

В тех случаях, когда заданием на проектирование устанавливаются ограничения на габаритные размеры БЗУ, то есть при  $R < 10l$ , зона захвата уменьшается, и величина коэффициента выдачи  $\eta$  также уменьшается. Это уменьшение  $\eta$  учитывается коэффициентом:  $q = 1 - 1,5\left(\frac{l}{R}\right) + 0,6\left(\frac{l}{R}\right)^2$ . Принимаем  $R = 0,2 \text{ м}$ .

**6. Расчет и конструирование привода и предохранительных устройств.** Конструкция приводов для механизмов захвата и ориентации заготовок влияет на производительность, удобство обслуживания и стоимость БЗУ. Методика расчета привода БЗУ и амортизаторов подробно описана в работах В.Ф. Прейса [2].

Данная методика проектирования и расчета дисковых БЗУ может быть рекомендована как инженерам, так и студентам машиностроительных специальностей при выполнении курсовых и дипломных проектов.

**Список литературы.** 1. Автоматическая загрузка технологических машин: Справочник / И.С.Бляхеров и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с. 2. Автоматизация загрузки прессов штучными заготовками / В.Ф.Прейс и др. М., Машиностроение, 1975. – 280 с.

## К РАСЧЕТУ ГЕОМЕТРИИ ТОРЦОВОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

**Зубов А.В., Байков А.В.** (каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

На финишных этапах обработки, характеризующихся применением шлифовального инструмента на эластичной полимерной связке, эффективность процесса определяется не только производительностью обработки, но и равномерностью удаления материала [1,2].

На производительность и равномерность съема материала, помимо режимов резания и других технологических факторов, существенное влияние оказывает геометрия торцового шлифовального инструмента, а именно - коэффициент заполнения алмазоносного слоя [2,3].

Расчеты, выполненные на основании формул [3], показывают, что величина съема материала прямо пропорционально зависит от коэффициента заполнения. То есть, с целью обеспечения максимальной производительности обработки необходимо выбирать инструмент со сплошным алмазоносным слоем. Однако, в отличие от теоретических расчетов, в реальных условиях такой инструмент показывает низкую работоспособность. Это обусловлено неблагоприятными условиями для циркуляции смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) между поверхностью круга и обрабатываемым материалом, что приводит к недостаточно эффективному удалению шлама из зоны резания и «зависанию» инструмента над обрабатываемой поверхностью. С целью обеспечения возможности циркуляции СОЖ в межзеренном пространстве и сохранения достаточно высокой производительности обработки необходимо использовать торцовые шлифовальные круги с вырезами определенной конфигурации. Варьируя ширину выреза можно изменять коэффициент заполнения, следовательно, и производительность обработки.





Обе кривые имеют немонотонно возрастающий характер, т.е. зависимости рассматриваемых погрешностей не имеют явно выраженные точки изменения интенсивности возрастания. В связи с этим ширину зоны шлифовального круга для расчета величины коэффициента заполнения целесообразно определять из соотношения: погрешность определения – количество расчетных уравнений. В частности, при ширине зоны шлифовального круга ( $\Delta=0,1R$ ) количество уравнений расчетной системы не превышает десяти, а величина относительной погрешности определения коэффициента заполнения не превышает 1% от номинальной величины, что достаточно приемлемо для инженерных расчетов.

Систему уравнений (2) можно использовать для определения закона распределения коэффициента заполнения вдоль радиуса инструмента, обеспечивающего наибольшую равномерность съема материала поперек полосы трассирования. Задавая значения съема материала в каждой линейной зоне, перпендикулярной направлению подачи инструмента, получим систему линейных уравнений относительно коэффициентов заполнения  $k_j$ .

**Список литературы:** 1. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с. 2. Финишная алмазно-абразивная обработка неметаллических деталей / Рогов В.В. – К.: Наук. Думка, 1985. – 264 с. 3. Михайлов А.Н., Байков А.В., Ковалев М.С. Формообразование плоской поверхности при обработке эластичным шлифовальным инструментом / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: - ДонГТУ, 2000. Вып. 5.- с.137-143.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Каиров В.А., Каиров А.С. (каф. ТСМ, НУК, г. Николаев, Украина)

**Постановка задачи.** Автоматизация проектирования технологических процессов наряду со значительным сокращением сроков и трудоемкости проектирования позволяет существенно повысить качество проектных решений. Одной из основных задач при разработке САПР технологических процессов (ТП) является расчет оптимальных параметров режимов резания, которые существенно влияют на качество и производительность обработки.

В известных публикациях [1-3], посвященных данной проблеме, оптимизационные математические модели построены в основном на основе упрощенных функциональных зависимостей и включают в свой состав не все необходимые ограничения, в результате чего полученные математические модели не всегда отвечают условиям адекватности. Это вызывает необходимость уточнения оптимизационных математических моделей и полученных решений.

**Целью данной работы** является создание уточненной математической модели, описывающей процесс резания конструкционных материалов при токарной обработке, для исследования оптимальных параметров режимов резания.

**Изложение основного материала.** Рассмотрим токарную операцию при продольном точении наружной поверхности диаметра  $D$  на станке с ЧПУ для

одноинструментальной наладки. В качестве управляемых параметров принимаются осевая подача суппорта  $s$  и скорость резания  $v$ , выраженная через частоту вращения шпинделя  $n$ . Глубина резания  $t$  является неуправляемым параметром и принимается постоянной. В результате вычислений определяются подача суппорта, частота вращения шпинделя и основное технологическое время обработки.

Оптимизация процесса механической обработки формулируется следующим образом. Найти значения переменных  $\bar{x} = (x_1, x_2)$ , минимизирующих вектор целевой функции  $F = f(\bar{x})$  в области существования допустимых оптимальных решений  $\Omega$ , заданной ограничениями  $R_i(\bar{x}) \leq R_i^0$  ( $i = \overline{1, m}$ ),  $\bar{x} \in \Omega$ , где  $R_i(\bar{x})$  – значение  $i$ -й характеристики процесса резания в зависимости от исходных параметров;  $R_i^0$  – предельное значение  $i$ -й характеристики процесса резания.

В качестве критерия оптимальности принято основное технологическое время механической обработки. Экстремальное значение функции цели ищется в виде  $F = \min(T_0)$  или  $F = C/(n \cdot s)$ , где  $C$  – постоянная величина ( $C = \text{const}$ ), не зависящая от параметров режимов резания  $n$  и  $s$ . Из этого выражения следует, что значение функции  $F$  стремится к минимуму, когда произведение  $n \cdot s$  будет максимальным. После преобразований целевая функция приводится к виду

$$F = n \cdot s \rightarrow \max.$$

В качестве целевой функции может быть использован также критерий минимальной себестоимости или обобщенный критерий, состоящий из скалярной суммы частных критериев.

Область существования допустимых решений ограничивается функциональными зависимостями  $R_i(\bar{x})$ , аппроксимирующими основные закономерности процесса резания и определяемыми кинематикой станка, характеристиками режущего инструмента, техническими требованиями к обработке [4]. Выбор технических ограничений определяется конкретными условиями технологического, конструктивно-го и организационно-производственного характера.

Ограничение по стойкости инструмента находится из условия  $v \leq v_p$  и устанавливает зависимость между скоростью резания, заданной стойкостью, геометрией резца, глубиной резания, осевой подачей суппорта и механическими свойствами обрабатываемого материала [4]. После стандартных преобразований ограничение по стойкости инструмента примет вид:

$$ns^{y_v} \leq \frac{10^3 C_v K_v}{T^m t^{x_v} p D},$$

где  $v$ ,  $v_p$  – действительная и допустимая скорости резания, м/мин;  $C_v$  – постоянный коэффициент, характеризующий нормативные условия обработки;  $K_v$  – поправочный коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала, состояние поверхности заготовки, характеристику режущего инструмента;  $T$  – заданная стойкость инструмента, мин;  $m$  – показатель относительной стойкости;  $s$  – подача, мм/об;  $x_v, y_v$  – показатели степеней переменных в формуле скорости резания.

