

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БРЕСТСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Электронно-механический факультет

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В
МАШИНОСТРОЕНИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ**

**Труды X научно-технической конференции профессорско-
преподавательского состава, аспирантов и студентов**

Часть 1

БРЕСТ 1998

ББК 34.4:32.97

УДК 620:581.3

Новые технологии в машиностроении и вычислительной технике /
Труды X научно-технической конференции профессорско-преподава-
тельского состава, аспирантов и студентов. Под ред. М.В. Голуба. -
Брест: БПИ, 1998, в 2-х частях.

Представлены результаты исследований коллектива авторов в обла-
сти технологии машиностроения, надежности машин, усталости, трения и
изнашивания, механики, физики, вычислительной техники и др.

Сборник предназначен для научных работников, специалистов, инже-
неров, а также для студентов и аспирантов технических ВУЗов.

Рецензент: д.т.н., профессор Спиридонов Н. В.

Редакционно-издательский совет

| | |
|-------------------|---|
| Голуб М.В. | - д.т.н., профессор — ответственный редактор; |
| Кудинов Н.В. | - к.т.н., доцент — председатель; |
| Головко В.А. | - к.т.н., доцент — зам. председателя; |
| Суслов В.А. | - к.т.н., доцент — член редколлегии; |
| Монтик С.В. | - к.т.н., доцент — член редколлегии; |
| Мартиновская О.В. | - ассистент — член редколлегии. |

ББК 34.4:32.97

© Брестский политехнический институт 1998

1 НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ КОЛЕЦ ПАР ТРЕНИЯ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ С ИЗНОСОСТОЙКОЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

ГОЛУБ М.В., ГОЛУБ В.М. (*Брестский политехнический институт*),
ВИТАЛИС ПУЧИНСКИЙ (*Белостокская политехника, Польша*)

Выбор материалов пар трения торцовых уплотнений - сложная и ответственная задача. Имеется ряд рекомендаций авторов / 1,2 /, не весьма удачных, по выбору материалов пар трения в зависимости от свойств уплотняемой среды и условий эксплуатации уплотнений. В настоящее время для изготовления контактных колец широкое применение получают композиционные материалы и покрытия / 3 /, сочетающие в себе хорошие антифрикционные характеристики, высокую теплопроводность, твердость и износостойкость. К таким материалам и покрытиям относятся композиционные материалы, получаемые из разнозернистых порошков карбида вольфрама при их спекании и пропитке медесодержащими сплавами.

Технологические приемы металлокерамического производства позволяют изготавливать материалы из металлических и минералокерамических компонентов, обеспечивая высокую степень взаимодействия и связи между собой на межфазных границах переходов. Получение прочных связей компонентов при спекании и пропитке обеспечивается тесным контактом зерен, их подплавлением при наличии жидкотекучей связи с хорошим смачиванием поверхностей взаимодействия.

Теория жидкофазного спекания изложена в ряде работ, в том числе, М. Ю. Бальшина / 4 /, В.Джонса / 5 /, И.М.Федорченко / 6 /. В основном теория базируется на принципе, по которому принимается, что жидкая фаза полностью смачивает твердую и частично или целиком ее растворяет. При спекании и пропитке твердых зерен преобладают капиллярные процессы. Степень затекания жидкой фазы в поры между твердыми частицами определяется размерами этих пор и возможностью свободного выхода из них газов.

В простейшем случае, когда тело образовано твердыми сферическими

частицами, его пористость, т. е. отношение объема пор к объему всего тела, зависит от способа упаковки частиц. В теории фильтрации такую пористость, составленную из частиц сферической формы, называют фиктивной / 7 / . При кубической упаковке сферических частиц пористость легко определить как

$$m = \frac{d^3 - \frac{\pi d^3}{6}}{d^3} = \left(1 - \frac{\pi}{6}\right) \quad (1)$$

Пористость не зависит от размера частиц. Для кубической упаковки пористость $m = 0,476$. Каждая элементарная пора имеет форму октаэдра, грани которого представляют сферические вогнутые поверхности.

Наиболее плотная упаковка - ромбоэдрическая . Упрощенная модель фиктивной пористой среды может быть представлена элементарной ячейкой - ромбоэдром, в вершинах которого расположены центры восьми соприкасающихся частиц шаров . Пористость такой фиктивной упаковки определяется по формуле

$$m = \left(1 - \frac{\pi \sqrt{2}}{6}\right) \quad (2)$$

Наименьшая пористость в данном случае $m = 0,259$.

Одним из путей уменьшения пористости спрессованного каркаса является применение разнозернистых порошков. Так, если рассматривать кубическую упаковку, то исходя из геометрических размеров сферических частиц большего диаметра d , внутрь элементарной поры может быть помещена частица меньшего диаметра $(\sqrt{3} - 1) d$ и пористость уменьшится.

Реальное пористое тело не всегда имеет частицы строго сферической формы. Конкретно частицы литого карбида вольфрама, применяемые для получения композиционного материала или покрытия, вообще далеки от сферической формы . Макроскопические измерения зерен карбида вольфрама различных фракций позволили установить основные соотношения размеров / табл.1 / .

Таблица 1

| Размерные соотношения | Средний размер зерен, мм | |
|-----------------------|--------------------------|------------------|
| | Фракция до 0,4 мм | Фракция до 01 мм |
| Длина, L | 0,405 | 0,110 |
| Ширина, b | 0,275 | 0,078 |
| Высота, h | 0,240 | 0,068 |
| Отношения, h: b: L | 1,0: 1,14: 1,68 | 1,0: 1,14: 1,61 |

Чтобы применить теоретические предпосылки изложенные выше и как-то оценить пористость реального тела спрессованного из частиц неправильной формы, можно в первом приближении представить их как сферические с эквивалентным диаметром d_i

$$d_i = \frac{l + b + h}{3} \quad (3)$$

а затем при определении пористости тела ввести коэффициент формы K_ϕ , учитывающий несферичность применяемых частиц порошков, тогда пористость можно посчитать, как

$$m_p = K_\phi \cdot m \quad (4)$$

Значение коэффициента формы K_ϕ можно определить как отношение эквивалентного диаметра d_i частицы к диаметру ячейки верхнего сита d фракции. В зависимости от размера фракции, $K_\phi = 0,8...0,9$. Зная пористость спрессованного брикета можно определить необходимый объем пропиточного материала. При этом следует учесть объем занятый введенным пластификатором, составляющим 5...10 % от объема тела. Таким образом, минимальный объем пропиточного материала определится как

$$V = K_\phi \cdot K_n \cdot m, \quad (5)$$

где K_n - коэффициент, учитывающий наличие в шихте пластификатора.

Объем пропиточного материала или, что тоже самое, количество жидкофазного расплава играет важную роль в процессе получения качественного композиционного материала. С изменением жидкотекучей фазы меняется и каркас композиционного материала. При неплотной упаковке твердых зерен они разобщены и вкраплены в матрицу пропиточного сплава. При плотной упаковке отмечается подплавление твердых зерен и срастание между собой с образованием прочного каркаса.

На плотность упаковки оказывает влияние давление прессования.

Прессование способствует тесному контакту частиц. Однако, при высоком давлении прессования возможно образование замкнутых пор, в которые не может проникнуть жидкая фаза пропиточного сплава. Проведены исследования по определению зависимости пористости от давления прессования. Методика предусматривала прессование порошков карбида вольфрама зернистостью 0,10...0,65 мм различным давлением, взвешивание и обмер образцов, пропитку образцов маловязким маслом, взвешивание образцов после пропитки и расчет объема порового пространства. По результатам построен график зависимости пористости образцов от давления прессования / рис.1 /. Отмечено, что уменьшение пористости происходит только в интервале давления прессования до 200 МПа. Однако, если подходить с позиции наилучшего контакта между частицами прессуемого материала, то в большинстве случаев увеличение давления прессования положительно влияет на спекание, во всяком случае в тех пределах, где оно не является причиной образования замкнутых пор.

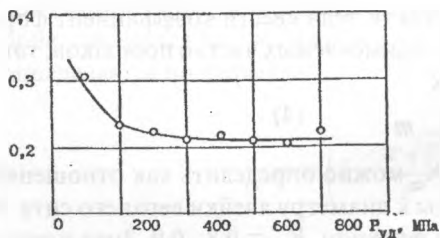


Рис.1. Зависимость пористости от давления прессования.

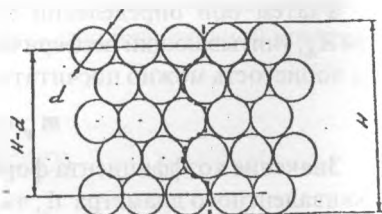


Рис.2. Схема определения длины капилляра.

Среда спекания и пропитки - один из важнейших факторов, влияющих на качество получаемого композиционного материала. Среда служит защитой материала от действия кислорода и водородных паров. Эта защита может быть пассивной /инертный газ/ или активной /водород/. Хорошо очищенный инертный газ снижает парциальное давление кислорода и водяных паров, предохраняет от окисления материал, но не разрушает окисных пленок, которые могут быть на частицах порошка еще до начала спекания. Водород восстанавливает окисные пленки, благодаря чему ускоряет и улучшает спекание и пропитку. Вакуум с одной стороны пассивная защита, поскольку не является восстановителем окисных пленок, а с другой стороны - активная, так как содействует испарению этих пленок и удалению адсорбированных газов и газов из открытых пор.

Время пропитки материала пропиточным расплавом можно определить, используя кинематическое уравнение для продвижения жидкости в капилляре / 8 /

$$h_2 = \frac{\sigma_{ж} \cdot \cos \Theta}{2 \cdot \mu} \cdot r \cdot t \quad (6)$$

где $\sigma_{ж}$ - поверхностное натяжение жидкой фазы; Θ - краевой угол смачивания; μ - вязкость жидкой фазы; r - средний радиус капилляра; t - время пропитки; h - длина капилляра. В первом приближении длину пути прохождения жидкости по капилляру можно определить, приняв модель пористого тела, составленного из сферических частиц / рис.2 /, как

$$h = H + \frac{\pi}{4} (H - d) \quad (7)$$

Таким образом, исходя из (6) можно определить время пропитки, как

$$t = k_1 \cdot k_2 \frac{2 \cdot \mu \left[H + \frac{\pi}{4} (H - d) \right]^2}{r \cdot \sigma_{ж} \cdot \cos \Theta} \quad (8)$$

где k_1 - коэффициент, учитывающий технологические факторы (среда, скорость нагрева и т.д.), $k_1 = 1,05 \dots 1,30$; k_2 - коэффициент увеличения времени, необходимого для выравнивания температуры расплава, $k_2 = 1,05 \dots 1,20$. На практике обычно $t = 15 \dots 20$ мин. Температура пропитки принимается выше температуры плавления пропиточного материала на $50 \dots 100$ °С, но ниже плавления стальной основы контактного кольца.

Технология изготовления колец пар трения торцовых уплотнений с износостойкой рабочей поверхностью из композиционного материала предусматривает: выбор материала и изготовление заготовок колец; приготовление шихты; очистка заготовок и прессование контактного слоя; приготовление пропиточного сплава; спекание и пропитка запрессованного слоя; охлаждение; механическая обработка.

При выборе материала основы колец пар трения необходимо учитывать условия спекания и пропитки контактного слоя. Особенностью изготовления колец пар трения с износостойкой контактной поверхностью является то, что соединяются разнородные материалы, как по химическому составу, так и по физико-механическим свойствам. Эти материалы должны хорошо смачиваться пропиточным расплавом и не вызывать в наплавленном контактном слое остаточных напряжений. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют конструкционные стали аустенит-

ного класса.

Шихту для прессования получают путем смешения исходных компонентов. Для улучшения формуемости шихты при прессовании производится грануляция порошков, которая заключается в образовании временных комочков, состоящих из частиц шихты. Формуемости шихты способствуют вводимые склеивающие и пластифицирующие добавки. Пропиточный сплав получают путем сплавления исходных компонентов. Если в получаемом сплаве должно содержаться больше меди, то расплавляют сначала ее, а затем другие тугоплавкие металлы. Пропиточный материал равномерно накладывается на напрессованный слой. Спекание и пропитка ведется в электроводородных или электровакуумных печах. Охлаждение заготовок ведется с охлаждением печи. Механическая обработка включает токарную, шлифовальную и доводку. Шлифование контактных поверхностей можно производить на плоскошлифовальных или внутрикруглошлифовальных станках с использованием алмазного инструмента. Доводка контактных поверхностей выполняется на плоскопритирочных станках с применением алмазных паст.

Литература

1. Майер Э. Торцовые уплотнения. Перев. с нем. - М.: Машиностроение, 1978, - 288 с.
2. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник. Под ред. А. И. Голубева. - М.: Машиностроение, 1986 - 464 с.
3. М. В. Голуб. Износостойкие композиционные материалы на основе карбида вольфрама, меди и никеля. Эффект безизносности и триботехнологии, 1994, N1, с.24-39.
4. Бальшин М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. - М.: Металлургия, 1972. - 336 с.
5. Джонс В. Основы порошковой металлургии. Прессование и спекание. - М.: Мир, 1965.
6. Федорченко И.М., Пучина Л.И. Композиционные антифрикционные материалы. - Киев: Наукова думка, 1980 - 401 с.
7. Полубаринова - Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. 2-е изд. - М.: Наука, 1977, - 664 с.
8. Современные проблемы порошковой металлургии. Под ред. Федорченко И.М. Киев: Наукова думка, 1970.

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СТАНКА ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

*Акулич А.П., Брестский политехнический институт,
Демиденко Е.Н., Гомельский политехнический институт,
Прибыльский В.И., Институт надежности машин НАНБ*

Магнитно-абразивная обработка осуществляется инструментом, представляющим собой ферро-абразивный порошок, связанный магнитным полем. Естественно, что магнитное поле является определяющим фактором процесса. Управляя величиной и топографией магнитного поля в рабочем зазоре можно управлять процессом обработки.

Для осуществления процесса обработки магнитное поле необходимо передать от его источника до зоны обработки, где полюсные наконечники формируют инструмент и придают ему рабочее движение (вращательное). Проблема заключается в том, что поле в рабочем зазоре должно составлять 0,5...1,2 Тл. Конструктивные особенности магнитных систем определяют сочетания длин и сечений магнитопроводов, которые приводят к большой насыщенности ферромагнитных материалов. В результате, увеличение мощности источника практически не приводит к увеличению поля в рабочем зазоре. Поэтому необходим выбор рационального сочетания всех параметров магнитной системы станка, обеспечивающих заданный процесс обработки изделий.

Для выполнения всех этапов проектирования необходимо рассчитывать магнитное поле, причем с достаточной точностью в любой точке магнитной системы. Принятые в электротехнике методы расчета дают усредненные значения поля и применимы к ненасыщенным ферромагнитным материалам. Поэтому в основе расчета должны лежать фундаментальные уравнения Максвелла. При этом удобно пользоваться скалярным магнитным потенциалом и фиктивными магнитными зарядами.

Для этого магнитное поле раскладывается на вихревую и потенциальную составляющие,

$$H = H_p + H_0,$$

где H - напряженность магнитного поля;

H_p - потенциальная составляющая магнитного поля;

H_0 - вихревая составляющая магнитного поля.

Из уравнений Максвелла для магнитостатики можно получить выражение:

$$\operatorname{div} \mu_a \operatorname{grad} U = -\rho$$

представляющее собой уравнение Пуассона, и

$$\rho = -\operatorname{div} \mu_a H_0;$$

$$\operatorname{rot} H_0 = I,$$

где μ_a - магнитная проницаемость среды;

U - скалярный магнитный потенциал;

ρ - объемная плотность магнитных зарядов;

I - объемная плотность электрического тока

Тогда источник магнитного поля (катушка с электрическим током или постоянный магнит) моделируется простыми и двойным слоями магнитных зарядов. При этом магнитный момент двойного слоя численно равен полному электрическому току, проходящему через сечение катушки. Этой же величине равно и максимальное значение скалярного магнитного потенциала.

Расчет магнитного поля производится методом конечных элементов, позволяющим уравнение Пуассона преобразовать в систему линейных алгебраических уравнений.

Разбиение расчетной области конечными элементами, составление и решение системы уравнений производится на ЭВМ. Авторами использовалась специально разработанная программа. Так как задача расчета магнитного поля не линейна: $\mu_a = f(H)$, то ее решение производится методом итераций. По этой же причине для выбора рациональных параметров магнитной системы невозможно использовать математические методы оптимизации.

Из этого следует, что для решения поставленной задачи необходимо рассчитать ряд конструкций с целенаправленным изменением их параметров. За функцию цели принимается величина магнитного поля в интересующей области зазора между полюсными наконечниками.

Расчетная область, включающая в себя магнитную систему, разбивается на конечные элементы (треугольники) до 1000. Вершины конечных элементов образуют узлы, до 1500. В результате расчетов определяются

значения скалярного магнитного потенциала в каждом узле, магнитного поля и магнитной проницаемости в каждом элементе.

Магнитное сопротивление удобно оценивать по изменению значений потенциала по цепи прохождения поля. В идеальном магнитопроводе потенциал не изменяется, напряженность магнитного поля равна нулю, а магнитная проницаемость бесконечности. Чем больше изменение потенциала на отдельном участке цепи, тем больше напряженность поля и меньше проницаемость среды, следовательно больше сопротивление этого участка и потери энергии.

В начальной стадии проектирования назначаются параметры магнитной системы, исходя из опыта. Производится расчет характеристик магнитного поля и назначается функция цели. По изменению потенциала определяются участки магнитопровода с наибольшим сопротивлением. После анализа конструкции и характеристик магнитного поля производятся изменения параметров магнитной системы: исключаются участки магнитопровода с возможными утечками поля; изменяются длина и площадь сечения участков с большими магнитными сопротивлениями. Цикл расчетов и анализа повторяется до получения удовлетворительных результатов. Обычно для выполнения всех этапов проектирования необходимо произвести 15...20 циклов.

Следует отметить, что изменение параметров магнитной системы процесс субъективный, вследствие ее нелинейности. Оценка конструкции и ее участков производится по количественным характеристикам магнитного поля.

Благодаря этому можно спроектировать оптимальную магнитную систему. Например, для магнитно-абразивной обработки внутренней поверхности с радиусом 30 мм спроектирована магнитная система с диаметром полюсных наконечников 50 мм, внутренним диаметром катушки 32 мм, толщиной катушки 4 мм, высотой 140 мм и плотностью тока 3 А/мм^2 . Конструкция обеспечивает поле в рабочем зазоре 0,452Тл. при отсутствии ферро-абразивного порошка и 0,887 Тл. с порошком.

Практически данная магнитная система имеет габариты и потребляемую мощность на порядок меньше, чем существующие.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА НА ТОЧНОСТЬ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА С ЧПУ

Горбунов В.П., Григорьев В.Ф.

Брестский политехнический институт

В общем балансе погрешностей обработки на МЦС с ЧПУ в связи с возрастающими требованиями к точности обработки большую долю занимают погрешности, которые обусловлены тепловыми деформациями несущей системы станка, приводящие в процессе эксплуатации к изменению относительного положения заготовки и инструмента.

Тепловые деформации металлорежущего станка с ЧПУ характеризуются в общем случае смещениями шпинделя и установленной на столе заготовки в направлениях осей координат X, Y, Z и угловыми поворотами вокруг осей. Их величина, характер и направление действия в значительной степени определяются компоновкой и конструкцией узлов станка и размещением тепловыделяющих элементов относительно базовых деталей станка (например, колонны), а также зависят от качества изготовления и сборки станка, условий его эксплуатации. Основная доля тепла при работе станка выделяется, как правило, в приводе главного движения (приводной двигатель и коробка скоростей) и в узле шпинделя.

Тепловые деформации станков носят нестационарный характер и при непрерывной работе станка изменяются как по величине, так и по направлению, обуславливая постоянное воздействие на формирование показателей качества обработки деталей.

Деформации отдельных деталей станка при их нагреве до избыточной температуры ΔT определяются по зависимости $\Delta L = \beta L \Delta T$, а углы поворота $\alpha = (\beta \Delta T_{\text{н}}) / H$, где L — размер детали, вдоль которого неравномерно изменяется температура, м; $\Delta T_{\text{н}}$ — разность температур противоположных стенок нагреваемой детали, $^{\circ}\text{C}$; β — коэффициент линейного расширения, $1/^{\circ}\text{C}$ [1].

Температура узлов и деталей станка с течением времени изменяется, как показывают многочисленные исследования [2, 3], по экспоненциальному закону $\Delta T = \Delta T_{\text{у}} (1 - e^{-Bt})$, где $\Delta T_{\text{у}}$ — температура установившегося режима; B — температурный фактор, характеризующий скорость роста температуры.

В общем случае величина температурного фактора для различных деталей станков не одинакова и определяется по формуле $B = (\alpha F_{\text{п}}) / (C M_{\text{п}})$,

где α_p , F_p , C_p , M_1 – соответственно коэффициент теплоотдачи, величина площади теплоотдающей поверхности, теплоемкость и масса.

Исходя из этого, величина тепловых деформаций станка будет также изменяться по экспоненциальному закону и определяться по формуле $\Delta L = \Delta L_y (1 - e^{-\beta t})$, где ΔL_y – величина тепловых деформаций при установившемся режиме работы станка.

Расчет температурного поля станка и тепловых деформаций его узлов и деталей является сложной теплотехнической задачей, а в тех случаях, когда она решается, достоверность результатов получается достаточно низкой из-за необходимости принятия многих допущений, а также отличия исходных данных от реальных.

Поэтому для точного определения теплового режима и истинных величин тепловых деформаций во всем диапазоне работы конкретного станка, для подтверждения полученных тем или иным расчетным методом данных, для их уточнения или оценки полученной ошибки проводят многократные экспериментальные исследования. Данные исследования являются достаточно длительными и трудоемкими, и только для одной частоты вращения шпинделя их продолжительность может колебаться от 2 до 10 часов. При исследовании на нескольких частотах вращения шпинделя это время значительно увеличивается из-за необходимости проводить каждый раз длительное охлаждение станка (в течении 12-16 часов). Ниже приведенные исследования проведены по методу ускоренных испытаний [2], который позволяет при применении общедоступных измерительных средств в обычных производственных условиях на основе измерения только начальных данных за очень короткое время определить с необходимой достоверностью характер изменения и величины установившихся тепловых деформаций ΔL_y (или температуры нагрева ΔT_y) на всех возможных режимах работы.

Сущность данного метода заключается в определении границы изменения температурного фактора B и колебания предела установившегося режима ΔL_y по нескольким экспериментальным начальным значениям величин тепловых деформаций. Причем величина ΔL_y может определяться и для нескольких режимов частот вращения шпинделя с фиксацией величин тепловых деформаций не менее чем в трех точках для каждой частоты вращения. По определенным границам изменения параметров B и ΔL_y можно рассчитать любое текущее значение ΔL для соответствующих интервалов времени t .

Экспериментальные исследования влияния теплового режима на точ-

ность положения оси шпинделя проводились на примере многоцелевого станка с ЧПУ модели МС 12-250.

Исходя из предположения термосимметричности данной конструктивной компоновки станка, величины смещений измерялись бесконтактным методом индуктивным преобразователем (ИП) в плоскости YOZ.

Температура фиксировалась термосопротивлениями в точках, показанных на рисунке 1. Точки 1, 2, 4 расположены в местах основных источников тепловыделений в цепи привода главного движения. Датчики 3, 5 регистрировали изменения температуры окружающей среды и масла в гидросистеме станка. Все замеры осуществлялись при помощи измерительного комплекса "Сигнал-1", разработанного институтом надежности машин Академии Наук Республики Беларусь.

