_T &= \int_0^{b_1} \Delta T(y, t) dt \\ M_T &= \int_0^{b_1} \left( \frac{b_1}{2} - y \right) \Delta T(y, t) dt \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

распределения температуры в твердой фазе получим из

$$T(y, t) = T_0 + \frac{q}{\lambda} \sqrt{\frac{\pi a x}{V}} \cdot \operatorname{erfc} \left[ y \sqrt{\frac{V}{4 a x}} \right]. \quad (3)$$

При расчете поля напряжений по моделям теории температурных напряжений (Боли В., Уэйнер Дж) ошибка расчетов не будет превышать 5%.

Подставляя (3) в (2) и выполняя интегрирование, получаем

$$\sigma(y, t) = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Theta_m}{1 - \nu_1} \left[ -\frac{\operatorname{erfc} \xi}{\operatorname{erfc} \xi_h} + \frac{W_1}{b_1 \operatorname{erfc} \xi_h} + \frac{12 \cdot \left( \frac{b_1}{2} - y \right)}{b_1^3 \operatorname{erfc} \xi_h} \left( \frac{W_1 b_1}{2} - \frac{\pi W_1^2}{4} \right) \right], \quad (4)$$

где  $W_1 = \sqrt{\frac{4 a \ell}{\pi V}}$ ;  $\xi = y \sqrt{\frac{V}{4 a x}}$ ,  $\xi_h = \xi$  при  $y=h$ .

В (4) не учтен вклад членов скорости накопления трещин разложения экспоненциального ряда.

Полагая, что первоначальное накопление микротрещин идет в области максимума растягивающих напряжений и определяя из (3) соответствующую  $\sigma_\phi$  температуру  $T_\phi$ , получим условие отсутствия разрушения образца для этапа ЭЛО (рисунок 1).

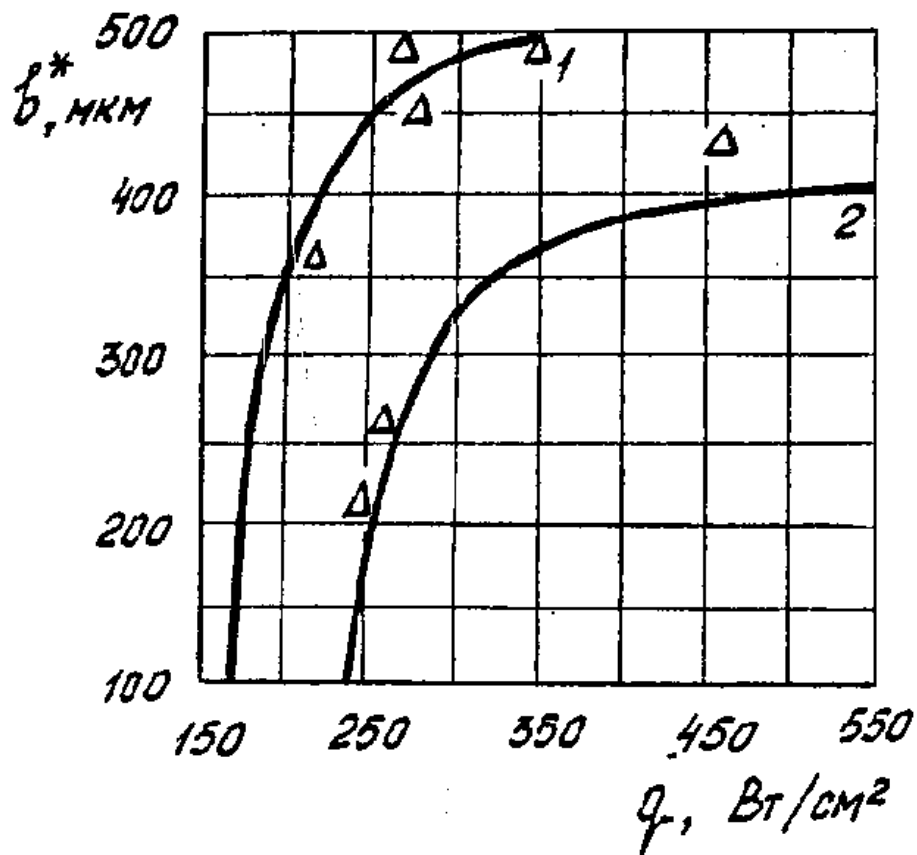


Рисунок 1 - Рассчитанная по (1)-(3) координата максимума растягивающих напряжений ( $b^*$ ) от удельной мощности электронного луча и измеренная толщина откола ( $\Delta$ )

1 -  $l = 0,05$  см; 2 -  $l = 0,1$  см

$$J_1(\tau_h) = \frac{\tau_h}{\tau_0} \exp\left(-\frac{U_0 - \gamma\sigma_\phi}{kT_\phi}\right) \leq 3. \quad (5)$$

Если предположить, что время откола не больше времени ЭЛО  $\tau_h$

$$\tau_h = \frac{l}{V} \left[ 1 + \frac{a}{l} + \frac{x_m}{V} \right] \quad (6)$$

то переписывая (5) в виде

$$\sigma_\phi \leq \frac{1}{\gamma} \left( U_0 + kT_\phi \cdot \ln \frac{3\tau_0}{\tau_h} \right) \quad (7)$$

имеем возможность оценить допустимую для данных режимов ЭЛО область температур начального подогрева.

Технологически значимыми параметрами установки ЭЛО являются скорость нагрева-охлаждения и точность установления и поддержания заданных температур. Анализ температурных напряжений, возникающих при ЭЛО и исследование кинетической модели формирования микротрещин ус-

тановили влияние на этот процесс скорости охлаждения. Проведенные расчеты показывают, что увеличение скорости охлаждения на три порядка позволяет снизить величину соответствующего интеграла накопления на четыре порядка (или уменьшить концентрацию обрывов на данном этапе). Сверху величина скорости охлаждения ограничена известным соотношением (Химическая технология стекла и ситалла. Н.М.Павлушкин)

$$\beta_{0x} = \frac{6a(1 - \nu_1)\sigma_0}{\alpha E b_1^2}$$

где  $\sigma_0$  - допустимые по ТУ для данного изделия остаточные напряжения;  $\nu_1$ ,  $E$ ,  $\alpha$ ,  $b_1$  - коэффициент Пуассона, модуль Юнга, коэффициент температурного расширения и толщина образца соответственно;  $a$  - температуропроводность. Оптимизация процесса по факторам времени, уровню остаточных напряжений и концентрации обрывов позволяет определить величину скорости охлаждения.

Скорость нагрева изделий из стекла определяется только термостойкостью материала, так как прочность стекла при нагреве на сжатие в 6-10 раз больше прочности на растяжение. Обычно при нагреве малоразмерных деталей она составляет 10-40°C/мин.

Точность установления и поддержания температуры в устройстве определяет воспроизводимость результатов процесса ЭЛО. Это связано с существенным влиянием начальных температур на температуру поверхности при ЭЛО, параметры гидродинамических процессов, параметры кинетического накопления обрывов, а также на протекание десорбционных процессов. Можно считать реальным и достаточным при использовании системы нагрева с обратными связями точность установления температуры  $\pm 5^\circ\text{C}$  и ее поддержания  $\pm 1^\circ\text{C}$ .