Ограничение по точности обработки, определяемое жесткостью технологической системы, характеризуется отклонением  $y_{c \max} \leq \Delta$ . В основу его

положено условие, при котором величина прогиба  $y_{c \max}$  заготовки под действием радиальной составляющей силы резания  $P_y$  ограничивается предельно допустимой величиной отжима резца  $\Delta = \varphi(\delta)$ , зависящей от допуска  $d$  на размер детали. Наибольшая величина прогиба заготовки, рассматриваемой как упругая балка, в зависимости от метода закрепления определяется по формуле:

$$y_{c \max} = \frac{P_y \cdot L_3^3}{6 \cdot E_3 \cdot I},$$

где  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания, Н [4];  $L_3$  – расстояние между опорами или вылет заготовки, м;  $E_3$  – модуль упругости обрабатываемого материала, МПа;  $I$  – момент инерции поперечного сечения заготовки в месте искомого прогиба, м<sup>4</sup>;  $b$  – коэффициент закрепления заготовки.

Ограничение по мощности электродвигателя главного привода станка при черно-вой обработке выражается условием  $N \leq N_{\eta}$ , где  $N_{\eta}$  – мощность электродвигателя главного привода станка, кВт;  $N$  – эффективная мощность, затрачиваемая на процесс резания [4], кВт;  $\eta$  – КПД кинематической цепи от электродвигателя к инструменту.

По подаче и частоте вращения шпинделя область допускаемых решений ограничивается предельными кинематическими характеристиками станка:

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}; \quad s_{\min} \leq s \leq s_{\max}.$$

Ограничение по шероховатости поверхности для чистовой обработки определяется из условия  $R_a \geq R$ , а по осевой составляющей силы резания, допускаемой прочностью механизма подачи, для черновой обработки выражается отношением  $P_x \geq P_n$ , где  $R_a, R$  – заданная и получаемая шероховатость, мкм;  $P_x, P_n$  – допускаемая механизмом подачи и действующая продольная сила резания. На область допустимых решений влияют также ограничения по прочности и жесткости державки резца, зависящие от тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$ , геометрических характеристик и материала державки. Случайные факторы учитываются косвенно соответствующими коэффициентами.

Объединив приведенные ограничения и целевую функцию в систему, получим математическую модель процесса резания для токарной операции, которая описывает основные связи оптимизирующих параметров с характеристиками, учитывающими возможности технологической системы. Введя параметры  $x_1 = \ln n$ ,  $x_2 = \ln(100s)$  и выполнив переход к логарифмическим координатам, приведем полученную математическую модель к линейному виду. Решение ищется симплексным методом [5].

Решаемая задача сводится к отысканию среди допустимых неотрицательных значений вектора  $\bar{x}$  на границе области  $\Omega$  таких  $x_1^*$  и  $x_2^*$ , при которых целевая функция принимает экстремальные значения. Переход от нормированных значений найденных параметров к натуральным величинам выполняется по формулам:

$$n^* = \exp(x_1^*); \quad s^* = \exp(x_2^*)/100.$$

При определении дискретных значений параметров режимов резания применяется метод полного перебора точек, образующих выпуклый многоугольник допустимых решений. Могут быть использованы и другие численные методы.

На основе приведенной математической модели для токарной операции разработано программное обеспечение подсистемы САПР расчета оптимальных параметров режимов резания. Исходными данными для данной задачи служат характеристики детали, режущего инструмента, оборудования и обрабатываемого материала, содержащиеся в технологических базах данных. Наличие баз данных, составляющих информационное обеспечение автоматизированной системы, позволяет САПР технологических процессов легко адаптироваться к различным производственным условиям.

**Выводы.** Разработанная уточненная оптимизационная математическая модель, описывающая процесс резания конструкционных материалов при точении, и созданный на ее основе алгоритм расчета позволяют существенно повысить качество проектных решений и производительность проектирования, снизить трудоемкость технологических операций.

**Список литературы.** 1. Капустин Н.М. Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1980. – 256 с. 2. Сикора Е.А. Оптимизация процессов обработки резанием с применением вычислительных машин. – М.: Машиностроение, 1983. – 226 с. 3. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов. / Под ред. С.Н.Корчака. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с. 4. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т./ Под ред А.Г.Косиловой, Р.К.Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – Т.2. – 496 с. 5. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2-х кн. – М.: Мир, 1986. – Кн.1. – 349 с.

## ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРОЕКЦИЙ ФЕДОРОВА

**Коломиец А.Ф., Пастернак Д.Н., Абрамов А.Н.**

(каф. НГ и ИГ, ДонНТУ, г.Донецк, Украина)

В начале XIX века известный кристаллограф Федоров Е.С. создал новую проекционную систему изображения пространства на плоскости [1]. Она была создана им для рационального отображения на плоскости объектов геологии, в частности кристаллографии, и горного дела.

Сущность предложенной системы состоит в следующем (рис. 1). Даны плоскость проекций  $\Pi$  и два центра проецирования  $S_\infty, T_\infty$ , расположенных в несобственных точках.

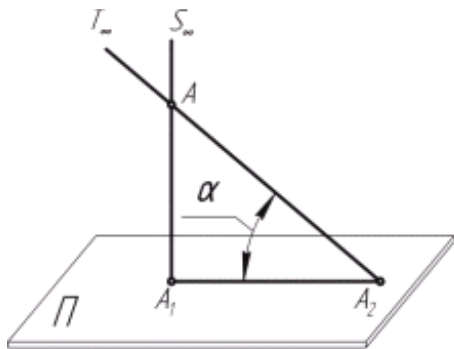


Рис. 1. Построение проекций  
Фёдорова

Центр  $S_\infty$  сопряжен с плоскостью  $\Pi$  прямоугольно, центр  $T_\infty$  - косоугольно. Объект пространства, в данном случае точка  $A$ , изображается на плоскости  $\Pi$  двумя проекциями – прямоугольной  $A_1$  и косоугольной  $A_2$ . Зная угол  $\alpha$  наклона проецирующих лучей, можно реконструировать изображенный предмет. Поэтому на чертеже помимо двух проекций предмета должен быть задан и угол  $\alpha$  наклона проецирующих лучей (рис. 2).

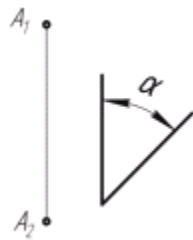


Рис. 2. Проекция Фёдорова

Несмотря на очевидные преимущества перед другими проецирующими системами в изображении геологических и горных объектов, данная система не получила должного применения. Дело в том, что не был разработан способ преобразования изображений в системе Федорова.

Мало изобразить рационально предмет, нужно еще и решить задачу, ради которой выполнены изображения. Поэтому, чтобы решить задачу, использовали замену плоскостей проекций, предварительно перейдя от проекций Федорова к эпюру Монжа, т.е. преимущества проекций Федорова полностью убрались.

Поэтому возникла необходимость создания способа преобразования изображений, который бы органически вписывался в систему проекций Федорова и давал бы возможность полностью реализовать преимущества данной проекционной системы.

Нам представляется, что таким способом может быть вспомогательное проецирование [2].

В данной работе изучено прямоугольное вспомогательное проецирование для решения метрических задач в проекциях Федорова.

Сущность прямоугольного вспомогательного проецирования рассмотрим на схеме (рис. 3). Пусть дана плоскость проекций  $\Pi$ , которую изобразим в виде линии, и две прямые  $l$  и  $m$ . Необходимо определить расстояние между  $l$  и  $m$ .