Экспериментальные исследования проводились при наиболее характерных частотах вращения шпинделя 1000 мин^{-1} , 1600 мин^{-1} . Положение ползуна (смещение его вдоль координаты Z) принималось исходя из возможного вылета инструмента и среднего положения плоскости обработ-

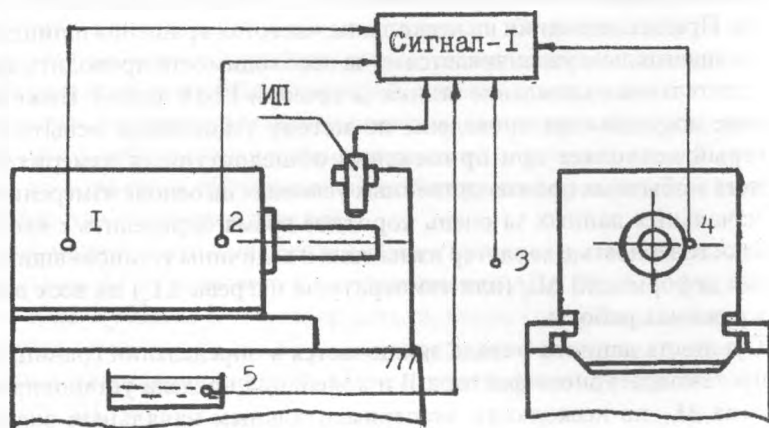


Рисунок 1 – Схема измерения

ки в рабочей зоне станка. На рисунке 2 показаны графики изменения температуры регистрируемых точек.

Неравномерность распределения температуры на стенках шпиндель-

ной бабки, показывает, что положение оси шпинделя относительно плоскости обработки в направлении Y будет меняться. Причем смещения его

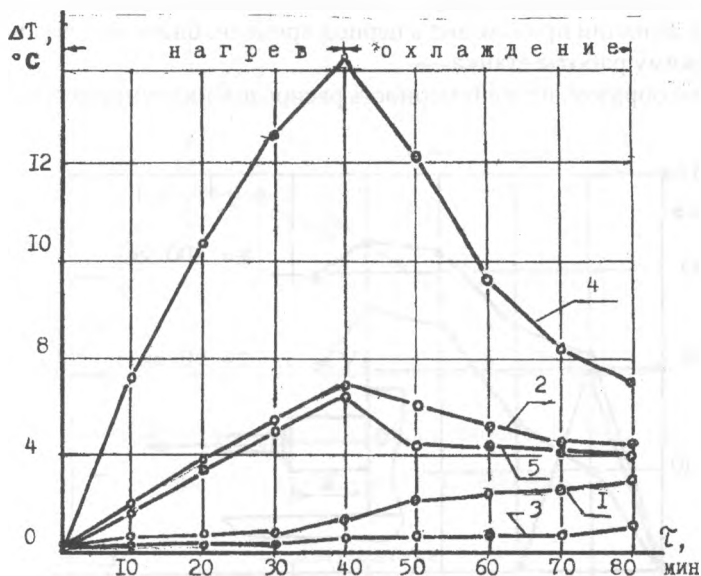


Рисунок 2 – Изменение температуры регистрируемых точек при частоте вращения шпинделя 1000 мин⁻¹

начального положения для одного и того же режима работы в зависимости от вылета ползуна происходят по разным законам (рисунок 3). От классического экспоненциального ($z=50$; 100 мм) до знакопеременного с явно выраженным максимумом ($z=0$). Значения установившихся тепловых деформаций ΔL_y стабилизируются в интервале 30-40 минут времени холостого режима работы станка. Тогда 2-4 текущих значений смещения оси шпинделя будет достаточным для нахождения параметра температурно-го фактора В и функции изменения ΔL .

На рисунке 4 представлены величины смещения шпинделя полученные экспериментально и рассчитанные по выше упомянутой методике. Диапазон максимальных текущих значений смещений оси шпинделя в

плоскости YOZ для рассматриваемых частот вращений будет от 20 до 50 мкм.

Возникающие при этом погрешности между экспериментальными и расчетными значениями будут незначительными, не более 10%. Так, искажение функции происходит в период времени, близкий к установившемуся режиму работы станка.

Таким образом, неравномерность распределения температуры в шпин-

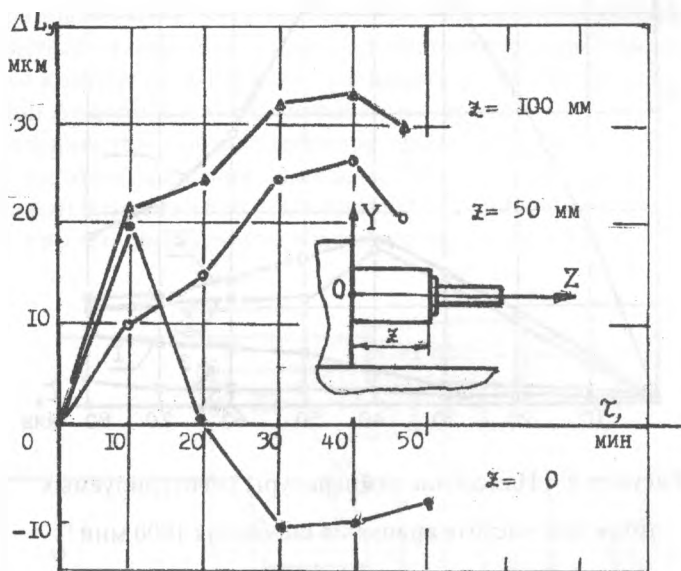


Рисунок 3 – Смещение оси шпинделя в плоскости YOZ при частоте вращения 1000 мин^{-1}

дельной бабке приводит к смещению положения оси шпинделя, что в конечном итоге изменяет его геометрическую точность. Используя расчетные методы оценки тепловых деформаций в сочетании с кратковременными определительными испытаниями позволит не только оценить данное влияние, но и оперативно исправлять их, используя коррекцию в системе управления станка с ЧПУ.

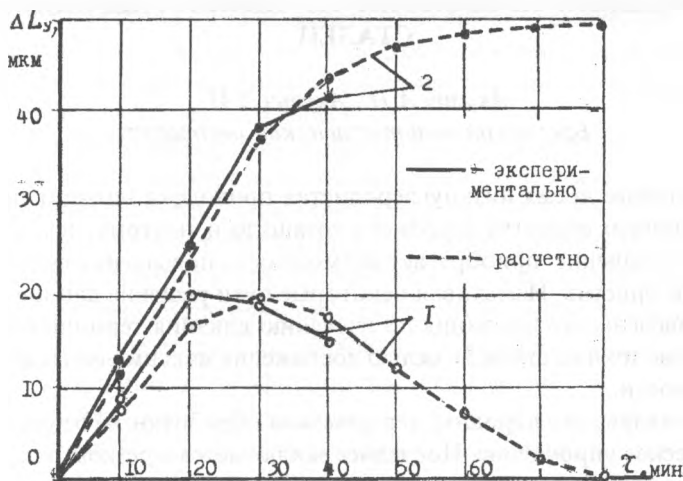


Рисунок 4 – Смещение оси шпинделя в плоскости YOZ при частоте вращения 1000 мин⁻¹ (1), 1600 мин⁻¹ (2)

Литература

1. Соколов Ю.Н. Температурные расчеты в станкостроении. –М: Машиностроение, 1968. 78 с.
2. Стародубов В.С., Кузнецов А.П. Метод ускоренной оценки тепловых контрольных испытаний металлорежущих станков.— В кн.: Ремонт и надежность технологического оборудования.— М.: МДНТП, 1979 , с.87-96.
3. Кузнецов А.П., Горбунов В.П. Оценка влияния теплового режима металлорежущего станка с ЧПУ на точность обработки. — Надежность и контроль качества, 1982, № 2, с.30-37.
4. Проников А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков. -М.: Машиностроение, 1986.

УПРОЧНЕНИЕ ПРОВОЛОКИ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Акулич А. П., Акулич Л. И.

Брестский политехнический институт

В настоящее время низкоуглеродистая проволока находит применение в различных областях народного хозяйства и, поэтому, исключительно важное значение приобретает возможность повышения её прочностных характеристик. Изыскивая некоторые пути решения данной задачи, были проведены исследования по изучению влияния термической обработки проволоки из стали 3 с целью достижения максимальных показателей прочности.

Применялись два варианта термической обработки заготовки: отжиг и термическое упрочнение. Последнее заключается в резком охлаждении стали, нагретой до температур аустенизации. В результате отжига, который производился с температуры нагрева 920°C, были получены следующие исходные данные механических свойств проволоки: $\sigma_{\text{в}} = 380 \text{ Мн/м}^2$; $\sigma_{0,2} = 290 \text{ Мн/м}^2$; $\delta = 37,5\%$; $\psi = 73\%$.

При термической обработке сталь 3 не претерпевает закалку на мартенсит. Даже максимально возможная скорость охлаждения после нагрева стали выше верхней критической точки A_{c3} оказывается недостаточной для мартенситного превращения.

Однако, несмотря на то, что эта сталь не закаливается на мартенсит, исследования показали, что ускоренное охлаждение приводит к значительному повышению прочностных характеристик при сохранении достаточно высокой пластичности.

Из рисунка вытекает, что максимальный прирост прочностных показателей заготовки (содержание углерода 0,12%) относится к области температур термического упрочнения от 900 до 950 °C. В результате резкого охлаждения в воде с 920 °C пределы прочности и текучести исходной заготовки получили наибольшее увеличение и, таким образом, составили соответственно 920 и 870 Мн/м², а характеристики пластичности ψ и δ оказались равными 54 и 12%.

Из сопоставления двух вариантов термической обработки следует, что термическое упрочнение проволоки из стали 3 по сравнению с отжигом, позволяет увеличить $\sigma_{\text{в}}$ почти в 2,5 раза, а $\sigma_{0,2}$ в 3 раза. Изменение механи-

ческих свойств стали 3 в зависимости от режимов термической обработки подтверждается её микроструктурой. В отожженном состоянии структура стали является крупнозернистой и состоит в основном из феррита и незначительного количества перлита.

Термическое упрочнение с температуры нагрева 920 °С обеспечивает преобладание в структуре высокоизмельченного перлита, а также небольшого количества перенасыщенного феррита.

Увеличение скорости охлаждения нагретой до температуры аустенизации низкоуглеродистой стали, приводит к росту количества перлита. При этом в результате достаточно интенсивного охлаждения, количество α' -фазы в структуре сталей, по сравнению с горячекатанным состоянием уменьшается, а иногда α' -фаза полностью исчезает.

В результате резкого охлаждения происходит также сильное измельчение структуры. Образующиеся цементные пластинки состоят не из одного цемента, а представляют собой высокодисперсную феррито-цементитную смесь.

Таким образом, в основе повышения прочности стали 3 при термическом упрочнении лежит понижение температуры превращения аустенита в перлитном интервале после нагрева ее выше критической точки A_{c3} . Между такой обработкой и обычной закалкой имеются принципиальные различия, но в то же время указанная обработка позволяет достичь высоких значений показателей прочности стали.

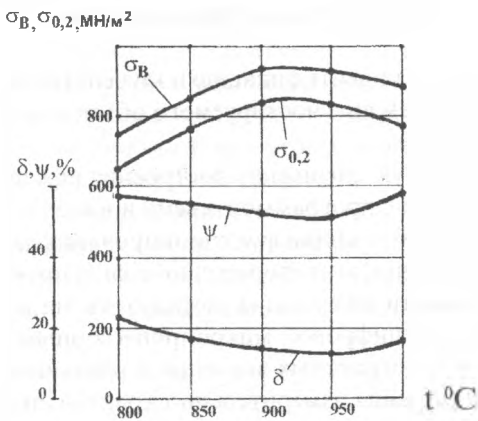


Рис 1

СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ

Басинюк Я.В., ИНДМАШ НАН Беларуси

Эффективность исследований приводных систем с использованием микропроцессорных средств контроля во многом определяется уровнем программной поддержки процесса съема диагностической информации, а также методиками и алгоритмами ее последующей обработки, реализованными в виде пакетов прикладных программ.

Их построение взаимосвязано с объектом исследований, комплексом решаемых при его диагностировании задач и техническими характеристиками используемых при этом микропроцессорных средств [1].

Она включает две группы программ:

первая, обеспечивающая съем, накопление и предварительную обработку диагностических данных, включает программы:

- формирования полуэмпирических моделей поведения системы;
- выбора алгоритма и режимов съема диагностической информации, тарировки и тестирования измерительных трактов, оценки собственных частот, обоснование необходимости использования и параметров фильтрации исходного сигнала;
- предварительной обработки и представление полученных данных в требуемом виде с автоматическим формированием протокола испытаний;

вторая - обеспечивает идентификацию полученных результатов с функциональным состоянием диагностируемого объекта и прогнозирование его изменения в будущем.

Рассмотрим некоторую специфику построения каждой из частей.

Особенность работы с программой съема и накопления информации заключается в учете особенностей функционирования датчиков, снимающих прямую или косвенную информацию о фиксируемых физических процессах, правильности назначения режимов съема и преобразования аналогового сигнала в цифровой микропроцессорным адаптером, корректном переходе от абстрактных значений к реальным данным с оценкой технического состояния измерительных трактов, выявлении и реагировании на возникновение в процессе съема диагностической информа-

ции нештатных ситуаций с принятием решения о достоверности зафиксированных данных.

К одному из наиболее важных элементов этой части программного обеспечения можно отнести статическую и динамическую тарифовку системы, алгоритмы проведения которых во многом определяют корректность полученных результатов.

Особенности формирования второй группы программ заключаются в необходимости корректного перехода от полученных реальных данных к физическим процессам и функциональному состоянию диагностируемого объекта, согласованию по времени данных с различных каналов и оценке полученных результатов с позиций возможности возникновения операторских ошибок при вводе и обработке исходных данных.

Рациональность ее построения в значительной части определяется уровнем знаний о влиянии механической и электрической частей измерительного тракта на частотно-амплитудные параметры фиксируемого на ПЭВМ сигнала, степенью корректности принятых моделей, связывающих контролируемые параметры с функционированием исследуемого объекта. Кроме того при рассматриваемом подходе фиксируются значительные по объему массивы данных, обработка которых вручную практически невозможна. Поэтому корректность построенной на ПЭВМ корреляционной математической зависимости во многом определяется не только режимами съема диагностической информации в процессе тестирования диагностируемого объекта, но и рациональностью выбора алгоритма и математического аппарата для обработки полученных данных.

Эта часть программного обеспечения тесно взаимосвязана с первой. Правильная постановка задачи исследований при ее создании во многом определяет требования к составу и технических характеристикам, а следовательно в конечном случае, стоимости используемых при съеме информации микропроцессорных средств.

В ряде случаев при построении программного обеспечения для диагностирования сложных технических систем весьма эффективными оказывается комплексное применение теорий сигналов, систем и информации, методические подходы к применению которых достаточно полно изложены в работах [2-4].

Изложенные подходы подтвердили достаточно высокую эффективность при разработке программного обеспечения для создаваемых в настоящее время ИНДМАШем НАН Беларуси для ПО МТЗ и МАЗ мик-

ропроцессорных диагностических комплексов, ориентированных на испытания приводных систем автотракторной техники в процессе создания и доводки новых образцов техники.

Литература

1. Создание микропроцессорного комплекса для диагностики технических систем. Часть I./ Берестнев О.В.Басинюк В.Л.Берестнев Я.О.Антюшеня Л.М.: Оперативно-информационные материалы ИНДМАШ НАН Беларуси, Минск, 1997,-60С.
2. E.-G. Woschni, Minimising aliasing errors of sensor with digital output, J.Phys. E.: Sci. Instrum. 20 (1987)
3. E.-G. Woschni, The influence of signal processing to the sampling errors and to the sampling frequency required, Preprints AIM'92,
4. E.-G. Woschni, Some aspects of applying information theory to measurement? Measurement 6(4) (1988) 184-186.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕДАЧ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ НА ОГРАНИЧЕННОМ ЧИСЛЕ ОБРАЗЦОВ

Басинюк В.Л., Берестнев Я.О. ИНДМАШ НАН Беларуси

Испытания передач зацеплением на контактную усталостную прочность относятся к одному из наиболее трудоемких и дорогостоящих процессов, во многом определяющих сроки создания новой или модернизации существующей техники. Как правило их проведение, вследствие большого рассеивания долговечности, осуществляется на значительном числе образцов. Вместе с тем для испытаний на контактную усталостную прочность одной передачи традиционными методами, даже при частотах вращения 1500...3000 об/мин, требуется от 100 до 1000 часов.

К одному из наиболее перспективных путей решения этой проблемы можно отнести реализацию подхода, рассматривающего элемент зацепления как отдельный объект испытаний. При этом в процессе испытаний одновременно фиксируются в реальном масштабе времени действительная нагруженность и толщины смазочных слоев, а после завершения исследований или тестирования испытуемой передачи по заданной программе осуществляется комплексный анализ структурных параметров материала рабочих поверхностей испытуемых объектов. Так, например, при реализации данного подхода в процессе испытаний зубчатой пары с п-

редаточным отношением, равным $u=1$, по результатам исследований одной пары может быть построена кривая усталости [1].

Литература

1. А.с.(СССР) № 1626101. Способ испытаний прямозубых зубчатых колес на контактную усталость зубьев/О.В. Берестнев, В.Л. Басинюк, Н.Н. Ишин и др. Оpubл.в Б.И. 1991, №5.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АКТИВИРОВАННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Белоцерковский М.А., Черепко А.Е. ИНДМАШ НАН РБ, г. Минск

Использование традиционных схем реализации способов газотермического напыления может образовывать покрытия, удовлетворяющие запросам многих ремонтных производств. Однако качественные параметры этих слоёв не всегда адекватны повышенным требованиям к эксплуатационным характеристикам деталей машин, работающих в условиях интенсификации производственных процессов. Это существенно затрудняет более широкое применение данных технологий.

В этих условиях, возможными путями повышения качества и снижения затрат при нанесении покрытий методами газотермического напыления и расширения области их рационального использования являются: создание термораспылительных систем, обеспечивающих формирование высокоскоростных, высокоэнергетических двухфазных потоков; использование доступных и дешёвых энергоносителей и углеводородных топлив для формирования факела термораспылителя; повышение эффективности струйно-абразивной подготовки поверхности за счёт увеличения динамических и теплофизических параметров частиц абразивного материала.

Развитие методов высокоскоростного напыления осуществляется в двух направлениях: разработка систем плазменного сверхзвукового напыления и создание установок сверхзвукового газопламенного напыления.

Нужно отметить, что сверхзвуковое плазменное напыление реализует потоки, обладающие скоростью до 3000 м/с при температуре до 7000К, способные сообщать транспортируемым частицам скорости до 500 м/с. Такая технология позволяет эффективно напылять как относительно легкоплавкие материалы, так и тугоплавкие. При этом пористость покрытий

составляет порядка 0,5...5%, а прочность сцепления - 60...120 МПа.

Сущность процесса сверхзвукового газопламенного напыления заключается в том, что в образованную за счёт сгорания при определённых условиях различных углеводородных топлив высокоэнергетическую струю подают присадочный материал, который может либо формировать покрытия с высокой плотностью и достаточной прочностью сцепления, либо быстро и качественно очищать поверхности от различного рода загрязнений. В первой половине 80-х годов было положено начало интенсивному развитию данной области газотермического напыления и, уже, к настоящему времени накоплен большой опыт совершенствования этого метода, разработано и предложено значительное количество различных типов оборудования для сверхзвукового газопламенного напыления. Аналогичная система создана и в Институте надёжности машин НАН Беларуси.

Принципиальная схема оборудования включает радиальный способ подачи расходного материала в закритическую область сопловой части горелки. Это значительно упрощает внутреннюю конструкцию оборудования, обеспечивает устойчивый процесс сжигания горючей смеси в полости камеры сгорания и значительно снижает эрозионный износ криволинейных поверхностей сопла Ловала. В качестве рабочей используется пропано-воздушная смесь с раздельной подачей компонентов.

Явным преимуществом предлагаемой схемы является простота и универсальность разработанного оборудования. В нём не используется чистый кислород, окислителем служит сжатый воздух, который предварительно проходит через внутренние полости, охлаждая детали конструкции. Отсутствие громоздкой, сложной системы водяного охлаждения позволяет значительно уменьшить размеры и вес горелки, сделав её доступной для работы как в стационарном, так и ручном режиме. Кроме того, установка легко модифицируется в аппарат для струйно-абразивной очистки поверхностей перед напылением, удаления краски и ржавчины с производительностью до 20 м²/ч.

Метод и предлагаемое оборудование сверхзвукового газопламенного напыления способны формировать высокоскоростную струю (свыше 1500 м/с), сообщаящую частицам расходного материала скорость свыше 500 м/с и, тем самым, позволяют наносить покрытия толщиной до 5...6 мм практически со 100%-й плотностью и прочностью сцепления порядка 70...100 МПа. При этом низкая температура сгорания рабочей смеси резко уменьшает окисляющую способность струи, исключает термическое

повреждение напыляемых частиц и вновь сформированных слоёв.

Однако, высокоскоростные пропано-воздушные системы, применяемые в СНГ и дальнем зарубежье, расходуют не менее 3,6 м³/ч пропана и 3 м³/мин сжатого воздуха при давлении 0,4 и 0,6 МПа соответственно. Это делает возможным эксплуатацию таких систем только в условиях крупных промышленных производств, располагающих мощными газораспределительными и компрессорными станциями.

В связи с вышесказанным в ИНДМАШ НАН РБ была рассмотрена идея расширения возможностей традиционного газопламенного напыления и повышения физико-механических свойств получаемых покрытий за счёт оснащения оборудования малогабаритными камерами сгорания, способными производить высокоскоростную струю.

Реализация процесса осуществляется на новой установке газопламенного напыления, содержащей реактивный активатор, обеспечивающий дополнительный нагрев и ускорение частиц, летящих в основном факеле термораспылителя.

Основным элементом активатора является малогабаритная камера, способная формировать высокоскоростной поток продуктов сгорания пропано-воздушной смеси, который фокусируется в зоне достижения частицами напыляемого материала максимальной температуры от основного факела. Первичный факел образуется в результате горения рабочей смеси газопламенного распылителя «Терко», на сопловой части которого монтируется реактивный активатор.

Одним из преимуществ предлагаемой конструкции является использование для охлаждения рабочих поверхностей реактивного устройства сжатого воздуха, часть которого затем отводится в приемный коллектор камеры сгорания. Это позволяет улучшить условия воспламенения горючей смеси и повысить температуру пропано-воздушного пламени. Использование многосопловой керамической вставки внутри камеры в совокупности с воздушным регенеративным охлаждением обуславливает небольшие габаритные размеры активатора. При помощи специально предусмотренного регулировочного крана, ограничивающего подачу воздуха на смесеобразование, можно создавать либо окислительную, либо восстановительную атмосферу вторичного пламени.

Предполагается, что такая модернизация оборудования для газопламенного порошкового напыления позволит существенно повысить скорость частиц наносимого материала и получить высокоплотные покрытия (пористость 2...5%), имеющие прочность сцепления с основой вдвое

выше, чем при традиционной схеме.

Нужно отметить, что выбор метода восстановления деталей машин зависит от многих факторов, но при возможности получения близких по свойствам покрытий различными способами, критерием выбора становится экономический фактор. А наиболее дешёвыми как по стоимости оборудования, так и по затратам на реализацию процесса является газопламенное напыление. Кроме того, эта технология характеризуется применением простых и мобильных установок, а также возможностью осуществления процесса в полевых условиях.