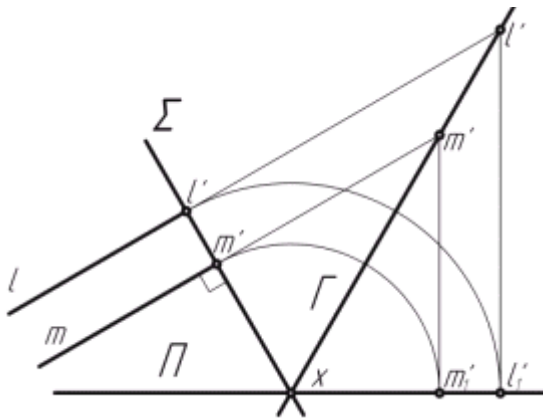


Рис.3. Определение расстояния между параллельными прямыми

Выберем в качестве направления дополнительного проецирования прямые  $l$  и  $m$ . Дополнительную плоскость проекций  $\Sigma$  назовем перпендикулярно  $l$  и  $m$ . Тогда точки пересечения  $l'$  и  $m'$  прямых  $l$  и  $m$  с плоскостью  $\Sigma$  будут дополнительными проекциями этих прямых на плоскость  $\Sigma$ . Повернув плоскость  $\Sigma$  вокруг линии  $\chi$  пересечения  $\Pi$  и  $\Sigma$  до совмещения с плоскостью  $\Pi$ , получим на чертеже натуральную величину  $m'l'1'$  расстояния между  $l$  и  $m$ .

Построения можно упростить, если вместо  $\Sigma$ , назначить плоскость  $\Gamma$ , биссекторную относительно дополнительного и основного прямоугольного направлений проецирования. В этом случае операция совмещения исключается. Таким образом в основе прямоугольного вспомогательного проецирования в проекциях Федорова лежат две задачи – построение плоскости  $\Gamma$ , биссекторной относительно дополнительного и основного прямоугольного проецирований и определение точек  $l'$ ,  $m'$  пересечения  $l$ ,  $m$  с  $\Gamma$ . Спроецировав  $l'$  и  $m'$  прямоугольно на  $\Pi$ , получим искомое расстояние  $m'l'1'$ .



Покажем данные построения на чертеже. Пусть заданы прямая АВ и угол  $\alpha$  косоугольного проецирования (рис. 4).

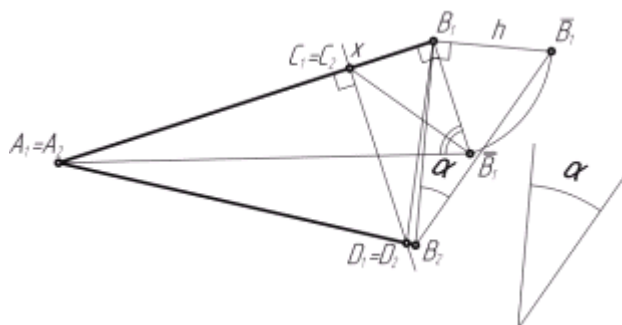


Рис. 4. Диаграмма построения плоскости  $\Gamma$  и носителя

Определим высоту  $h$  точки В, используя угол  $\alpha$ . Вращением вокруг проекции  $A_1B_1$  совместим точку В с плоскостью  $\Pi$  в точке  $\overline{B}_1$ . Разделим угол  $A_1\overline{B}_1B_1$  пополам. Через точку С проведем прямую  $x$  перпендикулярно  $A_1B_1$ , которая будет линией пересечения плоскостей  $\Pi$  и  $\Gamma$ . Плоскость  $\Gamma$ , заданная линиями  $BC$  и  $x$ , будет биссекторной относительно АВ и основного прямоугольного проецирования.

Построим точку В пересечения прямой АВ с плоскостью  $\Gamma$ . Заключим прямую АВ в косоугольно-проецирующую плоскость  $\Delta$ . Построим линию DB пересечения  $\Gamma$  и  $\Delta$ . Косоугольная проекция  $D_2B_2$  линии DB совпадет с  $A_2B_2$ , прямоугольная  $D_1B_1$  пройдет через точки  $D_1, B_1$ . На пересечении  $D_1B_1$  и  $A_1B_1$  будет расположена точка В. Линия  $D_1B_1$  – носитель вспомогательной проекции прямой АВ. Чертеж, на котором построены плоскость  $\Gamma$  и носитель  $D_1B_1$ , назовем диаграммой.

В качестве примера решим задачу. Определить натуральную величину расстояния  $d$  между прямыми EF и KL (рис. 5). На чертеже задан угол  $\alpha$  косоугольного проецирования.

Назначим прямую EF в качестве дополнительного проецирования.

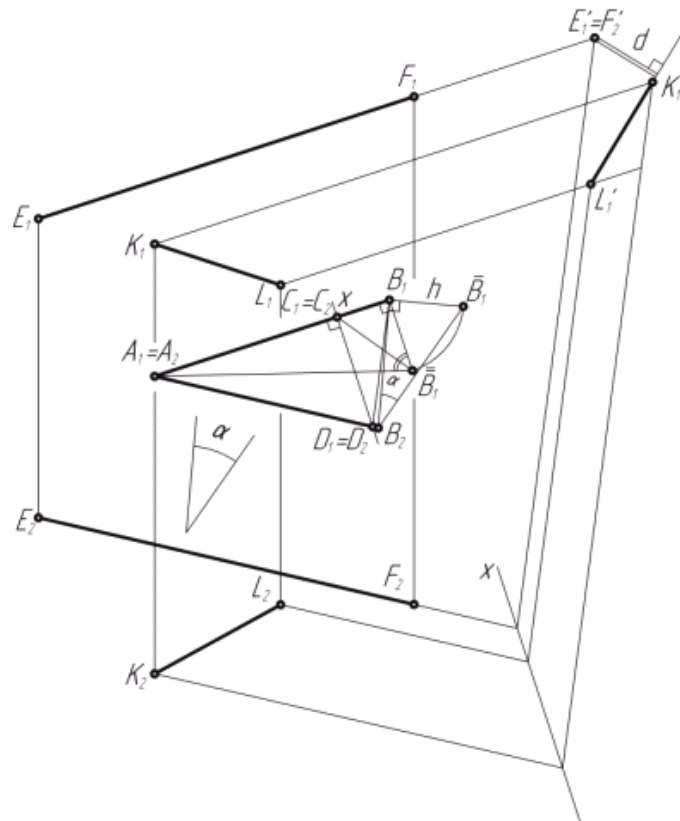


Рис. 5. Определение расстояния между скрещивающимися прямыми

Построим диаграмму. Возьмем в свободном месте чертежа точку А и через нее проведем прямую АВ параллельно EF. Далее выполняем все построения, аналогичные построениям на рис. 4.

В удобном месте чертежа проводим линию  $x$ , параллельно линии  $x$  на диаграмме. Через точки  $E_2, F_2, K_2, L_2$  проводим косоугольные проекции лучей до пересечения с линией  $x$ . Из полученных точек пересечения строим носители, параллельные носителю  $D_1B_1$  из точек  $E_1, F_1, K_1, L_1$  проводим прямоугольные проекции лучей до пересечения с соответствующими носителями. Получим вспомогательные проекции  $E'_1 = F'_1$ ,  $K'_1L'_1$  прямых EF и KL.

Отрезок  $d$  перпендикуляра из точки  $E'_1 = F'_1$  на  $K'_1L'_1$  - искомое расстояние.

Рассмотренный метод прямоугольного вспомогательного проецирования органично вписывается в проекционную систему Федорова. Благодаря своей простоте и гибкости он дает возможность расширить область применения проекции Федорова в геологической и горной практике.

**Список литературы:** 1. А.Р. Зенгин. Приложение метода Е.С. Федорова к горному делу // Методы начертательной геометрии и ее приложения, 1955. – М.: ГИТТЛ. – 411с. 2. Колотов С.М. Вопросы теории изображений. – К.: Изд-во Киевского университета, 1972. – 162с.

## ПРЯМОУГОЛЬНОЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ПРОЕКЦИРОВАНИЕ В ПРОЕКЦИЯХ ФЕДОРОВА

**Коломиец А.Ф., Пастернак Д.Н., Малык Д.В.**

(каф. НГ и ИГ, ДонНТУ, г.Донецк, Украина)

В 1907 году академик Федоров Е.С. предложил новую систему изображения получившую в дальнейшем название «Проекции Федорова» [1]. Проекции Федорова были созданы для более удобного изображения на чертеже геологических и горных объектов. В инженерной практике получил распространение один из частных случаев системы.

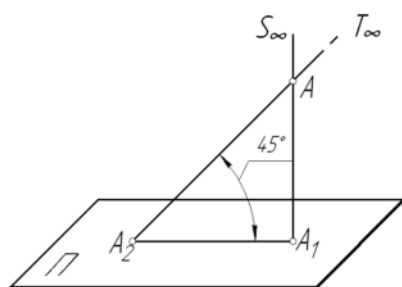


Рис. 1. Частный случай построения проекций Федорова

Рассмотрим образование чертежа, используя этот частный случай.

Даны плоскость проекции  $\Pi$  и два несобственных центра проецирования. Центр  $S_\infty$  сопряжен с плоскостью проекций прямоугольно, центр  $T_\infty$  - косоугольно, причем таким образом, что проецирующие лучи наклонены к  $\Pi$  под углом  $45^\circ$ .

Реконструировать изображенную точку можно, если из проекции  $A_1$  восставить перпендикуляр к плоскости проекций  $\Pi$  и отложить на нем отрезок, равный расстоянию между проекциями  $A_1, A_2$ .

Несмотря на удобство в изображении объектов геологии и горного дела, проекции Федорова не нашли должного применения, т.к. в этой системе отсутствуют методы преобразования чертежа.

Один из таких методов может быть вспомогательное проецирование, в частности прямоугольное [2]. Прямоугольное вспомогательное проецирование применяется для решения метрических задач. Рассмотрим его сущность на схематическом чертеже (рис. 2). На чертеже заданы плоскость проекций  $\Pi$  и две параллельные прямые  $l, m$ . Необходимо определить расстояние между  $l$  и  $m$ .

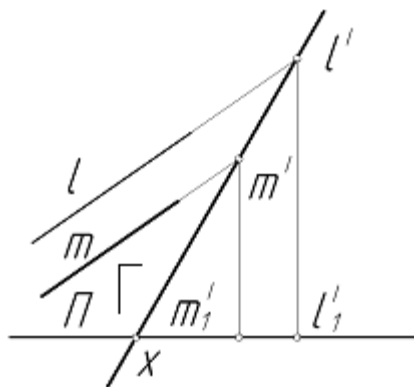


Рис. 2. Определение расстояния между параллельными прямыми

Выбираем в качестве дополнительного проецирования прямые  $l$  и  $m$ . Дополнительную плоскость проекций  $\Gamma$  расположим симметрично относительно дополнительного и основного прямоугольного проецирований. Следовательно плоскость  $\Gamma$  будет биссекторной относительно дополнительного и основного прямоугольного проецирований. Спроецируем  $l$  и  $m$  на  $\Gamma$ . Получим дополнительные проекции  $l'$  и  $m'$ . Спроецировав последние основным прямоугольным проецированием

на  $\Pi$ , построим вспомогательные проекции  $l'_1$  и  $m'_1$ . Расстояние между ними будет искомым. Таким образом, в основе прямоугольного вспомогательного проецирования лежат две задачи – задание плоскости  $\Gamma$  и построение точки пересечения прямой с плоскостью.

Рассмотрим реализацию этой идеи на чертеже. Пусть задана прямая  $AB$  (рис. 3). Примем ее за направление дополнительного проецирования. Построим биссекторную плоскость  $\Gamma$ , проходящую через точку  $B$ . Совместим точку  $B$  с плоскостью  $\Pi$

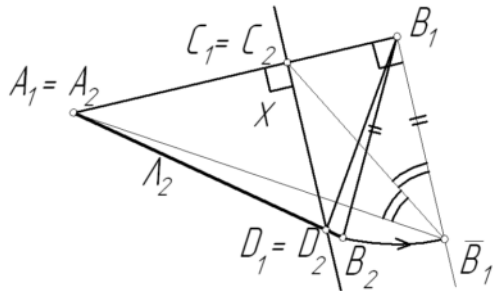


Рис. 3. Диаграмма построения плоскости  $\Gamma$  и носителя

вращением вокруг  $A_1B_1$ . Поскольку угол  $\alpha = 45^\circ$ , то  $B_1\bar{B}_1 = B_1B_2$ . Разделим угол  $A_1\bar{B}_1B_1$  пополам. Линия  $\bar{B}_1C_1$  – совмещенное положение биссектрисы  $BC$  угла  $ABV_1$ . Через точку  $C$  проведем линию  $x \perp A_1B_1$ , которая будет линией пересечения плоскостей  $\Pi$  и  $\Gamma$ . Плоскость  $\Gamma$  задана прямыми  $x$  и  $BC$ .

Покажем построение точки  $V$  пересечения плоскости  $\Gamma$  и прямой  $AB$ . Заклучим прямую  $AB$  косоугольно-проецирующую плоскость  $\Lambda$  ( $\Lambda_2 = A_2B_2$ ). Построим линию пересечения  $DB$  плоскостей  $\Gamma$  и  $\Lambda$ .  $D_2B_2 = A_2B_2$ . Прямоугольная проекция  $D_1B_1$  линии  $DB$  называется носителем вспомогательной проекции  $V_1$  точки пересечения прямой  $AB$  с плоскостью  $\Gamma$ . Чертеж, рассмотренный на рис. 3, назовем диаграммой. На диаграмме осуществляется построение плоскости  $\Gamma$  и носителя  $D_1B_1$ .

В качестве примера рассмотрим решение задачи. Определить натуральную величину двугранного угла  $\alpha$  при ребре  $EF$  (рис. 4).

В свободном месте чертежа строим диаграмму, с помощью которой определяем расположение оси  $x$  и носителя  $D_1B_1$ . Из точек  $E_2, F_2, K_1, L_1$  проводим линии до пересечения с линией  $x$ . Из полученных точек строим линии параллельные  $D_1B_1$  до пересечения с соответствующими линиями, идущими из точек  $E_1, F_1, K_1, L$ . Угол  $E'_1 = F'_1K'_1L'_1$  – искомый.