РАСЧЁТ ПРОЧНОСТИ ВАЛОВ ДИСКОВЫХ БИОФИЛЬТРОВ-ОТСТОЙНИКОВ (ДБФО)

Медведев О.А., Кочемаров Д.В.

Брестский политехнический институт

ДБФО состоит из круглой ванны с вертикальной осью, вокруг которой вращаются радиально расположенные валы с тонкими виниловыми дисками, наполовину погруженными в очищаемую воду. Валы с дисками также вращаются вокруг своих осей. Коническое дно ванны предполагает равномерное увеличение диаметров дисков от оси ванны к периферии. Разные диаметры и скорости движения дисков влекут за собой разные значения гидравлического сопротивления на каждом диске. Поэтому, расчётная схема вала включает следующие силовые нагрузки, распределённые неравномерно вдоль его оси:

- 1) крутящий момент, распределённый по закону параболы четвёртой степени от гидродинамического сопротивления вращающихся дисков;
- 2) поперечную силу гидродинамического сопротивления движению дисков, распределённую по закону параболы четвёртой степени в горизонтальной плоскости;
- 3) поперечную силу от веса дисков с биомассой распределённую по закону квадратичной параболы в вертикальной плоскости.

Отсутствие в справочной литературе методик инженерных расчётов валов на прочность и жёсткость при указанных нагрузках вызывает трудности при проектировании ДБФО. Распространённая практика замены реальной нагрузки на равномерную с той же равнодействующей приводит к погрешностям определения изгибающих моментов и координат опасных сечений, что недопустимо при расчёте таких крупных объектов, как

ДБФО.

На основе данной схемы нагружения, основных положений гидродинамики, сопротивления материалов, интегрального исчисления, приближенных методов решения нелинейных уравнений разработана методика расчёта крутящих и изгибающих моментов на валах, координат экстремальных сечений, величин прогибов, углов поворотов сечений.

Наибольшую трудоёмкость имеет расчёт координат сечений максимальных прогибов, так как он сводится к решению нелинейных уравнений пятой степени. Определение корней таких уравнений выполняется приближённо численными методами.

Применение разработанной методики позволит повысить точность расчётов и надёжность ДБФО.

ДИАГНОСТИКА ЗУБЧАТЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ

*Жук И. В., Монтик С. В., Шурин А. Б., Мирошниченко И. А., Драган А. В.
ИНДМАШ НАН Беларуси, Брестский политехнический институт*

Постоянное совершенствование и усложнение техники (автомобилей, тракторов, станков и т.п.) требует и усовершенствования систем контроля качества их изготовления и оценки технического состояния как машины в целом, так и их отдельных узлов и деталей. Для решения данных задач в последнее время особенно перспективным стало направление, базирующееся на методах безразборного контроля с использованием последних достижений в области компьютерной техники. Компьютерная диагностика обладает значительными преимуществами по сравнению с практикуемыми сейчас методами контроля. Она позволяет осуществлять непрерывную, периодическую и оперативную оценку технического состояния отдельных узлов и деталей без нарушения целостности контролируемого механизма и без прекращения его эксплуатации. Этот метод контроля не нарушает приработку деталей и узлов изделия, позволяет значительно сократить материальные и временные затраты. Кроме того, по данным систематического контроля состояния объекта можно составить прогноз о возможности дальнейшей эксплуатации машины.

Зубчатые передачи являются неотъемлемой и наиболее ответственной

частью конструкций большинства современных машин и механизмов. Поэтому выход их из строя делает невозможной эксплуатацию всей машины на длительное время. Лишь наличие в любой момент времени объективной информации о состоянии зубчатых передач позволит исключить у них аварийные отказы и тем самым до минимума свести затраты по обслуживанию механических приводов.

Одним из средств безразборного контроля технического состояния и диагностики зубчатых приводных механизмов является контрольно-диагностический комплекс (КДК), разработанный в ИНДМАШ НАН Беларуси [1]. В основу КДК положен принцип совместного контроля и анализа параметров вибрационной нагруженности и кинематической погрешности исследуемых приводов. Наличие дополнительной информации в виде кинематической погрешности, являющейся комплексным показателем дефектов изготовления, монтажа и эксплуатации зубчатых передач, позволяет повысить достоверность выявления различных дефектов зубчатых передач.

Комплекс представляет собой совокупность выполненных на современной элементной базе аппаратных средств и мощной ПЭВМ, объединенных программной системой, работающей в среде WINDOWS 95.

Комплекс может использоваться как при стендовых, так и при натуральных исследованиях объектов различной степени сложности, имеющих до восьми ступеней зубчатых передач. КДК может работать с импульсными и аналоговыми датчиками.

В качестве импульсных датчиков в КДК используются фотоэлектрические преобразователи угловых перемещений, которые позволяют производить контроль кинематической погрешности исследуемого зубчатого механизма.

В качестве аналоговых датчиков в комплексе используются датчики виброускорений (виброскорости, виброперемещений).

Для управления работой КДК, обеспечения процесса обработки и анализа получаемой информации, расширения функциональных возможностей КДК разработаны специальные программные средства (ПС), которые позволяют организовывать и хранить базы данных контролируемых параметров тестируемых механизмов, проводить их обработку и анализ, выявлять и формировать диагностические признаки различных повреждений и точностных дефектов зубчатых передач, получать протокол-заключение о состоянии объекта и возможности его дальнейшей эксплуатации на основании сравнения текущей и эталонной информации [2].

При диагностике может использоваться как упрощенный, так и углубленный метод (см. рис. 1). При упрощенном методе определяется величина накопленной кинематической погрешности для любого вала контролируемого объекта и (или) общий уровень вибраций в контролируемой точке. На основании сравнения полученной и “эталонной” информации дается заключение о работоспособности механизма.

При углубленном методе проводятся различные виды обработки и анализа частотных спектров кинематической погрешности и вибросигнала. Сравнение полученной информации с “эталонными” данными позволяет выявить в элементах конструкции уже появившиеся или зарождающиеся дефекты, места их расположения и причины, оценить их серьезность и возможные последствия, принять обоснованное решение о возможности дальнейшей эксплуатации механизма. Идентификация того или другого вида дефекта производится путем сопоставления результатов обработки текущей информации с информацией из специального каталога образцов дефектов, хранящихся в памяти ПЭВМ.

Наличие базы данных позволяет автоматизировать процесс контроля за состоянием объекта и обеспечивает безбумажную технологию хранения и использования полученной информации. Система открыта для дальнейшего совершенствования.

В случае появления у исследователя необходимости проверки качественных и количественных характеристик исследуемых передач или же, исходя из результатов исследований, необходима корректировка геометрии зубчатых зацеплений в ПС имеется специальная программа расчета и оптимизации геометрических параметров цилиндрических эвольвентных зубчатых передач с возможностью вариации параметрами исходного контура.

В процессе расчетов проводится проверка на отсутствие интерференции, подрезания и заострения зубьев по величинам удельного давления и скольжения в передаче. В зависимости от степени точности и вида сопряжения для зубчатых колес передач автоматически определяются допуски на показатели норм кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев и бокового зазора.

При необходимости возможна оптимизация геометрических параметров передачи из условия обеспечения наибольшего значения коэффициента перекрытия при соблюдении других ограничений. Результаты оптимизации представляются графически в виде номограмм, что позволяет конструктору выбрать нужные значения.



Рис. 1. Укрупненная блок-схема диагностики технического состояния зубчатых приводных механизмов
 ----- углубленная диагностика
 ————— упрощенная диагностика

После выполнения геометрического расчета зубчатой передачи в программе предусмотрена возможность провести прочностной расчет передачи.

Данная программа имеет удобный пользовательский интерфейс и не требует специальных навыков работы.

Разработанный КДК и программное обеспечение будет полезен специалистам, занимающимся конструированием, расчетом, изготовлением, испытаниями, доводкой и изысканием путей улучшения технических характеристик зубчатых передач, а также обслуживанием машин и механизмов с зубчатыми приводами.

Литература

1. Берестнев О.В., Жук И. В. и др. Создание микропроцессорного комплекса для диагностирования технических систем. // Оперативно-информационные материалы. ч. II. - Мн.: ИНДМАШ АНБ, 1996. - 64 с.
2. Жук И.В., Монтик С.В., Шурин А.Б. и др. Программные средства автоматизированной системы контроля технического состояния зубчатых приводных механизмов. // Надежность и безопасность технических систем: Тезисы докладов межд. науч. техн. конф. - Мн.: Белоргстанкинпромиздат. 1997. - С.92-94.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ТОРЦОВОГО САЛЬНИКОВОГО УПЛОТНЕНИЯ ДЛЯ ВАЛОВ НАСОСОВ

*Голуб М.В., Хоронжевский Ю.А.
Брестский политехнический институт*

Одной из важнейших проблем уплотнительной техники является герметизация гидросистем. Критерием надежности гидросистем является величина утечки. При использовании насосов, перекачивающих жидкую среду, возникает проблема использования уплотнения выхода вала из корпуса насоса, обеспечивающего надежность гидросистем. В качестве уплотнения используются торцовые уплотнения (ТУ). Но большим недостатком ТУ является то, что при выходе из строя пары трения для замены износившихся элементов необходима полная разборка насоса, что является дорогостоящей операцией.

Другим направлением в реализации концепции быстросменного кольца пары трения является использование в качестве элемента пары трения

сальниковой набивки, т.е. конструкции торцового сальникового уплотнения (ТСУ). Известен ряд конструкций таких уплотнений, в которых торцовая пара трения образуется из аксиально-подвижной грунд-буксы и жестко фиксированной на валу ответной детали. Известны конструкции, разработанные фирмой Stape Packing (Англия), фирмой «Гидромаш-Герм» (Москва, Россия). Наиболее естественным решением проектирования сальниковых уплотнений, является размещение кольца сальниковой набивки в замкнутом объеме для создания эффекта трехосного напряженного состояния. Вторым вопросом является обеспечение герметичности стыка кольца набивки.

Разработана конструкция торцового сальникового уплотнения (рис. 1). В корпусе 1 расположен стакан 2, внутри которого перемещается подвижная обойма 3, образуя карман для сальниковой набивки 4, которая плотно контактирует с торцом вращающейся контактной втулки 5 и создает

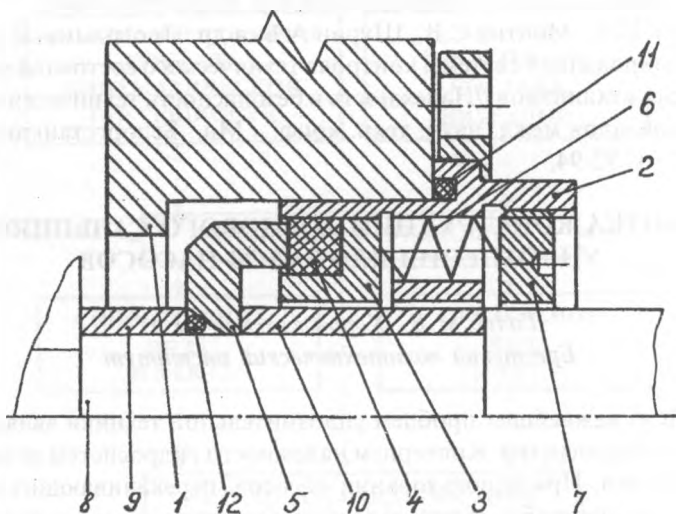


Рис.1. Торцовое сальниковое уплотнение

герметичный стык, под действием пружин 6, поджимаемых гайкой 7. Выход вала из корпуса насоса герметизируется стыком сальниковой набивки 4 и торца вращающейся контактной втулки 5, зафиксированной на валу упорной втулкой 9 и защитной втулкой 10. Герметичность соединения

корпуса 1 и стакана 2 обеспечивается уплотнительным элементом 11, а вращающейся контактной втулки 5 с валом 8 уплотнительным элементом 12.

Торец вращающейся контактной втулки 5 покрывается твердым сплавом, с целью предотвращения износа при трении с сальниковой набивкой 4 и попадающими абразивными частицами из жидкой среды в полость стыка. В качестве сальниковой набивки можно применять стандартные набивки: АФ-1, АФТ, АГ.

Замена сальниковой набивки не требует полной разборки насоса, конструкция торцового сальникового уплотнения обеспечивает удобство смены набивки.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ЭТОМ НЕКОТОРЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ

*Кочергин А.И., Беляева Г.И., Дыновский А.С., Дыновский Н.С.
Белорусская государственная политехническая академия*

Были продолжены начатые ранее работы по исследованию обрабатываемости сталей.

Необходимость разработки научно-исследовательской темы вызвана нестабильной стойкостью инструментального материала при обработке шарикоподшипниковой стали ШХ15СГ, стали 38ХМЮА и др. при отсутствии необходимого объема информации в справочной литературе о структуре и составе данных сталей по неоднородности и нестабильности трооститно-сорбитной смеси. Все вышеперечисленное составляет научно-техническую проблему, которая является актуальной с точки зрения экономической эффективности обработки данных сталей.

Объектами исследования являлись образцы стали ШХ15СГ (45 шт.) и стали 38ХМЮА (45 шт.), прошедшие термообработку по специальному плану.

Метод исследования - точение образцов проходными резцами, оснащенными твердым сплавом Т15К6, на токарно-винторезном станке модели 16К20 с последующим изучением образцов на профилографе-профилометре модели 252 по стандартной методике. Полученные результаты обрабатывались на ПЭВМ.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании возможности определения показателей обрабатываемости материалов методами неразрушающего контроля. Это позволило бы без разрушения образцов с той или иной мерой точности определить спектр их свойств и вследствие этого сделать заключение о их поведении в различных условиях обработки. Последнее предоставило бы возможность назначить оптимальную схему резания, геометрические параметры инструмента, марку инструментального материала, установить пределы области рациональной эксплуатации инструмента и оптимальных режимов резания. Вследствие этого возросла бы стойкость инструмента, увеличилась бы производительность и снизилась трудоемкость обработки.

Исследуемые образцы названных сталей имели размеры: наружный диаметр $D = 50$ мм; внутренний диаметр $d = 10$ мм; длина $L = 150$ мм.

Образцы стали ШХ15СГ нагревались под закалку до температуры 840°C , выдерживались при этой температуре 60 минут и охлаждались в масле, нагретом до 50°C . Отпуск закаленных и охлажденных до 20°C образцов производился в масляной ванне при температурах T , равных 150, 200 и 250°C в течение времени t , равного 2; 2,5 и 3 часам. В результате была получена структура мартенсита с мелкими включениями карбидов. Твердость образцов в зависимости от режимов термообработки составляла $\text{HRC}_\Sigma = 58...62$. Часть образцов подвергалась изотермическому отжигу при температурах 700, 750 и 800°C с выдержкой в течение 1; 1,5 и 2 часов.

Таким образом, термическая обработка стали ШХ15СГ проводилась на пятнадцати различных режимах. На этих же режимах были термообработаны образцы в виде шайб из этой же стали для последующего исследования микроструктуры и физико-механических свойств. Образцы стали 38ХМЮА подвергались нормализации на следующих режимах: температура нагрева - 900, 950, 1000°C , время выдержки - 40, 50, 60 мин. После этого образцы имели структуру перлита с содержанием феррита от 2,13 до 80,2%. Твердость колебалась в пределах $\text{HB} = 143...198$. На этих же режимах обрабатывались и шайбы для исследования микроструктуры и физико-механических свойств.

Шероховатость поверхности образцов из сталей ШХ15СГ и 38ХМЮА определялась после продольного точения резцами с механическим креплением пластинок Т15К6 (Р20) без применения охлаждающей жидкости. Скорость резания для закаленной стали ШХ15СГ $v = 18,8$ м/мин, глубина резания $t = 0,3$ мм, подача $s = 0,07$ мм/об и $0,14$ мм/об, для стали ШХ15СГ,

прошедшей закалку и изотермический отжиг, $v=95$ м/мин, глубина резания $t=1$ мм, подача $s = 0,07$ мм/об и $0,47$ мм/об. Аналогичные режимы были приняты для стали 38ХМЮА.

Параметры шероховатости R_a и t_p определялись на профилографе-профилометре 252 по стандартной методике.

Оценивалось влияние на шероховатость поверхности как на один из показателей обрабатываемости, различных видов термообработки и полученных при этом физико-механических свойств: микротвердости, процентного содержания структурных составляющих, в частности феррита, в стали 38ХМЮА, поверхностной плотности материала ρ , пористости материала Π , градиента остаточного магнитного поля CH . Микротвердость структурных составляющих определялась на микротвердомере "MICROMET-II" при нагрузке 25 г. и увеличении в 400 раз. Общая пористость и объем фаз исследовались с помощью автоматического анализатора изображений "Квантимер - 720". Поверхностная плотность определялась методом рентгеновской рефлектометрии, который основан на измерении отражательной способности веществ в рентгеновском диапазоне волн и использующий явление полного внешнего отражения рентгеновских лучей. Градиент остаточного магнитного поля исследовался на приборе "АНБ-606М". В результате проведенных исследований получены регрессионные зависимости по линейной модели, позволяющие судить о степени влияния указанных характеристик материала на шероховатость поверхности. Был произведен анализ следующих зависимостей: $R_a=f(T, t)$, $R_a=f(T, t, HRC)$, $R_a=f(HRC, CH)$, $R_a=f(t, CH)$, $R_a=f(T, CH)$, $t_p=f(T, t)$, $t_p=f(T, t, HRC)$, $t_p=f(HRC, CH)$, $t_p=f(t, CH)$, $t_p=f(T, CH)$.

Для оценки тесноты корреляционной связи проанализированы коэффициенты множественной корреляции, которые имели наибольшее значение для следующих зависимостей при обработке стали ШХ15СГ. Наибольшее значение коэффициента множественной корреляции R при обработке стали ШХ15СГ было у следующих зависимостей:

$$R_a=f(T, t), R=0,7880$$

$$R_a=f(HRC, CH), R=0,7869$$

$$R_a=f(t, CH), R=0,7813$$

$$R_a=f(T, CH), R=0,7645.$$

При исследовании зависимостей стали 38ХМЮА наибольший коэффициент множественной корреляции наблюдался для:

$$R_a=f(T, t, HB), R=0,4089;$$

$$t_p=f(T, t, HB), R=0,4813.$$

Как видно из приведенных исследований, наибольшей информативностью при оценке обрабатываемости сталей обладают режимы термообработки и следующие физико-механические свойства материалов (в порядке убывания степени влияния): температура и время выдержки, твердость, градиент остаточного магнитного поля, процентное содержание структурных составляющих, поверхностная плотность материала, пористость материала и т.д.

Таким образом, имеет смысл проводить исследования обрабатываемости материалов на основе методов неразрушающего контроля, основанных на определении градиента остаточного магнитного поля, твердости, пористости, поверхностной плотности материала и процентного содержания фаз.

ГИДРОАБРАЗИВНАЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.

Ялковский Н. С.

Брестский политехнический институт,

Особенности гидроабразивного изнашивания газотермических покрытий из керамических материалов еще недостаточно изучены, хотя покрытия данного типа широко применяются для защиты деталей машин и механизмов, работающих в гидроабразивных средах.

Исследовались свойства плазменного покрытия из механической смеси оксидов алюминия и титана (86 % Al_2O_3 + 14 % TiO_2). Покрытие толщиной 0,3...0,4 мм. наносили на установке плазменного напыления УПУ-3. В качестве исходных материалов использовались порошки зернистостью 40 мкм. Плазмообразующий газ - азот. Для увеличения адгезионной прочности применяли подслои из алюминид никеля ($AlNi$) толщиной до 0,1 мм. Напыленное покрытие имело пористость 8% и микротвердость 11000 МПа..

Исследование гидроабразивной износостойкости проводилось в нейтральной среде на установке роторного типа с вращающимися образцами. Поверхность образца подвергается абразивному воздействию имела площадь 12 см². Величина износа определялась весовым методом. Полученные результаты сравнивались с износом стали 40, принятой в качестве эталона.

Наибольший интерес представляет влияние на абразивное изнашивание факторов, которые могут привести к инверсии (изменению) ряда износостойкости. К числу последних относят: угол взаимодействия абразивного потока с поверхностью изнашиваемого материала и коэффициент твердости, являющийся отношением твердости абразива к твердости изнашиваемого материала ($K_T = H_A / H_M$).

Такие факторы, как скорость гидроабразивного потока, размер абразивных зерен, концентрация твердых частиц в потоке в процессе испытаний поддерживались на постоянном уровне соответственно 52 м/мин., 0,315...0,4 мм и 30...35 %.

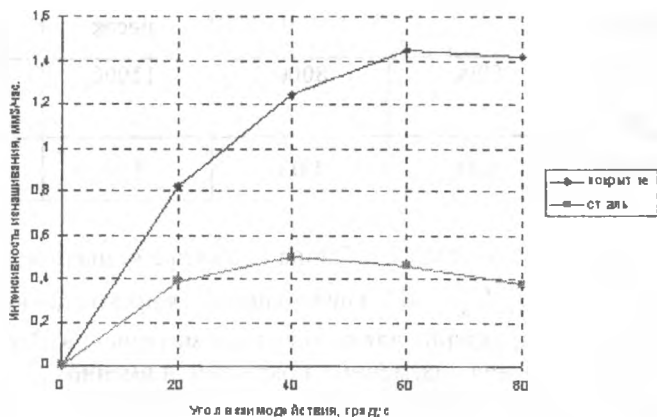


Рисунок 1 - Зависимость интенсивности объемного изнашивания плазменного покрытия и стали от угла взаимодействия абразивного потока и образца.

Максимальная интенсивность изнашивания керамического покрытия имеет место при больших углах взаимодействия абразивного потока и изнашиваемого образца (60°...80°), когда процессы разрушения, происходящие в покрытии, имеют много общего с разрушением в условиях ударного воздействия абразива. При малых углах, когда воздействие аб-

разивного потока аналогично изнашиванию при трении скольжения по абразиву, износ минимален. При этом, с увеличением угла от 20 до 60° интенсивность изнашивания возрастает в 1,8 раз. Указанная особенность характерна и для большинства других хрупких материалов.

Относительная износостойкость покрытия незначительна и в соответствии с результатами, представленными на рисунке 1, изменяется от 0,27 при угле 80° до 0,48 при угле взаимодействия 20°.

Таблица 1 - Зависимость объемного износа покрытия (I) от твердости абразива. Угол взаимодействия потока и абразива 40°

| Абразивный материал | мрамор | гранит | кварцевый песок | электрокорунд |
|---------------------------|--------|--------|-----------------|---------------|
| твердость, МПа | 5000 | 8000 | 11000 | 18000 |
| I, (мм ³ /час) | 0,84 | 1,03 | 1,16 | 1,24 |

Как свидетельствуют данные таблицы 1 даже при незначительной твердости абразива ($H_A/H_M < 0,5$) не наблюдается прекращения процесса изнашивания, что характерно для компактных материалов. Это связано с особенностями строения плазменных покрытий, а именно:

1. Значительным уровнем остаточных напряжений в материале покрытия. Последние связаны с высокой интенсивностью его формирования.

2. Наличием в покрытии большого числа пор, которые уменьшают прочность материала и служат концентраторами напряжений при разрушении.

3. Недостаточной когезионной прочностью покрытия. Это связано с тем что при формировании покрытия между его частицами успевает пройти только химическое взаимодействие

Как свидетельствуют полученные результаты покрытия, данного типа не могут использоваться для эффективной защиты в условиях гидроабразивного изнашивания.

Многочисленные сообщения об их применении, по видимому, отно-

ся к случаю абразивного изнашивания в агрессивных средах, когда помимо абразивного воздействия имеет место интенсивное разупрочняющее воздействие среды. В этом случае плазменные керамические покрытия в силу своей высокой химической стойкости действительно эффективны.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА КМ-1

Кудрицкий Я.В.