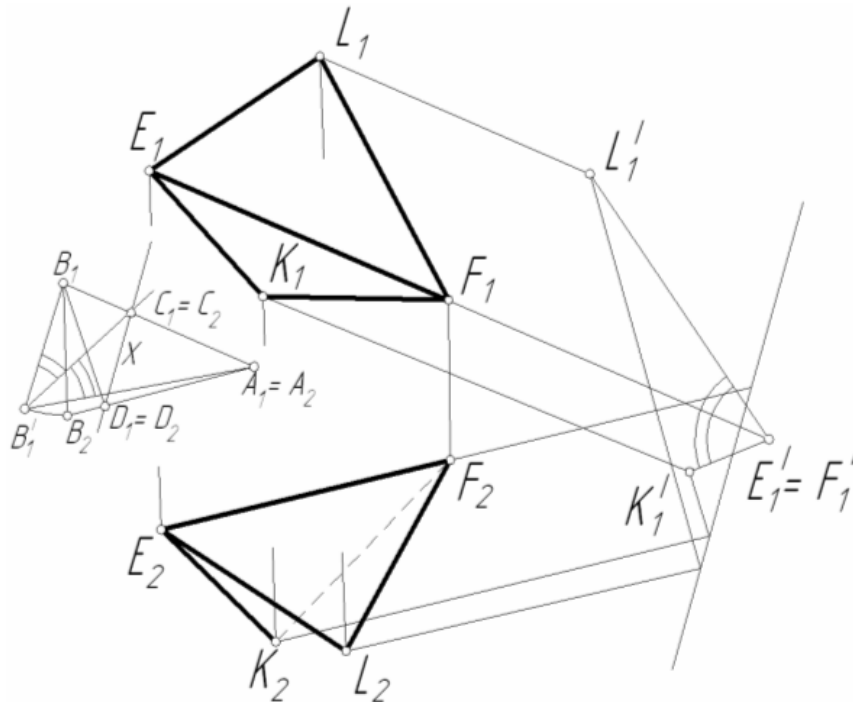


Рис. 4. Определение двугранного угла

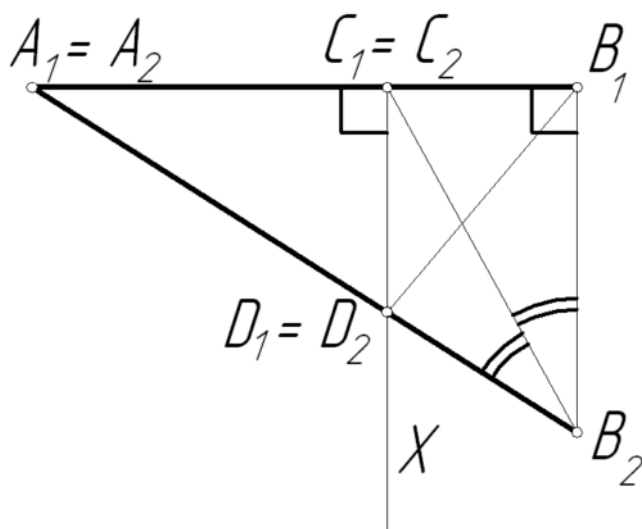


Рис.5. Построение диаграммы  
в частном случае

Возможен случай, когда прямоугольная проекция  $A_1B_1$  луча АВ перпендикулярно линиям связи (рис. 5). В этом случае совмещенное положение  $\bar{B}_1$  точки В совпадет с проекцией  $B_2$ . Тогда ось  $x$  можно построить, проведя биссектрису угла  $A_1B_2B_1$ .

Если проекции луча АВ окажутся параллельными между собою, то совмещенное положение  $\bar{A}_1 \bar{B}_1$  луча АВ будет параллельно  $A_1B_1, A_2B_2$ .

Когда проекции луча АВ параллельны между собой, линии связи будут перпендикулярны им, то диаграмму можно не строить. В этом случае ось  $x$  совпадет с направлением линии связи, а носитель пройдет под углом  $45^\circ$  к

оси  $x$  (рис. 6). Биссекторная плоскость Г будет расположена под углом  $45^\circ$  к плоскости П.

Изложенный метод прямоугольного вспомогательного проецирования для частного случая проекции Федорова, когда проецирующие лучи направлены под углом  $45^\circ$  к плоскости проекции, даст возможность шире использовать упомянутые проекции в геологической и горной практике.

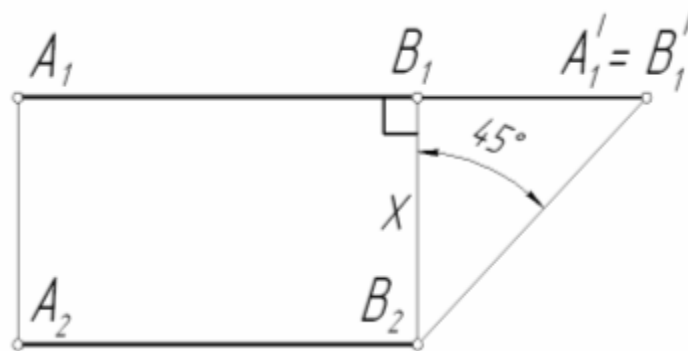


Рис.6. Построение диаграммы, когда проекции прямой параллельны

**Список литературы:** 1. А.Р. Зенгин. Приложение метода Е.С. Федорова к горному делу // Методы начертательной геометрии и ее приложения, 1955. – М.: ГИТТЛ. – 411с. 2. Колотов С.М. Вопросы теории изображений. – К.: Изд-во Киевского университета, 1972. – 162с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКАЕМЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКИ

Крючкова А.В. (каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

*Предложена методика определения температурных напряжений, возникающих после электроконтактной обработки, а также допускаемых напряжений.*

В процессе электроконтактной обработки (ЭКО) в материале заготовки протекают различные физико-химические процессы, при этом наблюдается стремительное изменение температуры в пределах от температуры окружающего воздуха до температуры испарения металла. Причем, чем выше нагрев и чем резче его неравномерность, тем более вероятно появление при нагреве пластических деформаций, а, следовательно, и остаточных напряжений. Возникающие внутренние напряжения уменьшают прочность, следовательно, оказываются достаточными для возникновения трещин.

В настоящее время изучена проблема определения объемных температурных напряжений изучена еще не до конца. Зная места концентрации напряжений и их величину, можно предвидеть, повлияют ли полученные напряжения на работоспособность детали.

С помощью программы ANSYS, основанной на методе конечных элементов (МКЭ), была решена задача определения объемных температурных напряжений, возникающих после ЭКО на примере рабочего колеса шламowego насоса. На основании схожести единичного импульса при ЭКО с электрической дугой при сварке [1], ЭКО рабочего колеса условно была принята как множественный точечный нагрев диска.

Задача была решена за ряд этапов: построение конечно-элементной модели; приложение тепловой нагрузки; расчет температурных полей; считывание температурных полей; расчет температурных напряжений.

В результате решения получена картина распространения температурных напряжений и места их концентрации, рис. 1.

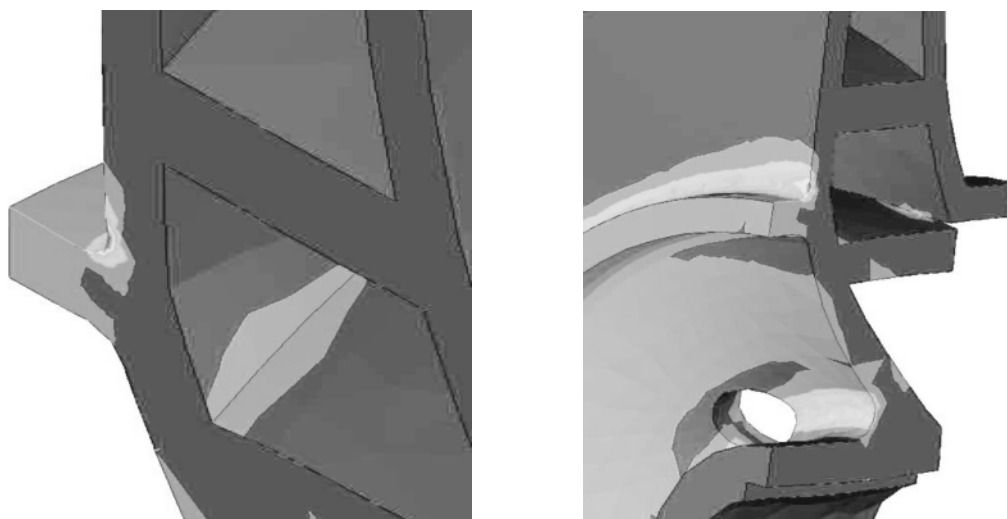


Рис. 1. Места концентрации температурных напряжений

Из приведенного рисунка видно, что максимальные напряжения возникают в местах стыка закрепляемой поверхности с корпусом рабочего колеса, и составляют  $\sigma_{\max} = 0,253 \cdot e^{11} = 15,15 \text{ кПа}$ . Полученные максимальные напряжения значительно ниже допускаемых напряжений (предел прочности - 420 МПа, предел текучести – 250 МПа).

Однако следует учитывать тот факт, что при высоком нагреве свойства материала заметно изменяются. Так, например, у низкоуглеродистой стали марки Ст3 при комнатной температуре предел текучести  $\sigma_T = 250 \text{ МПа}$ . Если ее нагревать выше  $600^\circ\text{C}$ , предел текучести становится по величине близким к нулю. Это значит, что допускаемые напряжения снизятся практически на 100% и незначительные по величине напряжения вызовут пластическую деформацию металла. Металл почти полностью теряет упругие свойства, становится весьма податливым.

Допускаемые напряжения при потере устойчивости [1]:

$$\frac{[\sigma]_{кр}}{\eta \cdot [\sigma]_m} = \frac{1}{B^2},$$

где  $[\sigma]_{кр}$  - допускаемые напряжения,  $[\sigma]_m$  - предел текучести,  $\eta$  - функция кривой «деформация – напряжение»,  $B$  – коэффициент, зависящий от температуры.

$$\eta = \frac{E_s}{E} \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \cdot \left( 1 + 3 \cdot \frac{E_t}{E_s} \right)^{1/2} \right],$$

где  $E$  - модуль упругости,  $E_t$  - переменный модуль упругости,  $E_s$  - приведенный модуль упругости.

Переменный и приведенный модуль упругости [1]:

$$E_s = \frac{E}{1 + \frac{3}{7} \cdot \left( \frac{\sigma}{[\sigma]_m} \right)^{n-1}}, \quad E_t = \frac{E}{1 + \frac{3 \cdot n}{7} \cdot \left( \frac{\sigma}{[\sigma]_m} \right)^{n-1}},$$

где  $n$  – коэффициент формы кривой «деформация – напряжение».

Подставив числовые значения в вышеуказанные формулы, получен ряд значений для переменного и приведенного модуля упругости, по которым найдены величины допускаемых напряжений. Результаты приведены на рис. 2 и 3.

Из графиков видно, что при увеличении напряжений в местах их концентрации снижается величина переменного и приведенного модуля упругости. Это, в свою очередь, влияет на величину допускаемых напряжений. Из рис. 3 видно, что при первоначальном повышении температуры падение напряжений незначительное, однако при превышении  $T=500^\circ\text{C}$  допускаемые напряжения начинают более интенсивно снижаться. Это объясняется тем, что начинается разупрочнение металла.

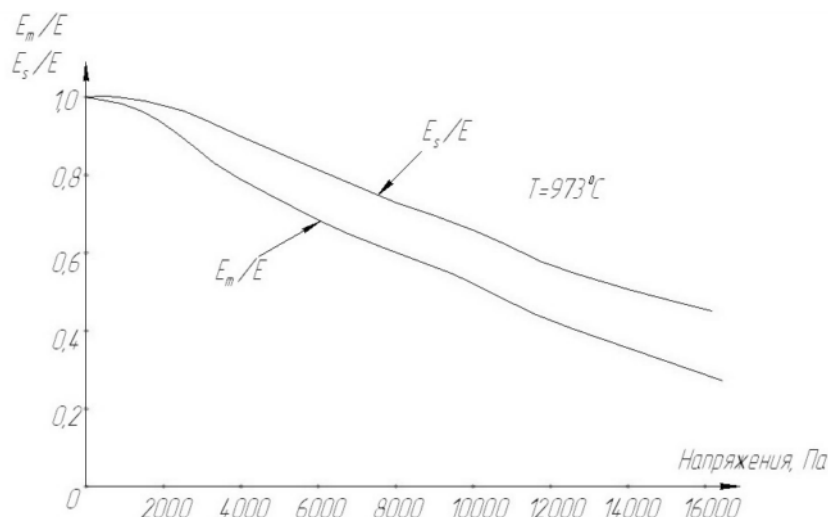


Рис. 2. Переменный модуль упругости  $E_t$  и приведенный модуль упругости  $E_s$  в зависимости от температурных напряжений при ЭКО стали 15Г

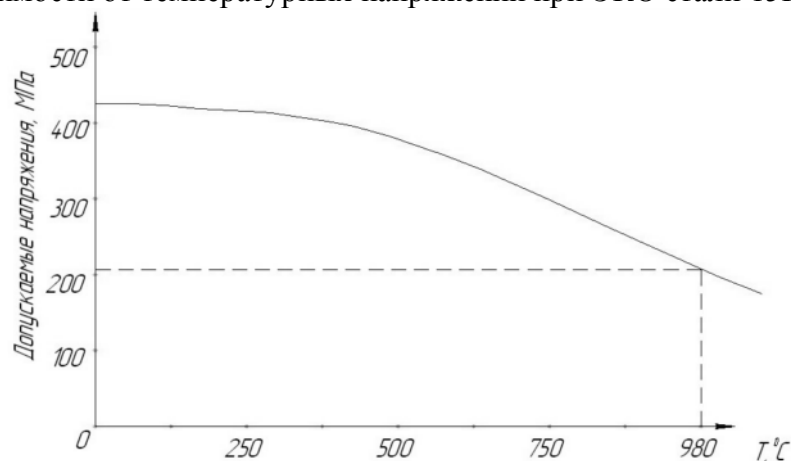


Рис. 3. Изменение допускаемых напряжений в зависимости от температуры после ЭКО стали 15Г

Следовательно, после ЭКО стали 15Г, допускаемые напряжения снизятся приблизительно на 50%.

Данный метод позволяет не только определить возникающие при ЭКО температурные напряжения, но и предвидеть снижение допускаемых напряжений. Это, в свою очередь, позволяет предупреждать их негативное влияние на прочностные характеристики изделия и регулировать величину термических напряжений за счет варьирования режимов обработки.

**Список литературы:** 1. Б. Е. Гейтвуд. Температурные напряжения применительно к самолетам, снарядам, турбинам и ядерным реакторам. Перевод с английского М. Ф. Дименберга, В. К. Житомирского и Ю. Ф. Красонтовича. Под ред. проф., д-ра техн. наук Н. И. Пригоровского. М., 1959. – 350 с. 2. Гохфельд Д. А. Несущая способность конструкций в условиях теплосмен.- М.: «Машиностроение», 1970. – 260 с.



## МАЛЫЕ СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЖИДКОСТИ В ОБЪЕМЕ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ И ИХ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Ломов А.А., Беловодский В.Н. (каф. КСМ, Дон НТУ, г. Донецк, Украина)

В работе исследуются основы динамического расчёта принципиальных схем жидкостных сепараторов (рис.1).

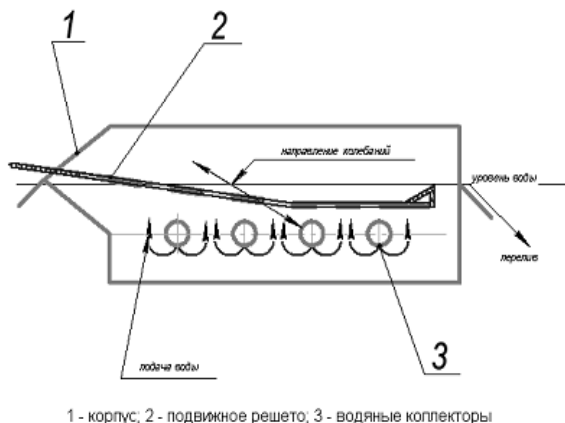


Рис. 1. Принципиальная схема сепаратора.

Сепаратор содержит рабочую ёмкость, выполненную в виде прямоугольного параллелепипеда, заполненного до высоты  $h$  промывающей жидкостью. В ёмкости расположено подвижное решето, совершающее гармонические колебания с заданной амплитудой и частотой. Новые порции жидкости поступают через водяные коллекторы, лишняя ее часть сливается через отверстие в задней стенке ёмкости. Исходный материал подаётся на решето, обрабатывается, промывается и готовый продукт поступает на выход.

Динамический расчёт и оптимизация параметров сепаратора базируется на умении определения параметров движения жидкости на её свободной поверхности и вблизи решета. В качестве одной из начальных задач в этом направлении является отработка методики расчета свободных колебаний идеальной жидкости в частично заполненной ёмкости с прямоугольным сечением по горизонтали.