Брестский политехнический институт

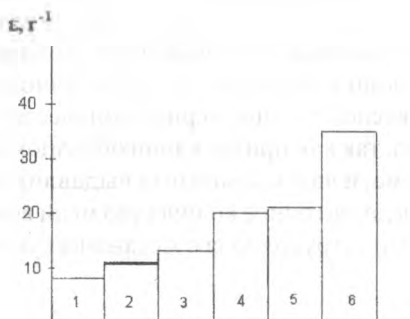
Испытанию на трение и износ подвергались пальчиковые образцы, полученные прессованием и спеканием под флюсом композиции на основе меди, хрома, никеля и разномерных порошков карбида вольфрама [1]. Испытания проводились по специально разработанной методике [2]. В ходе эксперимента выявлено, что чрезмерное количество меди в составе композита нежелательно, так как при спекании образцов наблюдался значительный рост их объема, и часть композита выдавливалась за пределы пресс-формы. Однако, недостаточное количество меди вело к повышению хрупкости композита, что затрудняло его механическую обработку.

Таблица 1

| Пара трения | Материал контртела | Смазочный материал | Удельное нагружение контакта, МПа | Скорость скольжения, м/с | Кэфф. трения, f |
|-------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Диск-палец | Композит WC-Cu-Ni | Вода тех. | 0,8 | 2,3 | 0,18 |
| | | Диз.топливо | 0,8 | 2,3 | 0,12 |
| | | Масло АУ | 0,8 | 2,3 | 0,027 |
| | | Без смазки | 0,8 | 2,3 | 0,46 |

Полученные результаты эксперимента позволили оптимизировать компонентный состав материала КМ-1. На рис. 1 приведена диаграмма относительной износостойкости различных материалов, построенная по экспериментальным данным. Испытания проводились при скорости скольжения, изменявшейся за цикл от 2 до 7 м/с. Нагрузка на поверхности контакта составляла 0,5 МПа. Время одного испытания составляло 30 с. В качестве контртела использовался абразивный круг. Величина износа оценивалась по потере массы на аналитических весах.

Испытания опытных образцов по металлическим поверхностям производились с подачей в зону трения различных смазочных жидкостей. Было отмечено, что материал КМ-1 при определенных нагрузках способен работать в режиме избирательного переноса. При этом, на поверхности контртела оставалась тонкая пленка, в составе которой обнаружена медь.



На рисунке 1 приняты обозначения: 1 — для стали 30, HRC 40; 2 — для стали 45, HRC 40; 3 — для стали U10A, HRC 62; 4 — для наплавки T590, HRC 62; 5 — для стали P18, HRC 62; 6 — для композиционного материала КМ-1.

Рис. 1

Результаты испытаний при трении по металлическим поверхностям приведены в таблице 1.

Литература

1. Кудрицкий Я.В., Голуб М.В., Пучинский В. Разработка износостойких композиционных материалов на основе разнозернистых порошков карбидов металлов. Сборник тезисов Второй Американско-Восточно-Европейской Конференции НМТТ-97, с. 202-203, 1997.

2. Кудрицкий Я.В. Методика испытания материалов на абразивное изнашивание. Сборник материалов научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, с. 39-40, 1997.

ВЛИЯНИЕ ПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ СТАЛИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Крайко С.Э.

Белорусская Государственная Политехническая Академия

Эффективность использования лазерного излучения в процессе закалки определяется коэффициентом поглощения инфракрасного излучения поверхностью. Величина коэффициента поглощения излучения металлами составляет всего 5...10 %, поэтому процесс закалки чистой металлической поверхности в производственных условиях не применяется. Для повышения коэффициента поглощения известно несколько типов покрытий. Так чернение в растворе хлорного железа [1] повышает глубину закалки на 20...30 % по сравнению с исходной механической обработкой. Покрытие из сульфида железа [2] увеличивает коэффициент поглощения нержавеющей стали до 40 %. Наибольшее распространение в промышленности получило фосфатирование [2...4], которое увеличивает коэффициент поглощения до 60 %, а более сложное химическое чернение [5] путем погружения в кипящий при 124...165° раствор гидроокиси нитрата или нитрита щелочных металлов с добавлением фенолтиомочевины повышает коэффициент поглощения до 65 %. К основным недостаткам химических покрытий можно отнести низкую лучевую стойкость, когда при интенсивном излучении они разрушаются, что ведет к резкому падению коэффициента поглощения.

Наиболее перспективным видом поглощающих покрытий являются покрытия в виде краски [6,7], которую можно наносить кистью, краскораспылителем и др. Сравнительный анализ процесса закалки при фосфатном покрытии красками с сажистыми пигментами и красками наполнителем из окислов металлов (гуашь), а также образцов без покрытия показывает, что при малых мощностях глубина закалки при фосфатном покрытии в 2 раза превышает глубину закалки без покрытия, краска типа гуашь

дает глубину на 10 % меньше по сравнению с фосфатным покрытием, а черные краски содержащие сажу, не имеют преимущества перед образцами без покрытия. Практика показала, что с гуашами как с покрытиями в производственных условиях работать удобнее, они более технологичны, чем химические.

Известны и другие способы повышения поглощающей способности металлов, такие, например, как увеличение шероховатости облучаемой поверхности [2].

Приведенные выше способы подготовки поверхностей детально разработаны в основном для непрерывного излучения с длиной волны 10,6 мкм в инфракрасной области спектра. Значительно меньше внимания уделено области применения поглощающих покрытий на увеличение зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) при импульсном излучении с длиной волны 1,06 мкм.

В данной работе исследовали эффективность применения покрытий различного состава при облучении импульсным излучением. Поглощательную способность покрытий оценивали по глубине ЗЛВ, которую исследовали с помощью металлографического анализа.

Изучали четыре группы образцов. Первая содержала окисную пленку, образованную воздействием ортофосфорной кислоты. Вторая группа содержала покрытия из желтой гуаши с добавлением клея ПВА для улучшения адгезии с металлом. Третья группа образцов имела комплексное покрытие, совмещающее в себе покрытия двух первых групп, состоящее из окисной пленки ортофосфорной кислоты и пленки краски с наполнителем из оксида металла. В четвертой группе, для сравнения получаемых результатов, покрытия отсутствовали. Образцы размером 30x20x10 изготавливали из термически обработанной стали X12M. Облучение производили на установке "Квант-18М" при мощности излучения $W_p = 8,4 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$. Исследования микротвердости производили на установке ПМТ-3.

Сравнительная оценка металлографического исследования и промеров микротвердости образцов показала, что при равных условиях облучения наибольшая поглощательная способность свойственна комплексному покрытию. Оно характеризуется относительно большей глубиной ЗЛВ $h = 0,40 \dots 0,45$ мм и микротвердостью $H_{100} = 10\ 000 \dots 11\ 000$ МПа. Это, вероятно, обусловлено лучшей адгезией пленки желтой гуаши с металлом, предварительно обработанной ортофосфорной кислотой (увеличивается

смачиваемость поверхности в сравнении с исходной). У других групп образцов значения глубины и микротвердости соответственно были: для желтой гуаши глубина ЗЛВ $h=0,25... 0,30$ мм при $H_{100} = 8000...8500$ МПа, для окисной пленки ортофосфорной кислоты $h=0,20...0,25$ мм при $H_{100} = 8\ 000...8\ 200$ МПа. На образцах без покрытия значительных изменений микротвердости не наблюдалось.

Также было установлено, что при увеличении толщины пленки из желтой гуаши комплексного покрытия, при неизменной плотности мощности излучения, наблюдается снижение глубины ЗЛВ и микротвердости. При обратном процессе наблюдается оплавление поверхности, что нежелательно.

При наличии предварительного подогрева образцов ЗЛВ увеличиваются на 20...25 %.

Таким образом было установлено, что наибольшая эффективность в условиях лазерной термообработки импульсным излучением стали Х12М без оплавления поверхности достигнута применением комплексного покрытия, состоящего из окисной пленки ортофосфорной кислоты и пленки краски с наполнителем из окисла металла.

Литература

1. Рыжов Э.В., Тютюнников В.И., Бюдов В.Т., Горленко О.А., ФИХОМ, 1983, №1, с.20
2. Коваленко В.С., Упрочнение деталей лучом лазера., Киев, Техника, 1981.
3. Архипов В.С., Виргер Е.М., Грегин А.И., Технология автомобилестроения, 1980, №5, с. 24.
4. Андрияхин В.М., Зверев С.В., Чеканова Н.Т., Автомобильная промышленность, 1980, №6, с.28.
5. Патент США №4313771 Заявлен 29.02.80., Оpubл. Б.И. в СССР и за рубежом, 1982, вып. 65, №11.
6. Голубев П.П., Гурченко П.С., Кабакович М.В., Корунчиков А.И., Автомобильная промышленность, 1982, №11, с.27.
7. Андрияхин В.М., Чеканова Н.Т., Поверхность, 1983, №2, с.145.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ ЛИТЕЙНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ
ГАЗО-ТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Ермолаев М.А.

Брестский политехнический институт

Сендзимир Александр

Краковский институт литья

Представленная работа была продолжением научных контактов между нашими институтами, возникших в 1994 году на международной научно-технической конференции в Краковском институте литья. Ещё в 80-х годах технология изготовления кокилей и другой литейной оснастки с использованием плазменного напыления и металлизации разрабатывалась в Краковском институте. Анализ результатов этих работ, а также дискуссия участников конференции по докладу, представленному Брестским политехническим институтом показали, большие потенциальные возможности этой технологии. Было указано на необходимость продолжения этих работ, поскольку появление новых материалов и технологического оборудования раскрывают новые перспективы такого метода.

В 1996 году были проведены совместные эксперименты для проверки возможности реализации технологических предложений Брестского политехнического института в условия Краковского института литья.

Основными этапами технологии являются следующие:

- изготовление керамической мастер-модели кокиля;
- напыление на мастер-модель порошковой металлической корки;
- создание жёсткой основы кокиля;
- выбивка и очистка.

Керамическая мастер-модель изготавливалась методом шоу-процесса из огеливаемой суспензии на основе этил силиката. При этом суспензия 3 заливалась в кокиль - оригинал 1, заключённый в опалубку 2 (рис. 1). После отверждения суспензии мастер-модель вынимается, из неё выжигаются летучие компоненты, затем следует просушка в печи.

Главной технологической задачей на этапе создания керамической мастер-модели является обеспечение её достаточной жёсткости, прочности на изгиб и растяжение, так как при напылении на поверхность модели порошковой корки в последней возникают существенные растягивающие

напряжения, которые способны как оторвать поверхностные слои керамики от модели, так и разрушить всю модель, изгибая её. С другой сторо-

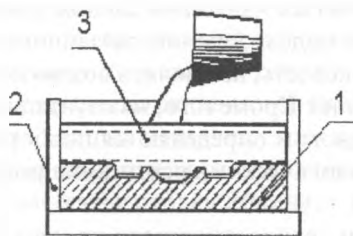


Рис.1. Заливка огеливаемой суспензии в кокиль-оригинал.

ны, важно обеспечить необходимую точность мастер-модели, поскольку от этого в конечном итоге зависит точность изготавливаемой оснастки, а также получить минимальную шероховатость рабочей поверхности.

Газопламенное напыление порошковой корки 2 на керамическую ма-

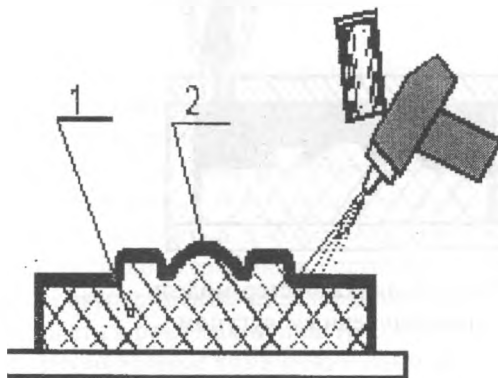


Рис. 2. Напыление порошковой корки на мастер-модель

стер-модель 1 производилось пистолетом модели МОГУЛ-У9 (Рис. 2). Толщина корки составляла 1-2 мм. Для создания рабочего слоя корки использовались различные порошки на хромоникелевой основе. Промежуточный слой напылялся порошком из сплава на основе меди. На этом этапе необходимо: добиться нанесения равномерного порошкового слоя на поверхность мастер-модели, прочно, связанного с основой; обеспечить его минимальную пористость; исключить возникновение чрезмерных растягивающих напряжений. Кроме того, эксплуатационные характеристики готового кокиля во многом определяются подбором качества напыляемого порошка и технологическими режимами процесса газо-термического напыления.

Важнейшим этапом технологического процесса является заделка порошковой корки в жёсткую основу. Для этого мастер-модель с напылённой коркой помещалась в литейную форму, нагревалась в печи, а затем

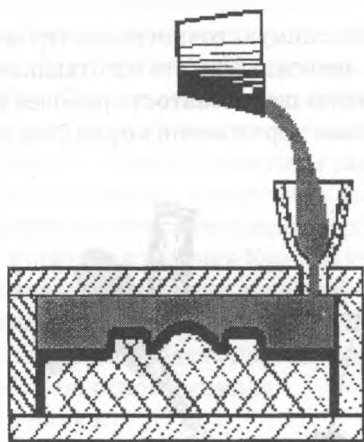


Рис.3. Заливка мастер-модели расплавленным чугуном

заливалась расплавленным чугуном (Рис. 3). Главной задачей этого этапа технологического процесса является обеспечение прочной связи порошковой корки с затвердевшим чугуном, являющимся жёсткой основой кокиля. Наилучшими условиями предварительного нагрева формы, заливки расплавленного чугуна и его затвердевания были бы такие, при кото-

рых расплавленный чугун, попадая на корку, частично расплавлял её поверхностные слои, смешивался с расплавленным материалом корки и пропитывал её пористую структуру. С другой стороны, если даже поверхность корки не подплавляется, но достигается её хорошая смачиваемость чугуном, прочная связь с основой будет обеспечена. Ещё одним решением этой проблемы является нанесение на поверхность кокиля промежуточного слоя из легкоплавкого металла, который хорошо смачивает материал корки и вместе с тем легко сплавляется с расплавленным чугуном. В наших экспериментах мы пошли именно этим путём.

Далее, после охлаждения отливки следует выбивка, очистка и обрубка. В результате получается заготовка кокиля, у которого его рабочую

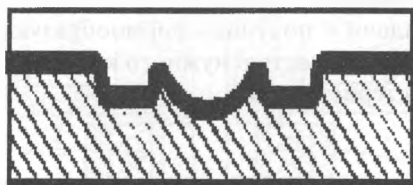


Рис.4. Кокиль с фасонной облицованной рабочей поверхностью

формообразующую поверхность в дальнейшем не обрабатывают. При необходимости её нужно лишь отполировать. Дальнейшей механической обработке подвергаются только поверхности разёма, габариты и присоединительные элементы. Очистка рабочей поверхности кокиля не должна производиться механическим способом, поскольку в этом случае её можно повредить и увеличить шероховатость. Наилучшие результаты даёт выщелачивание остатков керамики в растворе едкой щёлочи.

Проведённые эксперименты подтвердили то, что предлагаемая технология весьма проста в реализации и не требует больших затрат финансовых ресурсов. Необходимые химические компоненты не являются дефицитными материалами и широко используются в литейном производстве. Разнообразные по химическим составам и физическим свойствам металлические порошки, выпускаемые европейской промышленностью, позволяют задавать нужные для конкретных условий эксплуатационные характеристики рабочего слоя формообразующих поверхностей литейной

оснастки.

Вместе с тем, анализ хода проведения экспериментов, металлографические исследования полученных образцов показывают, что рабочие режимы операций на каждом этапе технологического процесса, применяемое технологическое оборудование оказывают очень большое влияние на конечные результаты. Установлено, что напыление порошковой корки газопламенным пистолетом не позволяет получить удовлетворительного качества покрытия. Значительная пористость корки приводит к тому, что даже при хорошей связи с чугуновой основой происходит расслоение самой корки. Поэтому, чтобы исключить это, нужно применять плазменное напыление порошка, которое благодаря более высоким температурам и скоростям полёта частиц, обеспечивает значительно более плотную структуру напылённого слоя. Тщательный подбор и оптимизация режимных параметров на всех этапах процесса позволяет решить поставленные технологические задачи и получить формообразующую оснастку с облицованной рабочей поверхностью нужного качества с заданными эксплуатационными характеристиками.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУР УПЛОТНЯЕМОЙ СРЕДЫ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

*Голуб М. В., Голуб В. М., Шаповал Ф. И.
Брестский политехнический институт*

Проблемы надежности и долговечности насосного оборудования в настоящее время являются очень актуальными. Одной из причин, приводящих насосы с применяемыми в них торцовыми уплотнениями к отказу, а также к увеличению утечек из него является изнашивание контактных колец уплотнения вследствие трения.

В отличие от разработанных ранее установок для испытания триботехнических свойств пар трения, где испытывались лишь образцы материалов этих пар, в разработанной экспериментальной установке оценка антифрикционных свойств происходит при испытании торцового уплотнения целиком, в натуральную величину.

Установка состоит из блока-стенда и блока контрольно-измерительных приборов. Стенд (рисунок 1) состоит из испытательной головки 2, в которую устанавливается испытываемое торцовое уплотнение с контакт-

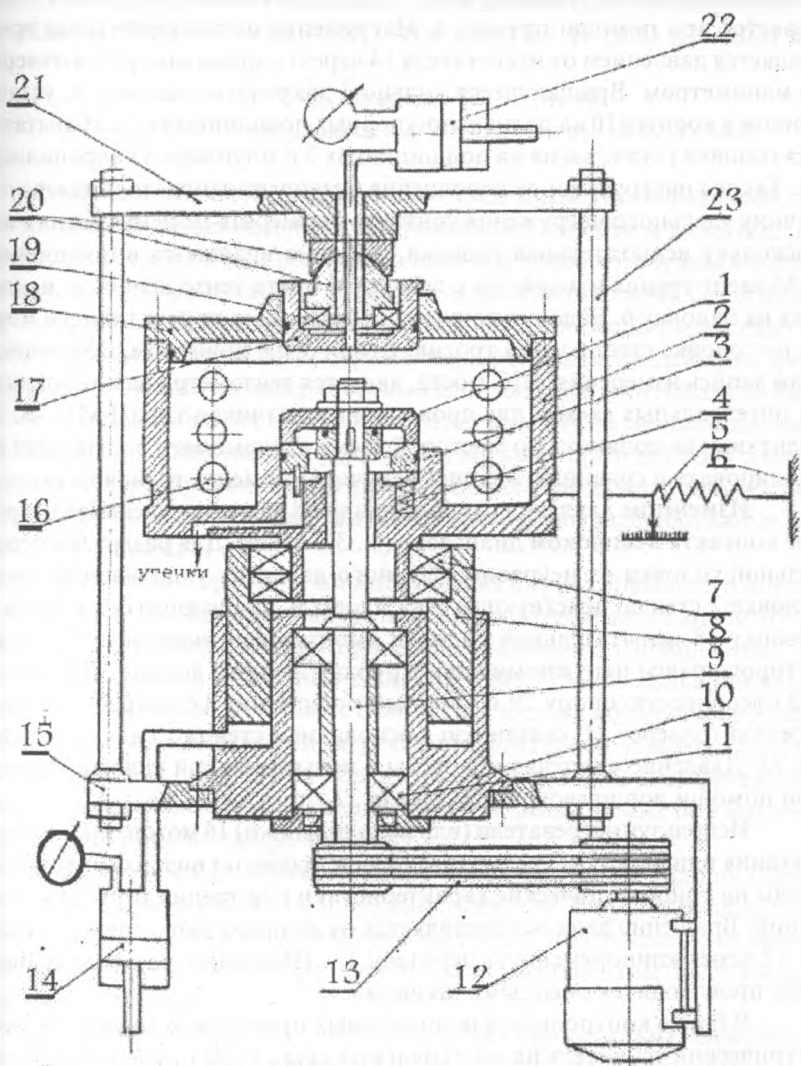


Рисунок 1. Схема стенда.

ными кольцами 1 и 3 пары трения. Упругий контакт в паре трения обеспечивается при помощи пружин 4. Нагружение на контакте пары трения создается давлением от нагнетателя 14 через гидроцилиндр 10 и измеряется манометром. Вращающееся кольцо 1 закреплено на валу 9, установленном в корпусе 10 на радиально-упорных подшипниках 11. Испытательная головка установлена на подшипниках 7 в плунжере 8 гидроцилиндра 10. Такое конструктивное исполнение позволяет изменять и измерять величину удельного нагружения контакта и измерять момент трения в паре, поскольку испытательная головка свободно вращается в подшипниках 7. Момент трения измеряется с помощью моста тензодатчиков, наклеенных на балочку 6. Балочка получает деформацию от реактивного момента на головке стенда через тросик. Вторичным прибором, обеспечивающим запись измерения ЭДС моста, является тензометрический усилитель на интегральных схемах для проводочных датчиков типа ТММ 48. Тензодатчики включаются по мостовой схеме. Динамометр 5 позволяет контролировать и сравнивать запись величины момента трения на ленте.

Изменение давления гидроцилиндра 8 изменяет удельное нагружение контакта в широком диапазоне (0...3,0 МПа). Для разгрузки испытательной головки от неуравновешенного давления уплотняемой среды в головке 2 стенда, действующего на площадь вращающегося кольца 1, в крышку 18 испытательной головки вмонтирован поршень 17, диаметр которого равен наружному диаметру контактного кольца. Поршень через сферическую опору 20 и упорный подшипник 19 упирается в неподвижную траверсу 21, связанную с основанием стенда 15 двумя шпильками 23. Давление уплотняемой среды в испытательной головке создается при помощи поршневого нагнетателя 22.

Используя нагреватели (или холодильники) 16 можно проводить испытания влияния температур (высоких и особенно низких) уплотняемой среды на триботехнические характеристики пар трения торцовых уплотнений. Вращение вала осуществляется от асинхронного электродвигателя 12 через клиноременную передачу 13. Изменение частоты вращения вала производится сменными шкивами.

В блоке контрольно-измерительных приборов установлены тензометрический усилитель на интегральных схемах для проводочных датчиков типа ТММ 48, манометры образцовые класса 0,5 для измерения рабочего давления уплотняемой среды и усилия нагружения пары трения торцового уплотнения.

О ПРОЦЕССЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ И ЕГО АНАЛОГАХ

М.П. Кульгейко, А.П. Лепший

Гомельский политехнический институт им. П.О. Сухого

Обоснованный выбор эффективных схем магнитно-абразивной обработки (МАО), решение вопросов производительности и качества, работоспособности и износа режущих элементов требуют изучения физической сущности процесса, его динамики и механизма съема обрабатываемого материала. Необходима систематизация и обобщение известных схем МАО на основе признаков, отражающих механизм воздействия ферроабразивных частиц на поверхностный слой изделия. Учитывая сложность явлений, происходящих в зоне обработки, целесообразно воспользоваться аналогами - известными процессами, которые представляют собой результат абстрагирования от второстепенных при данном рассмотрении факторов или являются более изученными и имеют разработанные методики исследований.

При изучении характера взаимодействия ферроабразивного порошка с обрабатываемой поверхностью имеет смысл проведение аналогий с некоторыми характеристиками процесса абразивного изнашивания. Тождественность явлений, происходящих при МАО и изнашивании абразивом, позволяет в соответствии с основными видами абразивного изнашивания выявить общие закономерности, характерные для отдельных видов воздействия порошка на поверхность, и на их основе дифференцировать процессы контактного взаимодействия, реализуемые при магнитно-абразивной обработке (см. таблицу).

Динамическое (Д) взаимодействие характеризуется ударно-абразивным воздействием частиц на поверхность детали. В процессе одного цикла контактирования взаимодействие частицы с поверхностью отличается кратковременным локальным ударом, давление при этом носит импульсный характер ($P_{имп}$).

Основная роль в процессе взаимодействия принадлежит механической составляющей $F_{мех}$ сил давления порошка, которая представляет собой силу удара, обусловленную запасом кинетической энергии частицы к моменту удара. Роль магнитного поля сводится в основном к обеспечению разгона ферроабразивного порошка, перемещению порошка вслед за полюсами электромагнита, интенсификации процесса путем изменения

скорости и плотности струи частиц и т.п. Динамический процесс взаимодействия при MAO имеет много общего с механизмом эрозионного изнашивания (в струе абразивных частиц, гидро- и газоабразивного изнашивания). К этому виду взаимодействия могут быть отнесены процессы песко- и дробеструйной обработки.

При кинематическом (К) процессе взаимодействие порошка с поверхностью детали в пределах одного цикла контактирования осуществляется как скольжение с переменным давлением P_{var} и сближением, в процессе которого частицы внедряются в поверхностный слой и производят снятие микростружек обрабатываемого материала. Давление порошка создается как силами магнитного поля $F_{\text{магн}}$ так и механическими силами $F_{\text{мех}}$. Силы механического давления возникают в результате сообщения частицам порошка движения, направленного под углом к поверхности детали. Аналогичным является процесс обработки деталей абразивом, уплотненным инерционными силами.

Для квазистационарного (КС) процесса взаимодействия характерным является направление вектора скорости частиц порошка параллельно обрабатываемой поверхности. В пределах одного цикла контактирования взаимодействие частиц порошка с поверхностью детали осуществляется как длительное скольжение с постоянным давлением (P_{const}), сопровождаемое снятием микростружек с поверхности изделия. Давление порошка на обрабатываемую поверхность при КС-процессе создается силами магнитного поля $F_{\text{магн}}$. Силы механического происхождения или не оказывают давления на порошок, или их роль незначительна (например, в случае заклинивания зерен порошка при большой его плотности в рабочей зоне, что носит эпизодический характер). Следует отметить, что квазистационарный процесс характерен для традиционных схем MAO, предложенных в первых исследованиях процесса. Среди видов изнашивания наиболее близким к КС-процессу является изнашивание при трении о частицы порошка в абразивной массе, оказывающей давление на поверхность контактирования за счет некоторого силового фактора.

В реальных схемах магнитно-абразивной обработки рассмотренные процессы резания могут встречаться в различных сочетаниях, дополняя основной вид взаимодействия элементами других воздействий. Поэтому выбор (анализ и синтез) конкретной схемы обработки должен осуществляться с учетом технологических возможностей реализованных в ней видов взаимодействия. Правильным сочетанием процессов взаимодействия в принятой схеме MAO достигается эффективное решение вопросов каче-

| Отличительные признаки контактного взаимодействия | Вид процесса контактного взаимодействия | | |
|---|--|---|---|
| | Динамический (Д) | Кинематический (К) | Квизистационарный (КС) |
| Характер движения порошка относительно поверхности детали в нормальной плоскости, соотношение между компонентами скорости | удар $\frac{V_D^y}{V_D^x} = \text{ctg} \alpha < f$ | перемещение $\frac{V_K^y}{V_K^x} = \text{ctg} \alpha > f$ | движения нет $V_{MC}^y \rightarrow 0$ $\alpha \approx 0$ |
| Характер взаимодействия частицы порошка с поверхностью в пределах одного цикла контактирования | кратковременный локальный удар с давлением $P_{\text{маг}}$ | продолжительное скольжение с переменным давлением $P_{\text{выч}}$ | длительное скольжение с постоянным давлением $P_{\text{сост}}$ |
| Схема взаимодействия | | | |
| Условные обозначения | α - угол наклона вектора скорости к обрабатываемой поверхности (угол атаки); f - коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемой поверхности - зона воздействия частицы порошка на поверхности изделия | | |

ства обработки поверхностей различных изделий.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

- установленная общность закономерных зависимостей механизма контактного взаимодействия при магнитно-абразивной обработке и изнашивании абразивом позволяет при изучении процессов МАО исходить из сопоставления их с соответствующими видами абразивного изнашивания;

- на основе дифференциации процессов взаимодействия системы порошок - поверхность представляется возможным изучение особенностей

и закономерностей процесса МАО отдельно для каждого вида контактного взаимодействия;

- изложенная методика позволяет производить выбор (анализ и синтез) схем МАО в соответствии с требованиями производительности и качества обработки.

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МАГНИТНО- ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ШЛИФОВАНИИ

*Э.И. Дмитриченко, М.П. Кульгейко, Е.Э.Дмитриченко
Гомельский политехнический институт им. П.О. Сухого*

Магнитно-электрическое шлифование (МЭШ) является способом комбинированной обработки токопроводящих материалов, сочетающим процессы абразивного микрорезания с электроконтактными и (или) электроэрозийными явлениями при воздействии на зону обработки магнитного поля. Физическая сущность процесса МЭШ заключается в механическом контактировании абразивного токопроводящего инструмента с поверхностью детали, замыкании электродов (инструмент-деталь) продуктами шлифования по локальным пятнам контакта, расплавлении контактных мостиков теплотой электротоков, образовании разрядов с последующими электроэрозийными явлениями, происходящими под воздействием внешнего магнитного поля.

Разрушение обрабатываемой поверхности при МЭШ происходит в результате микрорезания и пластичного оттеснения металла зернами абразива; электроконтактного расплавления стружки и поверхности; электроэрозийных и магнитных воздействий на расплав и продукты эрозии.

В основу теоретической предпосылки для описания явлений, протекающих в зоне контактного взаимодействия токопроводящего абразивного круга с поверхностью детали, положена контактная форма электрической эрозии. В соответствии с теорией контактной электроэрозии применительно к МЭШ разрушение происходит в результате концентрированного тепловыделения в местах стягивания токовых линий при достижении плотности сквозного тока выше некоторого значения и действия на расплав и канал разряда магнитодвижущей силы. В рассматриваемых процессах контактная форма эрозии может наблюдаться в форме контак-

тной эрозии скольжения и контактной эрозии стружечного замыкания.

Особенность первой формы эрозии состоит в скользящем контактировании электродов, перемещающихся относительно друг друга и соприкасающихся поверхностями, между которыми протекает ток. Скользящее контактирование возникает в том случае, когда на взаимодействующей поверхности абразивного круга отсутствует или заметно ограничено количество абразивных зерен. Вторая форма контактной эрозии основана на стружечном замыкании электродов и последующем возбуждении электрических разрядов. Третья форма электроэрозии может возникать в том случае, если напряжение на электродах достигает определенной величины и происходит пробой межэлектродного промежутка в случае, когда не произошло контактирование зерен абразива токопроводящего круга с поверхностью детали.

При переменной во времени мощности теплота Q , выделяемая в зоне контакта электродов, определяется по формуле:

$$Q = \int_0^t IU dt$$

Эта теплота распределяется между охлаждающей жидкостью, деталью и токопроводящим кругом.

Потери теплоты с охлаждающей средой:

$$Q = C_0 V_0 (T_{y.жс.} - T_{n.жс.}) t,$$

где C_0 - теплоемкость охлаждающей среды; V_0 - расход охлаждающей среды; $T_{y.жс.}$ - температура уходящей жидкости; $T_{n.жс.}$ - температура подводящей охлаждающей жидкости; t - длительность периода замыкания.

Количество теплоты отводимой в обрабатываемую деталь равно:

$$Q_m = \lambda(T_1 - T_2) \frac{Sd}{\delta},$$

где λ - коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; $T_1 - T_2$ - разность температур детали до нагрева и после; S - поверхность теплообмена; d - толщина нагреваемого металла.

Прямой нагрев сопротивлением зависит от электрического сопротивления R_0 круга и детали и определяется по формуле $R_0 = \sqrt{R_A^2 + X_H}$, где R_A , X_H - активное и индуктивное сопротивление.

Значительное влияние на величину активного сопротивления электродов оказывают потери энергии на вихревые токи, возникающие под дей-

ствием магнитного поля, и потери на перемагничивание. У ферромагнитных материалов поверхностный эффект заметно проявляется на промышленной частоте и зависит от размеров зоны контакта, удельного сопротивления и магнитной проницаемости.

Активное сопротивление проводника с учетом поверхностного эффекта $R_A = RK_n = 1.4RK_\delta$, где R - омическое сопротивление проводника; K_n - коэффициент поверхностного эффекта; K_δ - безразмерный коэффициент,

$$K_\delta = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{\pi f \mu_0 \mu_r}{\rho}},$$

где r - радиус поверхности проводника; f - частота тока; μ_0 - магнитная постоянная; μ_r - относительная магнитная проницаемость; ρ - удельное электрическое сопротивление проводника. Индуктивное сопротивление проводника $X_H = 0.84RK_\delta$. В присутствии магнитного поля общее сопротивление будет $R_0 = 1.6RK_\delta$.

Количество теплоты, необходимое для нагрева, плавления и перегрева металла детали в зоне контакта:

$$Q = M [c_1(T_{пл} - T_0) + q_m + c_2(T_{пер} - T_{пл})],$$

где M - масса металла; c_1 - средняя теплоемкость металла в интервале: T_0 - температура окружающей среды, T - температура плавления металла; c_2 - средняя теплоемкость металла в интервале температур от $T_{пл}$ до $T_{пер}$ температуры перегрева; q_m - скрытая теплота плавления металла.

Принимая во внимание кратковременность теплообмена с окружающей средой за время существования контакта и относительно небольшую площадь его поверхности, потерей теплоты с охлаждающей жидкостью Q_0 и теплотой, переданной в результате теплопроводности слоя металла Q_m , можно пренебречь [5] и считать процесс адиабатическим.

Тогда уравнение теплового баланса примет вид:

$$\int_0^t IU dt = M [c_1(T_{пл} - T_0) + q_m + c_2(T_{пер} - T_{пл})].$$

Решая уравнение и представляя сопротивление с учетом наложения внешнего магнитного поля получим, что масса расплавленного металла в результате возникновения контакта за время t равна:

$$M = \frac{I^2 R_0 t}{c_1(T_{пл} - T_0) + q_m + c_2(T_{пер} - T_{пл})}.$$

При обработке токопроводящим кругом в магнитном поле между обрабатываемой поверхностью и периферией круга возникает разность потенциалов $U = BVR$, величина которой регулируется величиной магнитного поля B и скоростью вращения V круга радиусом R . Величина магнитной индукции, при которой возможен выброс расплава массой M из зоны обработки равна:

$$B = \frac{M[c_1(T_{пл} - T_0) + q_m + c_2(T_{пер} - T_{пл})]}{IVRt}$$

Полученные выражения позволяют в некотором приближении оценить параметры механизма разрушения материала при МЭШ и определить оптимальные значения реализации устойчивого процесса обработки. Так, например, полученное расчетное значение магнитной индукции при шлифовании конструкционных сталей составляет не менее 0.25 Тл , что достаточно удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАЗМЕРНОГО КОНТРОЛЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Гоголинский В.Ф., Афанасьев А.А., Писарик В.В.
Могилевский машиностроительный институт*

Совершенствование существующих и создание новых технологий и оборудования неразрывно связано с совершенствованием методов и средств оценки состояния наиболее ответственных деталей и узлов. В машиностроении важное значение имеет контроль линейных размеров изделий как при изготовлении, так и в процессе ремонта и эксплуатации, который составляет около 80% от общего числа контролируемых операций, выполняемых в данной отрасли.

Значительное место среди автоматических средств размерного контроля занимают бесконтактные пневматические приборы благодаря таким достоинствам, как высокая точность, чувствительность, бесконтактность измерений и др. /1/

Пневматические измерительные приборы в настоящее время применяются главным образом для высокоточных бесконтактных измерений и автоматизации контроля размеров в подшипниковой, авиационной и автотракторной промышленности. Однако, невысокое быстродей-

ствие ($t_y = 0,8 \dots 1,0$ с) и небольшой диапазон измерений (до 0,2 мм) типовых пневматических приборов накладывают определенные ограничения на их применение при технологическом контроле. Кроме того, автоматизация контроля с использованием известных пневматических измерительных приборов сопряжена с рядом трудностей, т.к. выходной сигнал, как правило, представляется в аналоговой форме, что затрудняет реализацию связи между ЭВМ и измерительным устройством.

Существенного улучшения метрологических характеристик пневматических приборов можно достичь, используя в них цепь отрицательной обратной связи.

На кафедре «Электротехника и электроника» разработано устройство автоматического контроля линейных размеров объектов, сочетающее пневматический и оптический принципы преобразования информации [2]. Устройство контроля отличается тем, что в нем наряду с оптико-электронным функциональным преобразованием внесен элемент слежения сигнала первичной информации. Такая структура контрольно-измерительного устройства обеспечивает расширение диапазона измерений линейных размеров при высоком быстродействии, надежности и стабильности.

В результате исследований получены математические модели первичного пневматического и промежуточного оптического измерительных преобразователей, что явилось основой по улучшению метрологических характеристик и оптимизации параметров измерительного устройства.

Для описания пневматической системы автоматического контроля был принят изотермический газодинамический режим. Исследования функционирования пневматических преобразователей показали, что их анализ в изотермическом режиме обеспечивает эффективное преобразование измерительной информации. При этом упрощается методика исследования и ее практическое применение в инженерных расчетах, а отклонение от принятого адиабатического режима составило менее 5% при диаметрах входных дросселей, не превышающих $0,8 \cdot 10^{-3}$ м.

Передаточная функция первичного бесконтактного пневматического следящего преобразователя (БПСИ) представляется формулой:

$$\Phi(P) = \frac{K_0}{T_1^2 P^2 + T_2 P + K_0 + 1},$$

где $K_0 = \frac{f_3}{d} K_h$ — чувствительность пневматической дифференциальной системы;

K_h — чувствительность пневматической измерительной камеры;

T_1, T_2 — постоянные времени, учитывающие, соответственно, величины собственных колебаний и степень демпфирования выходных колебаний.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований показал, что время реакций БПСП определяется чувствительностью K_h , эффективной площадью f_3 упругих элементов и их жесткостью d , массой подвижной системы. Например, уменьшение жесткости увеличивает чувствительность, что может привести к потере устойчивости и необходимости дополнительного демпфирования. С уменьшением в БПСП объема измерительной камеры и диаметра отверстия входного дросселя расширяется полоса пропускания [3].

С целью исключения обратного воздействия вторичного измерительного преобразователя на параметры пневматической системы использован оптический преобразователь перемещений, который наиболее полно реализует преимущества пневматического бесконтактного метода. Получена функция преобразования волоконно-оптического преобразователя (ВОП), учитывающая параметры оптической системы и описываемая выражением

$$Y = B_0 \operatorname{tg} \left[2 \left(\arcsin \frac{X_0 + \Delta X}{R} - \arcsin \frac{X_0}{R} \right) + \operatorname{arctg} \frac{Y_0}{R} \right] - Y_0,$$

где X — входное воздействие;

Y — выходное воздействие;

B_0, R — конструктивные параметры;

X_0, Y_0 — начальные значения.

Разработанное пневмо-оптическое измерительное устройство, построенное на совокупном использовании пневматического и оптиковолоконного измерительных преобразователей, обеспечивает быстрое действие и диапазон измерений. Исследования показали, что погрешность от нелинейности БПСП в диапазоне $1.2 \cdot 10^{-3}$ м не превышает 0.5 %, а по

быстродействию и диапазону измерения он в 10 раз превышает типовые пневматические средства размерного контроля.

Реализация алгоритма обработки измерительной информации с помощью специализированного вычислительного устройства (СВУ) позволяет автоматизировать процесс контроля линейных размеров изделий в производственных условиях и повысить точность и достоверность результатов измерения.

Литература

1. Высоцкий А.В. Основные направления развития средств линейных измерений, контроля и управления в машиностроении/ Измерительная техника. - 1983-№4-с.35-36.

2. Пневматический способ измерения поперечных размеров движущегося изделия и устройство для его осуществления. А.С. N1453170. Авторы: Гоголинский В.Ф., Потапов А.И., 1989 г.

3. Гоголинский В.Ф., Балабанов И.Н., Кравченко Е.А. Повышение быстродействия и диапазона измерения бесконтактных пневматических приборов размерного технологического контроля / Материалы международной 52-ой НТК «Технические ВУЗы - Республике». Минск, 1997 г.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

*Чемисов Б.П. Завистовский С.Э. Крупский В.А.
Полоцкий государственный университет*

Современное машиностроение позволяет получать покрытия из разнообразных материалов: металлов, сплавов, керамики, пластмасс и т.п., в результате чего можно управлять уровнем физико-химических и эксплуатационных свойств поверхностных слоев. Для нанесения специальных покрытий весьма перспективным является электростатический метод, основанный на способности осаждения электрически заряженных частиц волокна на предварительно подготовленную поверхность. Под действием электростатического поля частицы ориентируются строго по линиям электромагнитного поля, в результате чего достигается эффект их направ-

ленного осаждения. Указанное явление наиболее ценно для: увеличения звукоизоляции; увеличения теплоизоляции и достижения других специальных свойств. В качестве исходного материала могут быть использованы не только синтетические волокна, но и металлические порошки, порошки абразивов (в т.ч. эльборы, алмазы, корунды и т.п.).

К основным особенностям исследуемого метода следует отнести простоту реализации и высокую производительность. Нанесение покрытия можно осуществлять в строго указанных местах, не защищая при этом остальную поверхность изделия.

Технология электростатического нанесения покрытия проста. Требуемое оборудование малогабаритно и надежно в эксплуатации.

Вместе с тем широкое распространение в Республике Беларусь технологии электростатического напыления сдерживается ввиду высокой стоимости оборудования и расходных материалов. Поэтому в настоящее время проводятся исследования по отработке технологии электростатического напыления как волоконных так и других материалов отечественного производства с целью более широкого использования технологии электростатического напыления, как одной из энергосберегающих технологий.

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ

*Зевелева Е.З., Хейфец М.Л., Чемисов Б.П.
Полоцкий государственный университет*

Сокращение сроков проектирования новых, более совершенных технологических процессов, оснащенных инструментами, станками, машинами и автоматическими линиями, образующими единый технологический комплекс (ТК) - одна из наиболее актуальных проблем современного производства.

Технологический комплекс в общем случае рассматривается как иерархически построенные системы "человек-машина" [1], которые включают следующие уровни:

1 уровень - функциональные элементы (ФЭ): главное движение, подача, движение инструмента и т.д.;

2 уровень - функциональные подсистемы (ФПС) в виде агрегатных блоков;

3 уровень - функциональные системы (ФС): рабочая, транспортная, питания и удаления, обслуживания;

4 уровень - технологические, энергетические и информационные машины или технологические модули (ТМ);

5 уровень - автоматические и полуавтоматические линии, образующие ТК.

Каждая система n -го уровня является элементом системы $(n+1)$ -го уровня. Состав ТК, состав каждой ФПС, входящей в ТК, и функции входящих в них ФЭ соответствуют содержанию того технологического процесса, для которого создается данный ТК [2].

Существующие в настоящее время установки для высокоэффективной обработки представляют собой функциональные системы с набором различных функциональных подсистем [3], которые в свою очередь представляют набор функциональных элементов, выполняющих определенные движения функциональных подсистем.

Для установления связей между уровнями технологического комплекса введем двужначную условную нумерацию составляющих систем и элементов. Первая цифра номера соответствует уровню составляющих: 1- ФЭ, 2- ФПС, 3- ФС, 4- ТМ, 5- ТК. Вторая цифра - порядковый номер, присваиваемый каждой единице данного уровня.

Таким образом получаем следующую кодовую нумерацию составляющих: 51 - технологический комплекс по обработке деталей типа тел вращения.

Состав 4 уровня - технологические модули по методу обработки: 41 - токарная обработка (ТО), 42 - абразивная обработка (АО), 43 - ротационное резание (РР), 44 - электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием (ЭМН с ППД), 45 - магнитно-абразивное полирование (МАП).

3 уровень - функциональные системы: 31 - рабочая, которая включает элементы, необходимые для выполнения прямого назначения ФС, 32 - вспомогательная, которая осуществляет установочные движения инструмента, 33 - обслуживающая, которая осуществляет смену заготовки, инструмента, заполнения устройств подачи порошков, СОЖ.

2 уровень - функциональные подсистемы: 21 - движения заготовки, 22 - движения инструмента, 23 - движения подачи (врезания), 24 - движения

электромагнитной системы, 25 - дополнительного нагрева обрабатываемой поверхности, 26 - подачи СОЖ, 27 - подачи порошка, 28 - установочных движений инструмента, которые могут совпадать с основными движениями, 29 - смены детали и инструмента (в рассматриваемых технологических модулях производится вручную).

I уровень - функциональные элементы, т.е. механизмы, выполняющие определенный вид движения: 11 - главное движение заготовки (111 - вращательное, 112 - поступательное), 12 - главное движение инструмента (121 - вращательное, 122 - поступательное), 13 - дополнительное движение инструмента (131 - вращательное, 132 - поступательное), 14 - движение подачи (врезания) (141 - поперечное, 142 - продольное), 15 - движение электромагнитной системы, 16 - движение устройства подачи порошка, 17 - установочные движения заготовки (171 - продольное, 172 - поперечное), 18 - установочные движения инструмента (181 - продольные, 182 - поперечные).

Рассмотрим наборы составляющих элементов ФС, ФПС и ФЭ, называемые кортежи, для определения связи между ними.

Для выяснения возможности создания универсального технологического комплекса строятся графы кортежей и определяются совпадающие связи и элементы.

Анализ графов кортежей показал возможность создания универсального технологического комплекса, объединяющего существующие высокоэффективные методы обработки деталей типа тел вращения.

Структурный синтез позволяет сделать вывод, что в составе ТК должны быть следующие блоки:

1. Блок главного движения заготовки, обеспечивающий вращательное движение заготовки относительно горизонтальной оси.
2. Блок привода инструмента, обеспечивающий а) главное поступательное движение вдоль оси вращения заготовки и движение врезания, который может быть выполнен по типу суппорта токарного станка, б) вращательное движение инструмента.
3. Блок привода электромагнитной системы, используемый для управления технологическим процессом и для контроля качества обработки.
4. Блок, обеспечивающий подачу шлифовального или упрочняющего порошка, который рационально дополнить системой подачи СОЖ.
5. Система дополнительного нагрева поверхностного слоя обрабатываемой детали, которую целесообразно исключить при использовании тех-

нологического тепла наплавки и поверхностной термообработки.

Литература

1. Артоболевский И.И., Ильинский Д.Я. Основы синтеза машин автоматического действия. - М.: Наука, 1983. 280 с.
2. Ящерицын П.И., Кожуро Л.М., Хейфец М.Л., Чемисов Б.П. Проектирование технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий на основе многофакторной оптимизации // Доклады АН Беларуси. 1997. Т.41, 3.- С.121-127.
3. Ящерицын П.И., Кожуро Л.М., Хейфец М.Л. Гибкий производственный модуль для комбинированной электромагнитной и термомеханической обработки изделий // Вестник машиностроения. 1996. 3.- С.33-36.
4. Ящерицын П.И., Чемисов Б.П., Хейфец М.Л. Оптимизация проектирования технологических комплексов механической и физико-технической обработки изделий // Материалы международной научно-технической конференции "Современные проблемы машиноведения". Гомель, ГПИ. 1996. С.112-113.

ПОЛУЧЕНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НИКЕЛЬ-БОР МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Ракович Е.В.