Задача о свободных колебаниях идеальной несжимаемой жидкости в резервуаре, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда, сводится к решению следующей краевой задачи:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$\left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)_{z=0} = 0 \quad (2)$$

$$\left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_{x=0} = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_{x=a} = 0 \quad (3)$$

$$\left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_{y=0} = \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_{y=b} = 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)_{z=-h} = 0 \quad (5)$$

Функция  $\varphi = \varphi(x, y, z, t)$  есть так называемый механический потенциал поля скоростей жидкости. Физического смысла сам потенциал не имеет, зато его градиент связан с полем скоростей жидкости:

$$\vec{v}(x, y, z, t) = -\vec{\nabla} \varphi(x, y, z, t)$$

Отсюда становится ясен смысл граничных условий (3)-(5). Они просто означают то, что жидкость не просачивается сквозь стенки и дно резервуара. Условие же (2) происходит от того, что поверхность жидкости управляется действием внутрижидкостных сил и силы тяжести.

Уравнение (1) является следствием уравнений Эйлера, описывающих течение идеальной несжимаемой жидкости, если в них ввести потенциал [1].

Геометрическая схема рассматриваемой задачи приведена на рисунке 2:

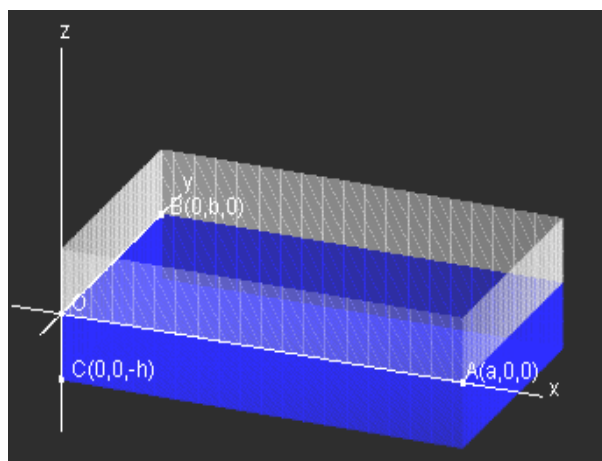


Рис. 2. Геометрическая схема резервуара

Решение краевой задачи (1)-(5) ищется в виде:

$$\varphi(x, y, z, t) = \cos(\omega \cdot t) ch(k \cdot z) f(x, y) \quad (6)$$

Подстановка (6) в (1)-(5) и решение краевой задачи, получающейся для  $f(x, y)$ , приводит нас к окончательному решению задачи (1) - (5):

$$\varphi_{mn}(x, y, z) = \cos(\omega_{mn} t) ch(k_{mn} z) \cos(p_m x) \cos(q_n y), \text{ где:}$$

$$p_m = \frac{\pi m}{a}, \quad q_n = \frac{\pi n}{b}, \quad k_{mn} = \sqrt{(p_m)^2 + (q_n)^2}, \quad \omega_{mn} = k_{mn} g \cdot th(k_{mn} h).$$

Номера  $m$  и  $n$  изменяются в пределах от 1 до  $\infty$ ,  $p_m$  и  $q_n$  - это так называемые волновые числа, соответствующие собственным свободным колебаниям вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$  соответственно,  $k_{mn}$  - это волновое число, соответствующее собственным свободным колебаниям вдоль оси  $Oz$ ,  $\omega_{mn}$  - круговая частота собственных свободных колебаний. Заметим, что мы получили не единственное решение исходной краевой задачи, а счетное двухпараметрическое множество решений.

Разрабатываемая система визуализации должна дать пользователю возможность увидеть потенциал собственных свободных колебаний жидкости для каждого заданного пользователем набора геометрических характеристик резервуара и чисел  $m$  и  $n$ .

Например, при  $n=$  и  $m=$  визуальное представление потенциала имеет вид, приведенный на рисунке 3:

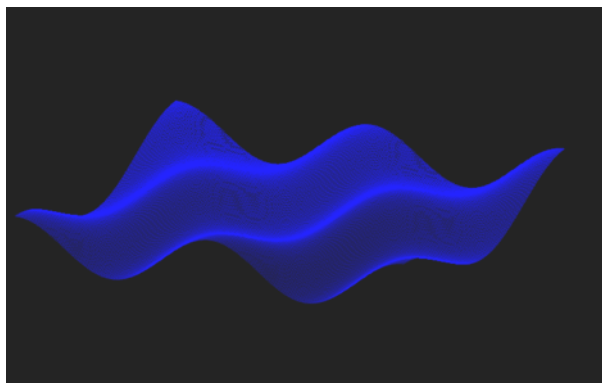


Рис. 3. Визуальное представление потенциала

**Список литературы:** 1. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 736 с. 2. Арнолд К., Гослинг Д., Холмс Д.. М. Язык программирования Java. – М.: Вильямс, 2001. – 624 с. 3. Вязовик Н.А. Основы программирования на Java. - М.: ИНТУИТ, 2003. – 592 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АНОДНОГО ЭЛЕКТРОЛИТНОГО НАГРЕВА

**Мухачева Т.Л.** (каф. общей физики КГУ им. Н. А. Некрасова, г. Кострома, Россия)

**Аннотация.** Предложены математические модели процесса анодного нагрева, позволяющие объяснить падающий характер вольт–амперных характеристик, наличие максимума на вольт–температурных характеристиках, уточнить механизм проводимости анодной парогазовой оболочки.

**Введение.** Анодный электролитный нагрев относится к перспективным методам скоростной электрохимико-термической обработки металлов и сплавов благодаря ускоренному формированию диффузионных слоев и повышенной твердости деталей после закалки. Однако недостаточная изученность механизма нагрева не позволяет обоснованно проектировать технологические режимы упрочнения.

**Постановка задачи.** Работа посвящена созданию математических моделей процесса анодного нагрева (АН) для решения прикладных задач, в частности проектирования технологических режимов обработки деталей. Явление анодного нагрева представляет собой локальное вскипание раствора электролита у поверхности обрабатываемой детали-анода. При этом вокруг анода формируется сплошная и устойчивая парогазовая оболочка (ПГО). Устойчивость образующейся оболочки обусловлена выделением в объеме пара джоулева тепла при прохождении через него электрического тока. Выделение тепла в прианодном слое пара при нагреве цилиндрического анода рассматривается в условиях естественной конвекции [1]. Для определения зависимости геометрических размеров ПГО от режимных параметров анодного нагрева составляется уравнение теплового баланса. При этом тепловым потоком в анод пренебрегается.

**Результаты.** Полученные значения толщины анодной оболочки составляют десятки микрон, что согласуется с принятыми оценками. Данная модель адекватно описывает расширение парогазовой пленки с увеличением напряжения нагрева. Однако такой подход к расчету толщины парогазового слоя приводит к нулевой толщине оболочки в нижней части анода. Иначе говоря, модель предполагает в этом месте практически невероятный контакт электролита с обрабатываемой деталью. Альтернативный метод расчета зависимости толщины ПГО от вертикальной координаты и режимных параметров процесса учитывает наличие вертикального градиента температуры [2]. Для этого находится распределение температуры, как в парогазовом слое, так и в цилиндрическом аноде. При решении уравнения теплопроводности в парогазовой оболочке учитывается, что теплообмен на границе оболочки с анодом осуществляется по закону Ньютона-Рихмана. Расчет для толщины оболочки у основания образца показывает, что эта величина не зависит от управляющих параметров процесса нагрева и определяется только теплофизическими свойствами системы. Зависимость толщины оболочки от вертикальной координаты (рис.1) получена в виде степенного ряда. Следует обратить внимание на даваемый моделью краевой эффект – у верхней части анода происходит сильное уширение парогазового слоя. На практике это связано с перегревом электролита в данной области.