НИИ физико-химических проблем Белгосуниверситета, г. Минск

Композиционные материалы на основе мелкодисперсных порошков тугоплавких соединений нашли широкое применение в толстопленочных проводниковых элементах микросхем и других изделиях электроники. Специфика толстопленочной технологии в микроэлектронике и вычислительной технике обусловила применение в качестве функциональной фазы проводников благородных металлов (золота, платины, палладия, серебра), которые совмещают высокую электропроводность с химической стойкостью. Однако, их высокая стоимость и дефицитность стимулировала разработки заменителей. Для вжигаемых на воздухе толстых пленок перспективными заменителями благородных металлов являются тугоплавкие бориды никеля, т.к. образующийся на начальных этапах термообработки легкоплавкий борный ангидрид B_2O_3 играет роль стеклосвязующего,

связующего, уплотняя проводящие частицы и обеспечивая адгезию к подложке; кроме того, он выполняет защитную функцию, замедляя процесс окисления.

Известны многочисленные способы получения высокодисперсных металлических порошков (плазменно-дуговой, электровзрыв проводников и др.). Наибольший интерес представляет низкотемпературный метод химического восстановления металлов в водных растворах. В настоящей работе рассмотрены результаты исследования условий формирования в водных растворах высокодисперсных порошков никель-бор, полученных восстановлением ионов Ni(II) борогидридом натрия и различающихся составом, структурой, морфологией и размером частиц.

Порошки никеля, содержащие бор, получали взаимодействием сульфата или хлорида никеля (0,1 моль/л) с борогидридом натрия в кислых (рН 5-6), нейтральных и щелочных (рН 8-12) водных растворах. В основной серии опытов температура осаждения поддерживалась равной 20°C, причем использовались различные порядок и скорость сливания растворов, содержащих реагенты. Содержание бора в осадках определяли алкалметрическим титрованием в присутствии маннита с использованием иономера И-130.2М. Ошибка определения бора в образце составляла $\pm 0,2\%$. Рентгенограммы полученных осадков снимали на дифрактометре HZG 4A на CoK_α -излучении ($\lambda=0.1789$ нм) при скорости записи 1град/мин. Морфологию и дисперсность частиц никель-бор изучали методом просвечивающей электронной микроскопии на электронном микроскопе ЭМВ-100 ЛМ. При этом коллоидный раствор, содержащий частицы никель-бор, наносили на медную сетку, предварительно покрытую коллодиевой пленкой, затем напыляли угольную пленку толщиной 10-20 нм для фиксации частиц в матрице, чувствительной к электронному лучу.

Химический анализ полученных осадков показал, что в отсутствие лигандов при комнатной температуре (20°C) из раствора, содержащего только соль никеля (II), осаждаются порошки никеля, содержащие от 11 до 23 ат.-% бора в зависимости от величины отношения $\text{Ni}^{II} : \text{BH}_4^-$. Содержание бора в формирующихся из таких растворов осадках увеличивается с ростом концентрации восстановителя и уменьшением температуры осаждения. Причиной резкого уменьшения количества соосаждающегося с никелем бора при увеличении температуры сливания растворов, по-видимому, является ускорение реакции гидролиза восстановителя, приводящей к превращению борогидрид-иона BH_4^- в борат-ион с одновременным выделением водорода.

рошки никель-бор при более высоких значениях рН, причем повышение щелочности раствора с 6,3 до 11,0 увеличивает содержание бора в осадках с 21,6 до 29,5 ат.% при $Ni^{II} : BH_4^- = 1:1$. Добавление в раствор второго лиганда - аммиака - позволяет получать порошки с большим содержанием бора. Так увеличение концентрации аммиака в растворе, приводящее к повышению рН реакционной среды от 7 до 11, сопровождается ростом содержания бора в осадках, полученных из цитратно-аммиачных растворов с 22,1 до 33,0 ат.% при $Ni^{II} : BH_4^- = 1:1$ и с 25,7 до 37,3 ат.% при $Ni^{II} : BH_4^- = 1:1,4$. Снижение температуры осаждения до 5°C при более высоком рН цитратно-аммиачного раствора (около 12) и $Ni^{II} : BH_4^- = 1 : 2,7$ позволило нам получить образцы порошка никель-бор, содержащего 43-45 ат.% бора.

Согласно результатам рентгенографического исследования независимо от состава раствора, условий проведения реакции и содержания бора в продуктах восстановления, формируются рентгеноаморфные осадки. На рентгенограммах полученных порошков в области углов $2\theta = 45-60$ град. обнаруживается широкое диффузное гало небольшой интенсивности. Для осадков, содержащих 33 и более ат.% бора, других рефлексов на рентгенограмме не имеется, а на дифрактограмме порошков, полученных в условиях недостатка восстановителя и содержащих 22 ат.% бора, регистрируется слабое отражение, которое может быть приписано гидроксиду никеля $Ni(OH)_2$.

Для порошков никель-бор, содержащих бора менее 25 ат.%, кристаллизационные процессы начинаются уже при прогреве при 300°C (аргон, 1 час) с выделения кристаллического никеля, что подтверждается появлением на дифрактограмме рефлексов, соответствующих отражениям $Ni[111]$, $Ni[200]$. Содержащийся в указанных осадках гидроксид никеля теряет воду и кристаллизуется при прогреве в виде оксида никеля NiO . Для осадков с высоким содержанием бора (33 и 43 ат.%) дифрактограммы, записанные с непрогретых образцов, и после прогрева при 300°C, не различаются. Прогрев этих осадков при температуре 400°C приводит к выделению фазы кристаллического никеля, причем, при прогреве порошков, содержащих 33 ат.% бора, кристаллизация металла идет с одновременным выделением фазы борида Ni_3B , а в случае порошков с содержанием бора 43 ат.% - смеси боридов состава Ni_3B и Ni_2B . Количество и закристаллизованность боридов Ni_3B и Ni_2B повышаются с увеличением содержания бора в осадках. Об этом свидетельствует увеличение числа наблюдаемых рефлексов Ni_3B , повышение их интенсивности и уменьшение по-

луширины.

Электронно-микроскопическое исследование показало, что при осаждении никеля из растворов, содержащих только соль Ni(II), получают мелкодисперсные порошки, первичные частицы которых имеют размер 50-100 нм и объединены в крупные агрегаты неправильной, близкой к сферической, формы, размеры которых могут достигать 800-900 нм и более. Уменьшению средних размеров частиц способствует введение лигандов в раствор.

Таким образом, в процессе химического осаждения Ni(II) в объеме раствора с использованием борогидрида натрия в качестве восстановителя в зависимости от состава раствора, pH и температуры проведения реакции образуется высокодисперсный никель, содержащий от 11 до 43 ат.% бора, причем, как показал эксперимент, для синтеза индивидуального высокодисперсного вещества в большей степени приемлем процесс формирования никель-бор в щелочной среде (pH 9-12) при избытке восстановителя. Характер кристаллизационных процессов, протекающих при прогреве порошков Ni-B и приводящих к выделению кристаллического никеля и боридов Ni₃B и Ni₂B, существенно зависит от содержания в них бора.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ ОСАЖДЕННЫХ НИКЕЛЬ-БОР ПОКРЫТИЙ - ПУТЬ К ЭКОНОМИИ ДРАГМЕТАЛЛОВ

Цыбульская Л.С., Новоторцева И.Г., Гаевская Т.В.

НИИ физико-химических проблем Белгосуниверситета, г. Минск

В производстве интегральных схем, печатных плат, корпусов микросборок с целью экономии драгметаллов (золото, палладий, серебро) используется химически осажденное никель-бор (Ni-B) покрытие. Однако процесс химического осаждения Ni-B на каталитическую поверхность протекает при высокой температуре (82+2°C), малой скорости (5-6 мкм/ч), плотности загрузки раствора не более 0,5-1,0 дм²/л и максимальной степени эксплуатации раствора с корректировкой по убывшим компонентам не более 5. Более технологичным является процесс получения покрытий никель-бор электрохимическим способом в диапазоне температур от комнатной до 50°C, скорости осаждения 20-40 мкм/ч и выходу по

току 95 - 98 %. Для соосаждения бора с никелем в электролит никелирования вводится тетрагидроборат натрия, гидрозинборан, диметиламиноборан, дикарбоундекаборан и декагидроборат натрия, причем при непрерывной фильтрации, постоянной коррекции и периодической селективной очистке электролит эксплуатируется более года.

Цель данной работы состояла в получении покрытий никель-бор электрохимическим способом с регулируемыми физико-механическими и электрическими свойствами.

Осаждение покрытий проводили на поверхности меди или стали при температуре 20-60°C, из слабокислого раствора никелирования ($\text{pH}=4,2\pm 0,3$) с декагидроборатом натрия в качестве борсодержащей добавки. Количество никеля и бора в покрытиях определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрометра Plasma - 100. Микроструктуру Ni-B изучали рентгенодифракционным методом. Съемку рентгенограмм проводили на дифрактометре HZG 4A с $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -излучением. Расчет параметров кристаллической решетки, размеров ОКР выполнен для кристаллографического направления Ni(111) с использованием аппроксимирующей функции Коши. Морфологию поверхности Ni-B исследовали на сканирующем микроскопе фирмы JEOL JSM- 35C. Микротвердость покрытий при их толщине не менее 20 мкм, осажденных на сталь, измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 50 г. Износостойкость оценивали по удельному объемному износу покрытия при вращении истирающего диска из стали 18-ГТ со скоростью 460 об/мин. Переходное электрическое сопротивление определяли при постоянном токе в цепи 50 мА и нагрузке 40 г. Ультразвуковую сварку алюминиевых проволочных выводов диаметром 35 мкм с покрытиями Ni-B осуществляли на автомате ЭВ-4020Б. Паяемость покрытий оценивали по отношению площади растекания нормированной дозы припоя ПОС-61 (0,1г) по поверхности Ni-B к площади растекания этой же дозы припоя по поверхности меди при температуре пайки 235 ± 5 °C. Для улучшения смачиваемости поверхности покрытий Ni-B использовали малоактивные флюсы на основе этилового спирта, триэтаноламина и слабой органической кислоты (салициловая, янтарная или бензойная).

Проведенное исследование показало, что химический состав покрытий никель-бор зависит от концентрации декагидробората натрия, а также условий осаждения - температуры и катодной плотности тока. Основным фактором, определяющим содержание бора в сплаве, является концентрация $\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$. С ростом последней от 0,0003 - 0.012 моль/л содер-

жание бора в сплаве возрастает от 0,5 до 28 ат.%. Повышение температуры от 20 до 60°C приводит к увеличению содержания бора в покрытии от 16 до 24 ат.%, а увеличение катодной плотности тока от 0,5 до 5,0 А/дм², наоборот, к его уменьшению от 24 до 12 ат.% для покрытий одинаковой толщины. Следует отметить, что бор, соосаждающийся с никелем, неравномерно распределяется по толщине покрытия. С увеличением последнего от 0,5 до 10 мкм наблюдается уменьшение среднего содержания бора от 32 до 10 ат.%. Данные сканирующей электронной микроскопии свидетельствуют о том, что слои сплава, прилегающие к подложке, характеризуются более высокой дисперсностью. При этом создаются благоприятные условия для сорбции декагидробората из раствора никелирования и последующего каталитического распада его на активных центрах, что, соответственно, и приводит к осаждению сплава с повышенным содержанием бора. По мере роста покрытия происходит сглаживание поверхности рельефа, при этом уменьшается концентрация дефектов на поверхности и наблюдается уменьшение количества легирующего компонента в сплаве.

Согласно данным рентгенофазового анализа, покрытие Ni-B с содержанием бора в сплаве от следовых количеств до 6 ат.% представляют собой поликристаллический твердый раствор бора в никеле, причем чем меньше содержание бора, тем больше выражена степень кристаллическости твердого продукта восстановления. Никелевое покрытие имеют гранцентрированную кубическую решетку с параметром $a=0,3522$ нм и средним размером кристаллитов 112 нм. С увеличением содержания бора в сплаве от 0,5 до 6,0 ат.% параметр решетки практически не изменяется, а размер кристаллитов уменьшается от 140 до 3,5 нм. При содержании бора в сплаве более 20 ат.% покрытие Ni-B рентгеноаморфно. Зависимость полуширины линии Ni (111) от содержания бора в сплаве свидетельствует о том, что не существует отчетливой границы между кристаллической и рентгеноаморфной фазами. Покрытие Ni-B с содержанием бора от 6 до 20 ат.% занимают по своей структуре промежуточное положение между кристаллическим и аморфным состояниями.

Металлографическое исследование поперечного излома покрытий Ni-B показало, что никелевое покрытие и Ni-B кристаллической модификации имеют слоисто-столбчатую структуру, при появлении аморфной составляющей - слоистую. Аморфные покрытия Ni-B представляют собой плотную, высокодисперсную, гомогенную систему.

С ростом неметаллического компонента в покрытии от 1 до 28 ат.%

прочность микросварных соединений и переходное электрическое сопротивление возрастают от 10,5 до 15,5 г и от 2,5 до 28 мОм, соответственно; износостойкость увеличивается в 4,5 раза (объемный износ при этом уменьшается от 3,7 до $0,84 \cdot 10^{-6}$ мм³); паяемость улучшается на 15-20%. Наибольшая микротвердость (8,1 ГПа) для свежесаженных покрытий достигается при малом содержании бора в сплаве (~1 ат.%). При прогреве покрытий микротвердость и износостойкость возрастают в 1,5-2 раза. Связано это со структурно-фазовыми превращениями, происходящими при термообработке покрытий. При 300°C происходит распад твердого раствора бора в никеле с образованием фазы борида никеля (Ni_3B), которая, по-видимому, и обеспечивает улучшение механических свойств покрытия. Переходное электрическое сопротивление с ростом температуры прогрева для поликристаллических покрытий Ni-B увеличивается, а прочность микросварных соединений уменьшается. Связано это, по-видимому, с окислением поверхности покрытий, их рекристаллизацией, приводящей к укрупнению зерна. Для аморфных покрытий Ni-B наблюдается обратная зависимость - уменьшение переходного сопротивления и увеличение прочности сварных соединений с ростом температуры прогрева. Обусловлено это, по-видимому, образованием фаз боридов (Ni_3B и Ni_2B).

Благодаря невысокому переходному сопротивлению покрытий Ni-B, сопоставимому с переходным сопротивлением покрытий из золота и серебра, удовлетворительной паяемости с использованием мягких припоев и малоактивных флюсов и способности к ультразвуковой сварке с алюминиевым проводником (усилие отрыва > 10г) покрытие Ni-B рекомендуется для замены золотых, серебряных, палладиевых покрытий в изделиях приборостроения, радио- и микроэлектроники.

ДВИЖЕНИЕ КАПЛИ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Белоконь В. М., Старохозяев А. С.

Могилевский машиностроительный институт

Изготовление сварных конструкций с применением дуговых процессов сварки связано с необходимостью последующей зачистки свариваемых поверхностей от капель электродного металла. На это тратится времени, в среднем 1,2-8 минут на 1 м. шва, что составляет до 30% всей трудоемкости изготовления конструкции.

Налипание каплей электродного металла зависит от вида и формы переноса электродного металла в сварочную ванну, величины и характера действующих сил на каплю, скорости, длины и времени полета капли и некоторых других факторов.

Перенос металла при сварке через дуговой промежуток происходит в виде капель, струи и паров. Наблюдаются следующие разновидности переноса металла: крупнокапельный (диаметр капли в 1,5 раза и более превышает диаметр электрода), короткими замыканиями и без них, мелкокапельный (диаметр капли близок к диаметру электрода), струйный (диаметр капли меньше 0,1 диаметра электрода).

Размер капель электродного металла определяется составом металла, защитного газа, а также направлением и величиной тока.

Капля электродного металла может переходить в сварочную ванну (что характерно для большинства из них) или вылетать из зоны сварки. В последнем случае ее называют брызгой.

Образование брызг может вызываться многими причинами: электродинамическими силами, возникающими в начале и в конце короткого замыкания дугового промежутка каплями электродного металла, взрывообразным испарением жидких перемычек металла в начале и в конце коротких замыканий, бурным выделением пузырьков газа (окисью углерода, азота, водорода и другие) из переплавляемого дугой металла, активным и реактивным действием на электродные капли возникающих в зоне дуги потоков паров и газов и т.п.

Зависит разбрызгивание металла от длины дуги. Короткими дугами являются дуги длиной 3-5 мм, длинными - 8-12 мм. Наибольшее разбрызгивание наблюдается при сварке короткими дугами с короткими замыканиями.

Подавляющее количество брызг, как показали исследования, вылетает из зона сварки под углом более 45° к поверхности свариваемой детали. Мелкие брызги размером примерно 0,02 мм вылетают из области сварки с большой скоростью (около 40 м/сек). Угол между направлением их полета и перпендикуляром к поверхности свариваемой детали обычно не превышает 25° . Более крупные брызги летят с меньшей скоростью и имеют больший угол разлета.

Капля размером 0,1-0,2 мм, как и очень мелкие, размером 0,02 мм разлетаются на большие расстояния от шва. Применительно к брызгам среднего и крупного размера проведем расчет времени и длины полета.

Для определения кинематики движения капли расплавленного метал-

Таблица 1. Время и длина полета средних и крупных брызг

| φ, град. | v_0 , м/сек | L, мм | $t \cdot 10^{-2}$, сек | φ, град. | v_0 , м/сек | L, мм | $t \cdot 10^{-2}$, сек |
|----------|---------------|-------|-------------------------|----------|---------------|-------|-------------------------|
| 10 | 0,3 | 3,1 | 1,06 | 30 | 0,3 | 7,95 | 3,06 |
| | 1,0 | 34,8 | 3,54 | | 1,0 | 88,4 | 10,2 |
| 15 | 0,3 | 4,6 | 1,58 | 35 | 0,3 | 8,6 | 3,5 |
| | 1,0 | 51,0 | 5,28 | | 1,0 | 95,8 | 11,7 |
| 20 | 0,3 | 5,9 | 2,09 | 40 | 0,3 | 9,04 | 3,93 |
| | 1,0 | 65,6 | 6,98 | | 1,0 | 100,4 | 13,12 |
| 25 | 0,3 | 7,05 | 2,58 | 45 | 0,3 | 9,18 | 10,2 |
| | 1,0 | 78,2 | 8,62 | | 1,0 | 102 | 14,4 |

ла (брызги) рассмотрим ее как тело массой "m", радиусом "R", вылетающей из некоторой начальной точки (конец электрода) со скоростью " v_0 ". В этом случае, если пренебречь сопротивлением окружающей атмосферы (что планомерно из-за малых размеров), уравнение, описывающее траекторию полета

$$Y = X \cdot \operatorname{tg} \varphi - \frac{g \cdot X^2}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (1)$$

где Y и X - текущая ордината движения, j - угол между направлением полета и перпендикуляром к свариваемой поверхности, g - ускорение свободного падения.

Тогда продолжительность полета t и дальность полета L находятся по формулам

$$t = \frac{2 \cdot v_0 \cdot \sin \varphi}{g}, \quad (2)$$

$$L = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\varphi}{g} \quad (3)$$

Результаты расчета сводим в таблицу 1.

Результаты расчета показывают, что наибольшее удаление брызг от шва средних (диаметром 0,8-1,0 мм) и крупных (до 2,5 мм и более) составляют 100 мм.

Направление полета капли имеет случайный характер. Как теоретически, так и опытным путем определено, что капли разлетаются во всех направлениях.

При относительно равномерном разбрызгивании во все стороны и при движущемся источнике нагрева равномерное покрытие брызгами на полосе от шва шириной в 100 мм не наблюдается. Наибольшее количество брызг наблюдается на полосе в 60-70 мм от центра шва. Это соответствует сектору, наиболее густо перекрытому возможными траекториями полета, падение капель подчиняется нормальному закону и составляет 2/3 от общей ширины полосы. На расстоянии от центра шва 70-100 мм наблюдаются отдельные брызги.

Результаты данной работы позволяют разработать мероприятия по защите поверхностей от налипания электродного металла от брызг и тем самым существенно снизить трудозатраты на последующую обработку изделий.

КОНЦЕПЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цырлин М. И. , Родченко Д. А.

Белорусский государственный университет транспорта

Процесс плазменного напыления является сложным и многофакторным. Высокие температуры и скорости протекания теплофизических и динамических процессов в плазменной струе создают сложность в оптимизации технологических режимов получения материалов и покрытий [1].

Одним из эффективных путей решения проблемы совершенствования существующих и разработки новых технологий плазменного напыления является применение методов компьютерного моделирования процесса, при котором возможно получение максимального объема информации об изучаемом процессе при минимуме экспериментальных исследований.

В основу разработки математической модели положена разбивка плазменного процесса на несколько основных стадий, сквозная передача данных с одной стадии на другую и их синтез. Входными параметрами 1-ой стадии процесса, включающей генерацию плазменной струи, являются: тип установки, энергетические параметры, конструкция плазмотрона, состав, температура и расход плазмообразующего газа на входе в плазмотрон. На выходе стадии генерации - распределение температур и скорости струи. Задача математического описания первой стадии процесса напыления по определению температуры вдоль струи для различных типов установок и плазмотронов на данном этапе решена с применением двухмерной аппроксимации экспериментальных данных. Аналитические зависимости температуры несущего потока (T_p) от осевой координаты струи получены из экспериментальных данных с помощью программы statgraf.

Скорость плазменной струи определялась из выражения [2]

$$w_f = w_g \frac{T_f}{T_a},$$

где w_g , T_g - скорость и температура плазмообразующего газа на входе в плазмотрон.

Данные о температуре, скорости плазменной струи вместе с информацией о природе осаждаемых частиц, дисперсности и их расходе, дистанции ввода и напыления являются входными для второй стадии процесса (ввода распыляемого порошка в плазменную струю, его нагреве и ускорении). На выходе этой стадии - массив данных о распределении во времени и пространстве температур и скорости частиц, полноте оплавления.

Аналитические выражения для расчета скорости частицы (w_p) и ее координаты как функции времени определены из закона Ньютона, описывающего взаимодействие высокоскоростной плазменной струи с вводными в нее частицами порошка

$$m_p \frac{dw_p}{dt} = \sum F,$$

где m_p - масса частицы; $\sum F$ - сумма сил, действующих на частицу в плаз-

менной струе, основной из которых является сила аэродинамического сопротивления.

Задача нагрева полимерных частиц решалась из условий лучистого и конвективного теплообмена при ламинарном режиме обтекания с учетом текущей координаты и полученной базы данных двухмерного распределения скорости и температуры плазменной струи. Решение теплофизической задачи для полимерных материалов составляет значительную сложность за счет градиента температур вдоль радиуса частицы вследствие низкого коэффициента теплопроводности полимера, агломерирования мелких частиц при осаждении плазменной струей, наличия, помимо температур плавления, характерных температур текучести и интенсивных потерь массы с узким интервалом между ними [3].

Исследование нагрева, плавления сферической частицы при ее движении в высокотемпературной газовой среде с известным полем скоростей и температур сводится к решению уравнения нестационарной теплопроводности [4]

$$\frac{dw_{сп}}{dt} = \frac{3}{8} C_D \frac{r_f}{r_p} |w_f - w_p|(w_f - w_{zp}),$$

где $C_D = \varphi(Re_p)$ - коэффициент аэродинамического сопротивления сферической частицы; $Re_p = 2r_f r_p |w_f - w_p|/h^*$ - число Рейнольдса, построенное по относительной скорости частицы; $h^* = [h(T_{p,гр}) h(T_f)]^{1/2}$ - приведенная динамическая вязкость газа; $T_{p,гр}$ - температура внешней поверхности частицы; T_f - температура несущего потока; r_f - плотность газа при средней температуре между температурой поверхности частицы и локальной температурой несущего потока; r_p - плотность материала частицы; r_p - ее радиус.

Температурное поле внутри частицы определялось из уравнения нестационарной теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_p c_p T_p = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r}, \quad 0 < r < r_p,$$

где λ_p , c_p - теплопроводность и удельная теплоемкость частицы.

Найденная температура и скорость частиц в момент столкновения о подложку, вместе с данными о длительности осаждения, скорости или законе перемещения плазматрона, типе подложки (материале, свойстве и шероховатости) служат входными для стадии взаимодействия плазменной струи и расплавленных частиц порошка с основанием.

В момент попадания частиц на поверхность происходит удар частицы о твердую поверхность и ее деформация, растекание частицы по поверхности, слияние, коалесценция частиц.

Результатами моделирования 3-й стадии процесса являются информация о характере деформирования расплавленных частиц порошка при встрече с основанием, форма, толщина напыляемого покрытия, пористость, прочность адгезионного соединения и др.

Таким образом, предложена концепция комплексного моделирования процесса плазменного напыления полимерных материалов, объединяющего математические модели всех стадий процесса, базу данных характеристик плазменных установок, свойств плазмообразующих газов, материалов покрытий.

Литература

1. Донской А.В., Клубникин В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Л. : Машиностроение. 1979. 221 с.
2. Иванов Е.М. Инженерный расчет теплофизических процессов при плазменном напылении. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1983. 140 с.
3. Родченко Д.А., Ковальков А.Н. О нагреве полимерных частиц при распылении плазменной струей // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1985. № 4. С. 108-113.
4. Нанесение покрытий плазмой / В.В.Кудинов, П.Ю.Пекшев, В.Е.Белощенко и др. М.: Наука. 1990. 408 с.

ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Цырлин М. И.

Белорусский государственный университет транспорта

Одним из перспективных методов получения покрытий из порошковых полимерных материалов является плазменное напыление. Напыление с помощью низкотемпературной плазмы позволяет значительно сократить длительность технологического процесса, уменьшить расход материала, наносить покрытия на крупногабаритные изделия сложной формы и из различных материалов.

Как показали исследования [1] для термореактивных полимеров кратковременность высоких температур, УФ-облучения и активных частиц

плазмы способствует протеканию химических реакций сшивки цепей полимеров и частичной деструкции. Установлено, что на конкурирующие процессы структурирования и деструкции существенное влияние оказывают технологические параметры плазменного процесса, что во многом определяет физико-механические и защитные свойства покрытия.

Защита металла от коррозии полимерными покрытиями определяется механической изоляцией металла от агрессивной среды, адгезией, торможением электродных реакций, обуславливающих коррозионный процесс, структурными превращениями в пленках [2].

Цель описываемой работы - изучение защитных свойств получаемых покрытий.

Объектом исследования служили покрытия, формируемые из порошковой эпоксидной смолы Э-49П. В качестве отвердителя использовали дициандиамида в количестве 2, 5 % по массе. Активной добавкой, катализирующей процесс структурирования полимера и повышающей термостабильность полимера, выступал оксид цинка.

Композицию получали смешиванием компонентов в расплаве при температуре 393 К в течение 120с, дроблением и последующим помолом до частиц 60 - 100 мкм.

Покрытия наносили на образцы из стали и алюминия СВЧ-плазменным осаждением и, для сравнения, в электростатическом поле с последующей термообработкой.

Оценку защитных свойств покрытий производили емкостно-омическим способом по изменению емкости и сопротивления при различных частотах в течение 30 суток.

Пористость покрытия, как суммарная площадь сквозных дефектов, оценивали электрохимическим методом, снятием анодных поляризационных кривых в гальваностатическом режиме и определении предельных токов [3].

Адгезию определяли методом решетчатых надразов.

Электрическая прочность покрытий определялась величиной напряжения, вызывающего пробой диэлектрика и приходящегося на единицу толщины покрытия.

Результаты экспериментов свидетельствуют, что емкость и сопротивление остаются первоначальными, сохраняется стабильной также их частотная зависимость.

Практически беспористые плазменные покрытия получены из эпоксидной композиции при толщине слоя 60 - 70 мкм. Покрытия, нанесенные

электростатическим методам беспористы при толщине 85 - 100 мкм. Это объясняется тем, что при плазменном напылении происходит достаточно высокое деформирование проплавившихся частиц полимера при ударе о поверхность подложки. Это приводит к нормальному растеканию и коалесценции частиц.

Плазменные эпоксидные покрытия имели высокую адгезию. Определение адгезии методом решетчатых надрезов показало, что у покрытий края надрезов остаются гладкими и не отслаиваются (адгезия 1 балл).

При испытаниях плазмоосажденных покрытий получено, что электрическая прочность их превышает соответствующие данные для покрытий, нанесенных традиционными способами. По-видимому, это связано с формированием при плазменном напылении более плотного беспористого полимерного покрытия.

Таким образом, отсутствие пористости и высокая адгезия предопределяет повышенные антикоррозионные свойства плазменных покрытий.

Литература

1. Цырлин М. И., Родченко Д. А. Формирование покрытий из термоотверждаемых полимеров с использованием плазмы СВЧ-разряда // Материалы, технологии, инструмент. 1997. №3. С. 35-38.
2. Карякина М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий. М.: Химия. 1988. 272 с.
3. Богданов В. П., Родченко Д. А., Корецкий Г. В. Электрический метод определения суммарной площади сквозных дефектов в диэлектрических покрытиях // Заводская лаборатория. 1986. №1. С. 17-19.

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РАСЧЁТА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Кондратьюк В. Ф.

Белорусская государственная политехническая академия

Широко используемые в настоящее время для расчёта конструкций точные методы (МКЭ, МГЭ, МКР) могут испытывать затруднения в решении задач сложной пространственной конфигурации, оставаясь весьма эффективными в частных случаях (например, в расчётах конструкций с линейными элементами - стержневые системы).

Предлагаемый способ, основанный на принципах механики, эффек-

тивнее в расчётах деталей типа базовых: рам автомобилей, корпусов, станин и других несущих конструкций при наличии сложной конфигурации, а также массивных элементов. Незначительное число уравнений в сравнении с сеточными методами позволяет оперативно оценивать различные конструктивные варианты как на стадии проектирования, так и при их дальнейшем совершенствовании, что очень важно для разработки оптимальных решений.

Простейшая расчётная схема рассматривает конструкцию как монолитную, поэтому здесь уместны в основном интегральные оценки, особенно вблизи поверхности детали. Но в этом случае, даже для конструкций со сложной геометрией, можно получить приемлемые результаты. Примером может служить выполненный нами расчёт верхней станины горячештамповочного прессы К8544 усилием прессования 25МН при предельном сжатии. При рабочей нагрузке пришлось отказаться от получения глобального решения, а найти его лишь в локальной зоне, определяемой опытом эксплуатации и экспериментальными исследованиями. В других опасных зонах оказалось возможным качественно установить тенденцию изменения напряжённо-деформированного состояния при различных конструктивных решениях. Так удалось предложить более удачный вариант и повысить циклическую прочность и как следствие долговечность. Количественные оценки были выполнены экспериментально на моделях и натуральных образцах.

Указанный пример привёл к необходимости разработки теории использования кинематических и статических связей различной природы. Мы пришли к выводу, что даже сами ряды аппроксимирующих функций не обязательно удовлетворяют условиям закрепления и нагружения. Оказалось возможным весь ряд подчинить необходимым условиям с помощью связей как внутренних, так и поверхностных.

Опуская описание всего пути и всех возможностей указанного подхода, отметим последнюю концепцию, которая заключается в том, что конструкция делится на несколько частей, если:

- необходимо подробнее исследовать наперёд заданную зону;
- установить взаимодействие различных элементов конструкции;
- учесть неодинаковые механические свойства различных элементов;
- необходимо выделить особенности задачи, например, учесть сосредоточенную силу;
- уточнить неоднородные граничные условия;

- требуется выполнить однородные условия на границах многосвязных областей;
- необходимо учесть наличие раскрываемых трещин и т.д.

Понятно, что это применимо для определённого класса задач, расширяемого по мере разработки метода.

Деление конструкции на части диктуется условием задачи и не является природой метода. При решении задач плоского деформирования квадрата двумя сосредоточенными силами из однородного изотропного материала [1] для получения приемлемого решения на 70% площади квадрат описан 1680 уравнениями. Такой результат получен с помощью десятков уравнений [2], причём с точным выполнением неоднородных условий в рамках данного приближения.

Пример опубликован, поэтому мы лишь кратко остановимся на его описании.

С помощью уравнений статических связей выполнить однородные условия не представляет затруднений. Чтобы удовлетворить статическим условиям на гранях, где приложены силы, был использован следующий приём.

Квадрат представлялся двумя частями: небольшой зоной вблизи приложения силы (учтена симметрия задачи) и остальной частью, которые соединены по точкам при равенстве перемещений и напряжений. Теперь часть квадрата с вырезом имеет только однородные граничные условия, выполнить которые весьма просто. После “сшивания” сосредоточенная сила оказывается только в небольшой зоне, размер которой определится разрешающей способностью компьютера.

Приём можно легко распространить на реальные конструкции, когда на один или несколько элементов накладывается максимально возможная информация, а остальная часть описывается интегрально или с незначительным уточнением условий. Используя численный эксперимент, можно уточнять расчётную схему в смысле точности соединения отдельных частей: по перемещениям и по напряжениям, и по различным производным, приближаясь тем самым к сплайн- аппроксимации.

В заключение отметим, что описанный алгоритм не претендует на абсолютную универсальность решения задач, а лишь указывает на некоторые преимущества в отдельных случаях и “сфера влияния” различных методов может расширяться по мере их разработки. Использование же различных подходов только увеличит надёжность расчёта, поэтому они не должны противопоставляться.

Литература

1. Л.А. Розин. Расчёт гидротехнических сооружений на ЭВМ. Метод конечных элементов. Изд. "Энергия", Л., 1971.
2. В.Ф. Кондратюк. Сравнительная оценка методов решения вариационного уравнения Лагранжа для плоской задачи упругого деформирования квадрата. Известия АН БССР. Серия физико-математических наук. Рукопись депонирована в ВИНТИ, №3484-В89 от 26.05.89.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ТРЕНИЯ

*Акулич Я.А., Гладыщук В.Б., Кузавко Ю.А., Склипус Б.Н.
Брестский политехнический институт*

Бурное развитие вычислительной техники за последние годы, разработка и внедрение все более мощного и совершенного компьютерного оборудования, привело к значительному усовершенствованию систем ультразвуковой диагностики, которая широко используется как в научных исследованиях, так и при решении большого круга практических задач, возникающих в условиях современного производственного процесса. В настоящее время, при проведении неразрушающих испытаний часто возникает необходимость в получении акустического изображения объекта, подвергаемого испытаниям. Получить необходимую информацию при сканировании объекта с использованием акустических волн и сформировать его визуальное изображение представляется возможным при использовании систем ультразвуковой визуализации. Методы ультразвуковой визуализации уже получили широкое применение в различных областях науки и техники: неразрушающий контроль качества продукции, медицинская диагностика, диагностика материалов и изделий. Однако, в исследованиях, направленных на обеспечение надежного функционирования механизмов, где немаловажное значение имеет техническая диагностика и контроль процессов трения и изнашивания, применение методов ультразвуковой визуализации представляется новым и достаточно перспективным.

В основе метода ультразвуковой визуализации лежит возможность преобразования поля акустических сигналов, отраженных неоднородностями диагностируемого объекта, в его акустическое изображение (АИ). В

зависимости от поставленной задачи, осуществляется та или иная обработка поля принятых акустических сигналов, при вводе необходимых параметров для их преобразования.

Для реализации ультразвуковой диагностической визуализации объектов трения использовался разработанный нами ультразвуковой диагностический комплекс (УДК). Данное устройство представляет собой гибкую модульную систему, основу которой составляет ультразвуковой диагностический эхотомоскоп ЭТС-У-02, имеющий сканирующие пьезокерамические преобразователи. УДК включает в себя также персональный компьютер (ПК), построенный на быстродействующем микропроцессоре 80486DX4-100, фирмы Intel снабженный специальным видеоадаптером с TV тюнером, фирмы S3 inc., а также лазерный принтер и оптический сканер.

Принцип работы ультразвукового диагностического эхотомоскопа основан на использовании метода эхо-импульсной ультразвуковой локации исследуемого объекта с механическим секторным или электронным линейным сканированием. Ультразвуковой сканирующий преобразователь содержит пьезокерамический модуль, который осуществляет излучение ультразвуковых зондирующих сигналов в исследуемую среду и их прием при отражении. Принятые эхосигналы усиливаются, преобразуются в цифровой код (в нашем случае 5-битовый), предварительно программно обрабатываются и из памяти считываются в реальном масштабе времени на видеоконтрольное устройство для регистрации акустических изображений.

Для проведения экспериментальных исследований были использованы ультразвуковые преобразователи, рабочие частоты которых составляли 3,5; 5 и 7,5 МГц. В результате проведенных испытаний были получены двухмерные изображения поперечных сечений пар трения типа «вал-втулка».

При экспериментальных исследованиях, в камеру машины трения 2070 СМТ-1, модернизированную нами для проведения испытаний с использованием УДК, помещалась исследуемая пара трения. В качестве вала, использовалась деталь изготовленная из стали 40Х, а материалом втулки был чугун СЧ-25. В качестве среды, заполняющей испытательную рабочую камеру, использовалось масло индустриальное И-40А или дистиллированная вода. К испытательной камере был подведен ультразвуковой сканирующий датчик, закрепленный в специальном устройстве, позволяющем перемещать его в горизонтальной плоскости. Частота вращения

вала была постоянной и составляла 400 min^{-1} . Нагружение пары трения производилось последовательно, путем пошагового увеличения нагрузки на 500 Н .

На рисунке 1 приведены акустические изображения пары трения «вал-втулка» при разных режимах нагружения. Их последующая обработка с целью улучшения качества изображений осуществлялась с использовани-

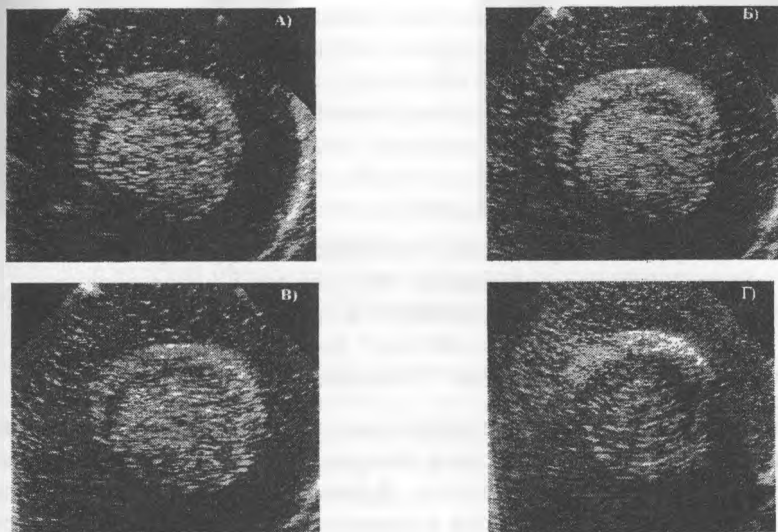


Рисунок 1 Акустические изображения пары трения "вал-втулка", при разных режимах нагружения: А) Частота вращения $n=0 \text{ min}^{-1}$; Нагрузка $N=0 \text{ Н}$; Б) Частота вращения $n=400 \text{ min}^{-1}$; Нагрузка $N=0 \text{ Н}$; В) Частота вращения $n=400 \text{ min}^{-1}$; Нагрузка $N=500 \text{ Н}$; Г) Частота вращения $n=400 \text{ min}^{-1}$; Нагрузка $N=2000 \text{ Н}$.

ем, как специально разработанного программного обеспечения, так и стандартных программных пакетов. В результате сопоставления обработанных изображений можно четко проследить взаимосвязь динамики изменения параметров АИ, с изменением величины нагружения пары трения. Однако, следует отметить, что описанный выше алгоритм ультразвуковой визуализации процессов трения сопряжен с определенными трудностями, обусловленными возникновением в результате отражений и преобразований ультразвуковых колебаний в контролируемом твердотель-

ном объекте трения, ложных изображений, для устранения которых, предлагается метод совмещения АИ с их оптическими аналогами (Рисунок 2).

С выхода эхотомоскопа АИ, через видеоадаптер, поступает в ПК. Туда

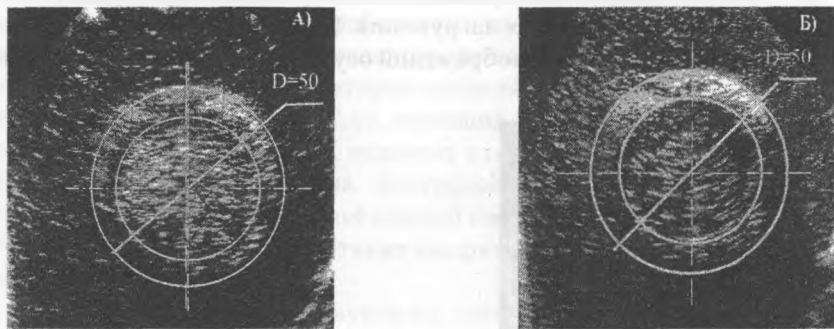


Рисунок 2 Акустические изображения пары трения "вал-штулка", при разных режимах нагружения, с использованием метода совмещения акустического и оптического изображения: А) Частота вращения $n = 400 \text{ min}^{-1}$; Нагрузка $N = 500 \text{ Н}$; Б) Частота вращения $n = 400 \text{ min}^{-1}$; Нагрузка $N = 2000 \text{ Н}$.

же вводится и оптическое изображение чертежа сечения исследуемого объекта с помощью оптического сканера. Затем, программно осуществляется их совмещение и обработка. В результате удается устранить ложные изображения и появляется возможность установления качественно новых критериев определения трибологических характеристик объектов, подвергающихся трению, по площади и яркостным характеристикам областей их контакта.

ПОРОШКОВЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

*Машинский В.В., Мартиновская О.В.
Брестский политехнический институт*

Высокая эффективность порошковой металлургии реализуется при изготовлении изделия, которые невозможно или невыгодно получать другими методами. Это, например, фрикционные изделия на железной основе для высоконагруженных тормозных систем, контактные изделия на

основе серебра и из вольфрамо-медного сплава, фильтры из металлических порошков, твердые инструментальные сплавы, уплотнительные устройства центробежных насосов, самосмазывающиеся подшипники скольжения и многие другие детали, без которых сегодня немыслимо создание новой техники и технологии. Метод порошковой металлургии позволяет также изготавливать машиностроительные материалы и изделия, которые могут быть получены и другими методами, но с иными технико-экономическими показателями. Решающими факторами при переводе изготовления изделия на метод порошковой металлургии является их себестоимость, трудоемкость и технологичность, масштабы производства. Хотя стоимость порошков выше стоимости компактных материалов, однако расходы на основные материалы на единицу продукции порошковой металлургии всегда ниже, чем, например, при обработке металлов резанием. Объясняется это прежде всего повышением коэффициента использования металла до 0,97 против 0,5÷0,6 при обработке резанием. Практика показала, что порошковые изделия обладают и значительной эксплуатационной стойкостью [1], особенно изделий, работающих в условиях высоких нагрузок и агрессивных сред.

Еще больший эффект достигается при изготовлении изделий из порошков дорогих и редких металлов, когда стоимость отходов металлообработки намного превышает производственные расходы [2].

Особое место в машиностроении, очевидно, занимают не антифрикционные или магнитно-твердые сплавы, а порошковые конструкционные стали, которые подвергаются различным видам термической обработки (закалке, отжигу, отпуску, нормализации) для изменения каких-либо физических свойств. Основные закономерности термической обработки порошковых сталей и процессы, протекающие при их нагреве и охлаждении, аналогичны соответствующим процессам для компактных материалов. Однако наличие пористости, неоднородность структуры требуют корректировки, а в ряде случаев и изменении режимов, условий и приемов термообработки спеченных сталей, которые могут значительно отличаться от обработки компактных материалов соответствующего химического состава.

Основное влияние на процессы превращений оказывает пористость. Прежде всего поры препятствуют росту зерна аустенита, размер которых в порошковых сталях намного меньше, чем в компактных [1].

Уменьшение пористости сталей сопровождается прогрессирующим ро-

стом зерна. Соответствующая термическая обработка высокоплотных сталей способствует получению более мелкозернистой и однородной структуры, чем после спекания порошков.

Пористость оказывает влияние на положение критических точек, вызывая их смещение по сравнению с компактными материалами: с ее повышением с 15 до 40% точки A_{c1} снижаются с 800 °С до 600 °С, точки A_{g1} повышаются с 500 °С до 900 °С. Основная причина такого явления – снижение теплопроводности высокопористых сталей. Пористость влияет и на температуру начала мартенситного превращения (M_n), смещая её в область повышенных температур. (Например, для стали У12 повышение пористости от нуля до 30% повышает M_n с 200 °С до 320 °С).

Введение легирующих элементов в порошковые стали, особенно хрома и молибдена, существенно влияет на содержание углерода в твердом растворе закаленных сталей. Так, в стали ЖГр1 углерода 0,77%, в стали ЖГр1Х2М2 — 0,68%, в стали ЖГр1Х12М2 — 0,28%. При этом наблюдается и резкое снижение твердости этих сталей после закалки, соответственно с HRC₃ 60 до HRC₃ 40. Это объясняется тем, что содержание углерода в мартенсите хромомолибденовых спеченных сталей тем меньше, чем больше в них хрома и молибдена, так как значительное количество углерода связывается в карбиды легирующих элементов. В связи с повышением температуры закалки до 840-970 °С, соответственно для сталей ЖГр1 и ЖГр1Х12М2, увеличивается количество остаточного аустенита, который становится более однородным и устойчивым. Обработка холодом при температурах ниже конца мартенситного превращения в течение 2000-5000 с сразу же после закалки снижает процент остаточного аустенита с 25 до 10%, однако это не приводит к повышению твердости. Продолжительность нагрева, как и для компактных сталей, зависит от размеров изделия и от скорости превращений. В качестве охлаждающей среды при закалке рекомендуется применять воду, водные растворы солей, щелочей (10% раствор NaOH) и масло. Положительное влияние на закаливаемость спеченных сталей оказывает подвод ультразвуковых колебаний к охлаждающей жидкости из-за быстрого разрушения паровой рубашки и облегченного проникновения жидкости вглубь материала, что обеспечивает повышение скорости охлаждения [1, 2].

Литература

1. О.В.Роман, И.П.Габриелов. Порошковая металлургия — безотходная энергосберегающая технология. Мн., “Беларусь”, 1986.

2. С.С.Ермаков и др. Металлокерамические детали в машиностроении. М., 1977.
3. В.Н.Анциферов и др. Структура спеченных сталей. М., 1981.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОТРАНСПОРТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ТРУБЧАТОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА

*Ранский В.А., Есавкин В.И.
Брестский политехнический институт*

Работа вибротранспортирующего устройства оценивается коэффициентом режима Γ :

$$\Gamma = A \cdot \omega^2 \sin(\alpha + \beta) / (g \cos \alpha);$$

где A – амплитуда направленных колебаний,

ω – угловая скорость грузонесущего органа,

β – угол наклона грузонесущего органа,

α – угол направления колебаний относительно продольной оси грузонесущего органа,

$g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ – ускорение свободного падения.

Для вибротранспортирующего устройства с трубчатым рабочим органом амплитуда колебаний $A = 2r$, где r – величина эксцентриситета.