Описанная модель модифицирована на случай анода конечной длины [3]. Рассматривается влияние перераспределения тепла в системе деталь – парогазовая оболочка на вертикальный градиент температуры и находится распределение тепловых потоков в ней. Такая модель позволяет предложить новую методику определения коэффициента теплоотдачи от ПГО в анод. Расчет зависимости коэффициента теплоотдачи от вертикальной координаты и напряжения показывает смену знака коэффициента на определенной высоте анода. Это означает, что в верхней части оболочки тепловой поток направлен из анода в оболочку (рис. 2). Зависимость коэффициента теплоотдачи от напряжения нелинейна и стремится к нулю независимо от вертикальной координаты с ростом напряжения. Средние по высоте значения коэффициента качественно совпадают с измеренными ранее методом регулярного теплового баланса, который дает лишь средние значения определяемой величины и не выявляет его зависимости от напряжения.

Все приведенные выше методики позволяют теоретически рассчитать вольт-температурные характеристики (ВТХ) процесса нагрева. Полученные при этом зависимости температуры образца от приложенного к системе напряжения имеют монотонно возрастающий характер на всем интервале напряжений существования анодного нагрева. Описанные модели не позволяют рассчитать значение максимума температуры анода и соответствующего напряжения. Поэтому предлагается альтернативный метод расчета ВТХ [4], позволяющий объяснить наличие и рассчитать положение на вольт-температурной зависимости максимума температур.

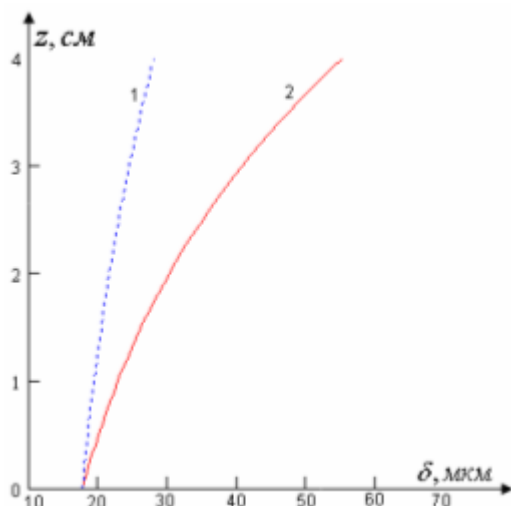


Рис. 1. Профиль анодной парогазовой оболочки при различных значениях напряжения. 1) 100 В, 2) 200 В

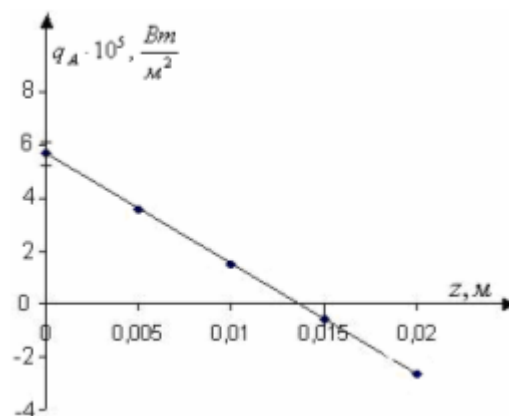


Рис. 2. Плотность теплового потока через боковую поверхность анода на образце длиной 2 см

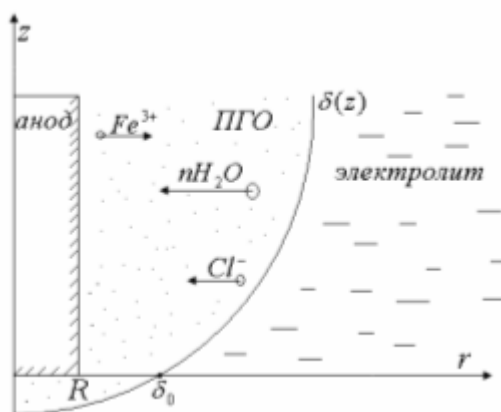


Рис. 3. Схема анодной парогазовой оболочки

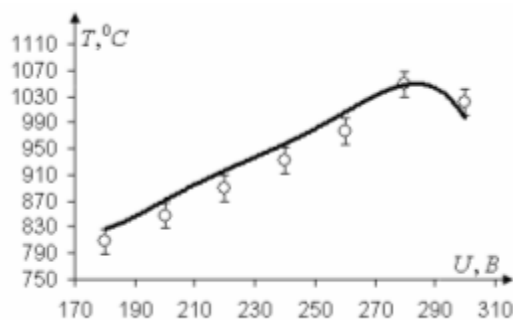


Рис. 4. Модельная ВТХ и экспериментальные точки

Увеличение температуры анода в интервале напряжений 150-260 В является очевидным следствием роста выделения энергии в ПГО. Обратное влияние напряжения на падающей ветви вольт-температурной характеристики можно объяснить следующим образом. В результате растворения материала обрабатываемой детали ионы  $Fe^{(III)}$  (рис. 3), ускоряются в электрическом поле парогазовой оболочки, достигают поверхности раздела оболочка – электролит и выбивают капельки раствора в оболочку. Этим создается дополнительный тепловой поток, расходуемый на испарение эмитированных капель, который снижает поток тепла, поступающий из парогазового слоя в нагреваемый анод. Рассчитанная с помощью данной модели ВТХ представлена на рисунке 4, где теоретическая характеристика качественно и количественно согласуется с экспериментальной.

### Выводы

1. Показано, что расчетный профиль расширяющейся вверх парогазовой оболочки содержит конечную ширину в нижней части анода. Толщина оболочки

составляет десятки микрометров. С увеличением напряжения парогазовый слой расширяется по линейному закону.

2. Предложена методика определения коэффициента теплоотдачи от парогазовой оболочки в анод. Показано, что определение коэффициента теплоотдачи методом регулярного теплового потока дает лишь средние значения определяемой величины, и не выявляет зависимости от напряжения в системе.

3. Показано, что основную роль в формировании вертикального градиента температуры анода играет перераспределение тепла в рассматриваемой системе. С уменьшением длины анода вертикальный градиент температуры больше зависит от теплового потока, рассеиваемого во внешнюю среду. Рассчитано, что доля тепла, поступающего в анод, не превосходит 5 % от общего количества энергии, выделяемой в парогазовой оболочке.

4. Предложен метод расчета полной вольт-температурной характеристики анодного нагрева, учитывающий наличие в парогазовой оболочке эмитированных капелек электролита и позволяющий объяснить наличие и рассчитать положение на вольт-температурной зависимости максимума температур. Установлено, что с увеличением радиуса анода максимум температуры смещается в область более низких напряжений.

5. Показано, что с увеличением напряжения нагрева возрастает доля теплового потока, уносимого из ПГО эмитированными с ее поверхности капельками электролита. Следствием этого является падение температуры анода при напряжениях свыше 260 В.

**Список литературы:** 1. Белкин П.Н., Мухачева Т.Л. Ламинарное движение пленки пара вдоль вертикального цилиндрического анода при его нагреве в водном электролите.//Вестн. КГУ им. Н.А.Некрасова. 2004. № 3. С.4-6. 2. Дьяков И.Г., Мухачева Т.Л. Расчет толщины парогазового слоя при анодном электролитном нагреве.//Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Теплофизика технологических процессов». Рыбинск: РГАТА им. П.А.Соловьева, 2005.-С.130-132. 3. Дьяков И.Г., Мухачева Т.Л. Особенности распределения тепловых потоков в системе анод – парогазовая оболочка при анодном электролитном нагреве. «Гагаринские чтения». М.: «МАТИ»–РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2006. 4. Дьяков И.Г., Мухачева Т.Л. Модель расчета полной вольт-температурной характеристики анодного нагрева малогабаритного образца. Сборник научно – исследовательских работ молодых ученых по программе «Шаг в будущее», Кострома 2006.