Одно и то же значение коэффициента режима Γ можно получить, варьируя различными значениями параметров A , ω , β , α . Увеличение амплитуды при одном и том же значении Γ дает большее приращение скорости, чем увеличение частоты колебаний. Для мелкодисперсных грузов амплитуду выбирают максимально возможной.

Производительность известных конструкций вибротранспортирующих устройств определяется по формуле:

$$\Pi = 3600V \cdot V \cdot H,$$

где V – ширина желоба (в свету),

H – высота слоя груза,

V – средняя скорость транспортирования насыпного груза.

Скорость перемещения материала является одним из наиболее трудно определяемых параметров. Она зависит от физико-механических свойств груза и при одних и тех же режимах транспортирования может иметь раз-

личные значения. Много работ по определению скорости перемещения материала выполнено д.т.н. Гончариевым И.Ф. Фактическое значение скорости перемещения сыпучего материала можно получить лишь экспериментальным путем. Поэтому во все расчетные формулы вводятся опытные коэффициенты.

Производительность вибротранспортирующего устройства с трубчатым грузонесущим органом можно определить:

$$\Pi = 3600FV\cos\beta, \text{ (м}^3\text{/час)}$$

где $F = \pi d^2 k_{\text{н}}/4$ – площадь поперечного сечения потока материала,
 d – диаметр грузонесущего органа,
 $k_{\text{н}}$ – коэффициент наполнения.

Как показали экспериментальные исследования, оптимальный коэффициент наполнения равняется 0,1.

Скорость перемещения материала определяем по формуле:

$$V = k\pi n\cos\beta/30,$$

Где k – коэффициент транспортабельности (зависит от физико-механических свойств материала),
 n – частота вращения эксцентрика.

Оптимальная высота подбрасывания частицы материала для обеспечения максимальной скорости перемещения должна равняться амплитуде колебаний в вертикальной плоскости и диаметру грузонесущего органа, т.е.

$$h = A + d,$$

но в то же время $A = 2r$.

По экспериментальным данным величина эксцентриситета определяется

$$r = d/(3,2\rho k_0),$$

где d – диаметр грузонесущего органа,
 ρ – коэффициент кратности периода полета частицы материала,
 k_0 – коэффициент области возможных регулярных режимов движения частицы материала с непрерывным подбрасыванием.

Литература

1. Гончаревич И.Ф., Фролов К.В. Теория вибрационной механики и технологии, М. «Наука», 1981.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБНОЙ ДЛЯ
ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА
ВИБРОТРАНСПОРТИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ С
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ТРУБЧАТОГО
РАБОЧЕГО ОРГАНА**

Ранский В.А., Есавкин В.И.

Брестский политехнический институт

В электрическую схему экспериментальной установки был подключен измерительный комплект К-51, позволяющий производить замеры потребляемой мощности при различных режимах работы.

Замеры потребляемой мощности производились в двух режимах: в рабочем режиме при транспортировании сыпучего материала (песка) и в холостом режиме при тех же скоростных параметрах.

Разность потребляемой мощности рабочего и холостого режимов давала мощность, необходимую на перемещение сыпучего материала,

$$P_n = P_p - P_{xx}$$

где P_n – мощность, необходимая на перемещение материала,

P_p – мощность рабочего хода,

P_{xx} – мощность холостого хода.

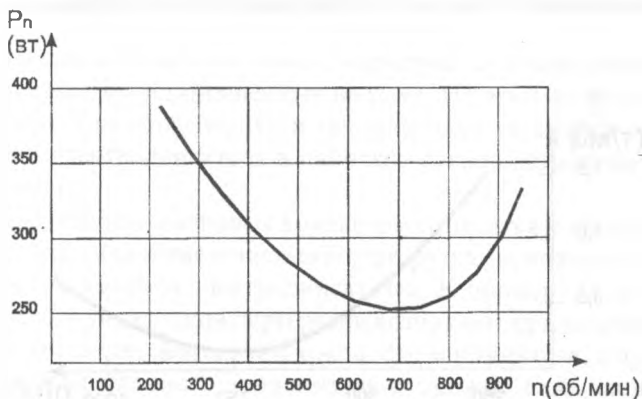


Рис. 1.

После обработки полученных экспериментальных данных было получено уравнение регрессии по определению потребляемой мощности на пе-

ремещение песка

$$P_n = 0,00062n^2 - 0,893/n + 566,5$$

где n – частота вращения эксцентрика.

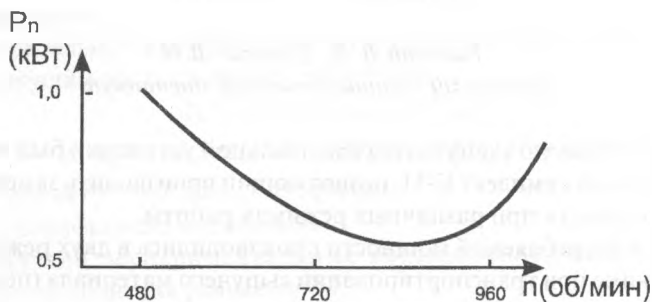


Рис. 2.

По полученному уравнению построена экспериментальная зависимость, показанная на рис. 1.

Анализируя полученную зависимость можно сделать вывод, что мощность, потребляемая на перемещение материала с изменением частоты вращения эксцентрика изменяется и минимальная потребная мощность на-

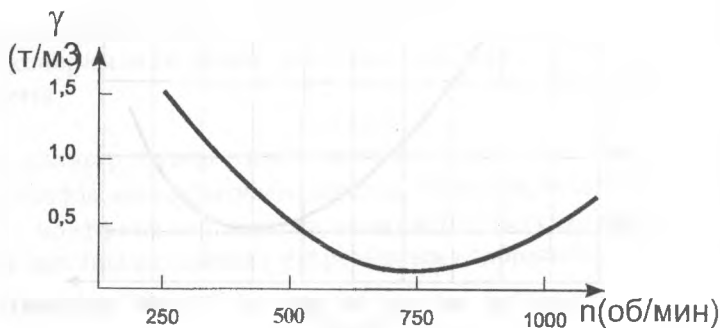


Рис. 3.

ходится при частоте вращения 600...800 об/мин.

Правильность данных экспериментальных зависимостей подтвержда-

ется исследованиями И.Ф. Гончаревича /1/. На рис. 2. представлена зависимость энергозатрат от частоты колебаний вибронесущего органа.

Снижение энергозатрат при транспортировании песка в пределах частоты колебаний энергонесущего органа 600...800 об/мин, объясняется изменением насыпного веса песка от воздействия на него вибрационной нагрузки.

На рис. 3 показана зависимость изменения насыпного веса песка от частоты вращения эксцентрика.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что минимальная мощность, затрачиваемая на перемещение песка, зависит от частоты вращения эксцентрикового вала, находящейся в пределах 600...800 об/мин.

Литература

1. Гончаревич И.Ф. и др. Вибрационные грохоты и конвейеры. М., Госгориздат, 1960.

УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ПЕРЕГРУЗКИ ШНЕКОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Есавкин В.И., Ранский В.А.

Брестский политехнический институт

Привод большинства шнековых конвейеров осуществляется от электродвигателей жестко установленных на раме. На этой же раме монтируется редуктор и сам конвейер. При такой системе установки существует жесткая связь электродвигателя и рабочего органа конвейера (шнека) в системе привода.

По режиму работы шнековые конвейеры относятся к машинам, работающим в тяжелом режиме с частыми перегрузками, которые вызывают зачастую выход из строя электродвигателей. К примеру, для шнековых питателей бетоноукладчиков перегрузки возникают при изменении жесткости бетонной смеси, изменении крупности заполнителя, а при использовании не сортированного заполнителя возможно даже заклинивание шнека, что в конечном счете вызывает выход из строя электродвигателя.

Устранить подобные недостатки предлагается исключением жесткой связи электродвигателя и рабочего органа. Конструктивно такое решение возможно путем установки электродвигателя с возможностью его по-

ворота вокруг оси вала.

На рисунке 1 приведена схема устройства. Устройство содержит электродвигатель 1, приводящий во вращение шнек конвейера 7 через редуктор 6. На корпусе электродвигателя установлены кронштейны 3 с осями 2, свободно перемещающимися в пазах 8 кронштейнов 5. Причем сами

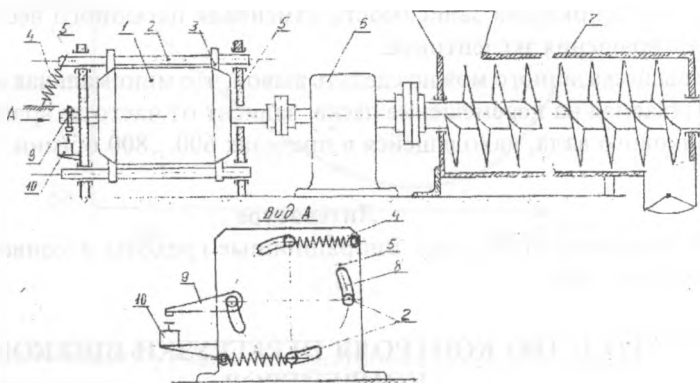


Рисунок 1

оси подпружинены пружинами 4. На одной из осей 2 установлен рычаг 9, а на кронштейне 5 установлен концевой выключатель 10.

Работает устройство следующим образом. При вращении шнека величина вращающего момента на его валу изменяется по ряду причин. Если транспортируемый материал тестообразный, то величина вращающего момента зависит от пластической прочности, крупности заполнителя и его вида (сортированный или не сортированный). При изменении пластической прочности величина вращающего момента на валу шнека изменяется. Изменяется в конечном счете и величина вращающего момента на валу электродвигателя 1. На статоре электродвигателя возникает реактивный момент, изменяющийся по величине пропорционально величине вращающего момента вала электродвигателя. При подвижной установке статора изменение величины момента вызывает его поворот на разные углы. При перегрузке угол поворота будет максимальным, что приводит к повороту рычага 9 и отключению электродвигателя конечным выключателем 10.

Установка электродвигателя с возможностью его поворота позволяет определять и регулировать пластическую прочность формовочной или транспортируемой массы без применения сложных электрических устройств (датчиков усилий, скорости, температуры и устройств, регулирующих подачу воды в зависимости от мощности потребляемой электродвигателем).

С этой целью поворотный рычаг 9 может быть присоединен к устройству показывающему величину пластической прочности или к регулятору подачи воды.

Литература

1. Авторское свидетельство СССР N413039, кл В28В 3722, 1972.
2. Паращенко О.Д. и др. Регулятор влажности глиняного бруса. Информационный листок «НИИСМИ», Киев, 1975.

ОГРАНИЧИТЕЛЬ ПЕРЕГРУЗКИ ШНЕКОВЫХ КОНВЕЙРОВ

Есавкин В.И., Ранский В.А.

Брестский политехнический институт

С целью автоматического выключения привода конвейера при работе с кратковременной динамической нагрузкой и в случае неисправности регулятора подачи воды совместно с механической системой контроля перегрузки возможно применить ограничитель перегрузки (ОП). Электрическая схема которого приведена на рисунке 1.

Работа ОП основана на принципе сравнения перемещения, измеряемого датчиком ДП, с предельно допустимой величиной перемещения, задаваемой датчиком ДЗ. Измеряемое и допустимое перемещение преобразуется датчиками в электрический сигнал (напряжение) и сравнивается при помощи поляризованного реле РП, включенного в измерительную диагональ моста, составленного из датчиков ДП и ДЗ. Для изменения пределов уравнивания моста (настройки срабатывания ОП при различном виде транспортируемого материала в зависимости от крупности, от абразивности и влажности), последовательно с ДЗ включены регулируемые сопротивления R_4 и R_{19} . Датчик перемещений закреплен на основании неподвижно, а его подвижный контакт установлен на поворотном рычаге приводного двигателя. Задающий датчик ДЗ установлен в релей-

ном блоке. Регулировку ДЗ производят в зависимости от мощности, потребляемой электродвигателем.

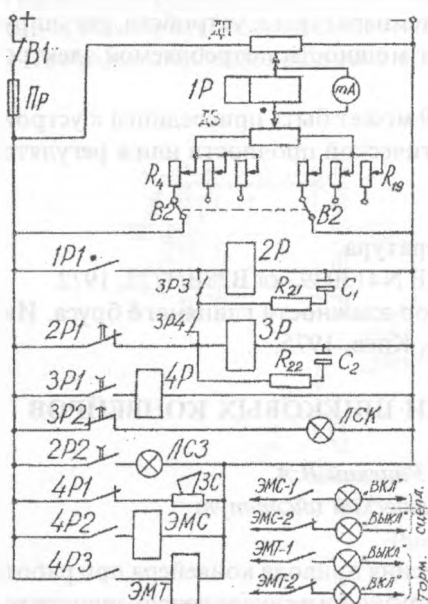


Рисунок 1 - Принципиальная эл.схема ОП (контакты показаны в состоянии работы с перегрузкой)

Включение питания производится тумблером В1 при пуске электродвигателя. В диагональ моста включен измеритель - реле 1Р (поляризованное). Для визуального наблюдения параллельно реле включен миллиамперметр, измеряющий величину рассогласования моста, пропорциональную степени перегрузки конвейера.

Для получения задержки времени на отключение и включение исполнительного реле 4Р, в схему включены два реле задержки времени 2Р и 3Р. Они защищают исполнительные механизмы от ложных срабатываний при кратковременных динамических (неопасных) перегрузках конвейера. Задержка времени достигается шунтированием обмоток реле 2Р и 3Р емкостями С1 и С2 и сопротивлениями R_{21} и R_{22} с помощью переключаемых контактов.

При работе с кратковременной перегрузкой сигнал от датчика ДП вначале станет равным сигналу от датчика ДЗ, а затем превысит его. Обмотка реле 1Р обесточится, его контакт 1Р1 разомкнется и ограничитель сработает. Когда исчезнет кратковременная погрузка сигнал от ДП станет меньше сигнала от ДЗ, реле вновь замкнет контакт 1Р1, а цепи управления с некоторой задержкой времени будут восстановлены. Реле 3Р с выдержкой времени замкнет свой контакт 3Р1, чем включит реле 4Р, которое включит исполнительные механизмы привода конвейера при помощи электромагнитов ЭМС и ЭМТ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МНОГООПЕРАЦИОННОГО СТАНКА

*Григорьев В. Ф., Горбунов В. П.
Брестский политехнический институт*

Большое влияние на точность обработки оказывает точность установки рабочих органов станка с ЧПУ в запрограммированное положение (точность позиционирования). Практически на всех операциях обработки, характерных для станков с ЧПУ, точность позиционирования является доминирующей в формировании параметров “точность размера” и “точность формы”.

Исследовалась система привод подач — подвижный рабочий орган многоцелевого станка МС12-250. Многоинструментальный многокоординатный станок с программным управлением повышенной точности предназначен для обработки сложных малогабаритных корпусных деталей, точностные параметры которых находятся в пределах от 5 до 10 мкм.

Рассматриваемая система привод подач (подвижный рабочий орган состоит из двигателя, зубчатой ременной передачи, шариковой винтовой пары с двухопорным винтом, суппорта и измерительного преобразователя), является унифицированным узлом координатных перемещений и может рассматриваться как типовая система станков малого класса. Измерительное устройство в цепи обратной связи — линейный измерительный преобразователь типа индуктосин непосредственно связан с перемещаемым узлом, осуществляющим прямолинейное движение.

Целью настоящего исследования было определение области состояний параметров траекторий, по которым будут оцениваться точностные характеристики движения рассматриваемой системы и зоны позиционирования.

Точность перемещения и позиционирования рабочего органа станка зависит от параметров системы - конструкции и качества направляющих, системы смазывания, точности отсчетно-измерительных систем, качества регулирования системы обратной связи, жесткости элементов привода, устойчивости и стабильности электрических сигналов. Параметры системы изменяются под воздействием различных эксплуатационных нагрузок. Поэтому точность перемещения рабочих органов и точность их позиционирования, измеренные в режиме холостого хода, следует рассматривать

как предварительные, но достаточно информативные, интегральные характеристики точности системы станок-ЧПУ.

В качестве выходного параметра принималась точность позиционирования, как точность реализации конечной точки траектории. Испыта-

Таблица 1 - Показатели точности позиционирования рабочего органа в микрометрах

| Скорость позиционирования мм/мин | Показатель точности позиционирования | | | | | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|-------------|--------------|--------------|----------------|-------------|-----|
| | P_{α} | P_{β} | P_{γ} | P_{δ} | P_{ϵ} | P_{ζ} | U |
| 1000 | 46 | 16 | 47 | 22 | 55 | 16 | 5 |
| 1500 | 50 | 12 | 50 | 13 | 50 | 17 | 4 |
| 2000 | 44 | 8 | 48 | 8 | 46 | 7 | 2 |

ния проводились с использованием измерительного комплекса "Сигнал-1" (ИНДМАШ АН РБ) по разработанной методике, с необходимой статистической обработкой результатов измерений. На рисунке 1 приведены графики средних значений отклонений от заданного положения рабо-

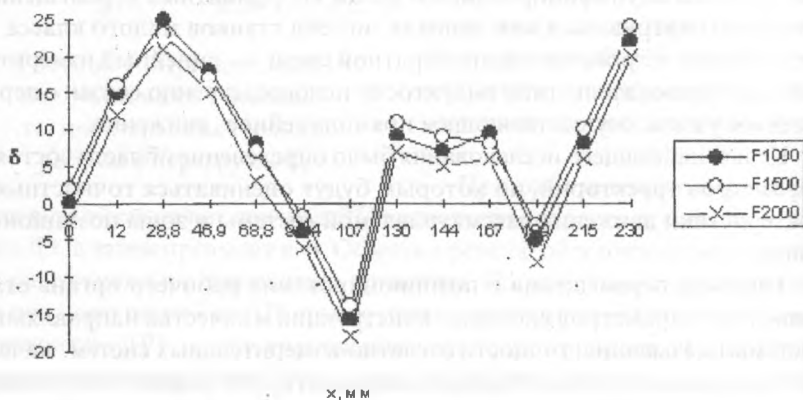


Рисунок 1 - Среднее значение отклонений рабочего органа от заданного положения при одностороннем подходе, мкм

чего органа (координата X) станка при одностороннем подходе, а в таблице 1 усредненные показатели точности позиционирования: P_a , P_r - точность позиционирования при одностороннем подходе в прямом и обратном направлении соответственно; P_{s_a} , P_{s_r} - стабильность позиционирования при одностороннем подходе в прямом и обратном направлении; P_a - точность позиционирования при двухстороннем подходе; P_{s_a} - стабильность позиционирования при двухстороннем подходе; U - зона нечувствительности при реверсировании, определенные для трех значений скорости позиционирования - 1000, 1500, 2000 мм/мин.

Проведенные испытания показали, что характеристики системы привод-стол станка не соответствуют нормативно-техническим условиям, поскольку допуски соответствующих параметров для станков класса П на длине перемещения от 160 до 250 мм составляют: P_a , $P_r = 10$ мкм; $P_{s_a} = 12$ мкм; $P_s = 5$ мкм; $U = 4$ мкм.

Таким образом, результаты испытаний точности позиционирования позволяют объективно оценить качество станка и разработать мероприятия по повышению его эксплуатационных точностных характеристик.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕДАЧ С ГИБКОЙ СВЯЗЬЮ

*Борисенко Л.А., Алексеева О.В., Машаров А.А.
Могилевский машиностроительный институт*

Важнейшая задача, стоящая перед промышленностью Республики Беларусь - достижение мирового уровня развития техники и технологий. В настоящее время промышленность Беларуси соответствует четвертому технологическому укладу, ядром которого является автомобиле- и тракторостроение, производство химических волокон, нефтехимия. Основу пятого технологического уклада, к которому постепенно переходят развитые капиталистические страны, составляют информационные технологии и робототехника. Поэтому создание и применение разнообразных машин автоматического действия, исключаящих использование живой силы человека и обеспечивающих наивысшую производительность труда и мировой уровень качества, следует признать одним из самых приоритетных направлений развития техники и технологий на ближайшую и

последующую перспективу.

В машиностроительном институте разработана приводная система манипуляционного робота, основанная на использовании передаточных механизмов, главным передаточным элементом которых является гибкая связь. Рука современного промышленного робота представляет крайне неблагоприятную с точки зрения динамики и виброактивности конструкцию. Это связано с тем, что в большинстве случаев приводы роботов размещаются непосредственно на звеньях руки. Поскольку рука (в отличие от обычных механических систем) представляет разомкнутую кинематическую цепь, возникает конструкция консольного типа со всеми вытекающими из этого отрицательными моментами. Это налагает существенные ограничения на скорость движения, снижает быстродействие и точность позиционирования - основные качественные характеристики робота. Робот постоянно работает в неустановившемся режиме с чередованием периодов разгона и торможения, что еще более усугубляет ситуацию.

Необходима разработка систем приводов специального робототехнического назначения, учитывающих специфику устройств, для которых жесткость и точность являются первостепенными критериями. На основании накопленного опыта установлено, что наилучшими характеристиками в отношении указанных выше параметров обладают роботы с размещением приводов на поворотном основании робота. По этой схеме, в частности, выполнены роботы шведской фирмы «АСЕА». Из отечественных роботов можно назвать робот ТУР-10, выпускавшийся до недавнего времени на одном из заводов г. Могилева. Саму схему этих роботов следует признать удачной, но она требует усовершенствования, как в части исполнения самих приводов, так и в части передачи движения к звеньям.

Используемый в приводах робота ТУР-10 волновой редуктор обладает неудовлетворительными качествами в отношении жесткости и долговечности. Кроме того, он сложен в изготовлении. В качестве альтернативы предлагается использовать привод с шарико-винтовой парой. В настоящее время это наиболее совершенная механическая передача, что подтверждается опытом использования ее в станкостроении. Но шарико-винтовая передача является передачей, в которой выходное движение поступательное, в то время как для робота рассматриваемой схемы нужно вращательное движение. В нашем предложении эта проблема решается двумя способами. В первом варианте шарико-винтовая пара включается в схему рычажного кулисного механизма с ведущим движением камня по кулисе.

В этой схеме диапазон вращения ведомого звена ограничен до 90-120 градусов. Анализ требований к манипуляционным возможностям роботов показывает, что такой диапазон вполне достаточен для осуществления региональных и локальных движений (ближайший аналог исполнительного органа робота - рука человека обладает ограниченным диапазоном движений в суставах в таких же пределах).

Вторая предлагаемая схема приводного механизма обладает увеличенным диапазоном вращений вплоть до 300 градусов. Она реализуется в виде механизма, в котором преобразование поступательного движения гайки шарико-винтовой пары во вращательное движение выходного звена осуществляется посредством гибкой связи.

Отказ от полноповоротного движения является нетрадиционным решением, но он позволяет качественно повысить технические параметры привода. Шарико-винтовая пара реализуется с выборкой зазора и предварительным натягом, что осуществляется путем разворота полуаек. Смена направления выборки зазора обеспечивает смену выработанных беговых дорожек на неработавшие, тем самым, увеличивая долговечность механизма. Шарико-винтовая пара обладает высоким к.п.д. - до 95. Наличие непрерывного зацепления в отличие от зубчатой передачи, в которой зубья входят в зацепление дискретно, обеспечивает пониженную виброактивность, что чрезвычайно важно для робота с его консольной рукой. Немаловажно и то, что технология изготовления шарико-винтовой пары хорошо отработана.

В предлагаемом механизме основной силовой элемент, винт, работает на сжатие, обеспечивая высокую жесткость передачи. В конструкции с полым винтом внутрь его может встраиваться двухколесная планетарная передача. Это обеспечивает возможность применения высокооборотных двигателей, что снижает удельную металлоемкость привода.

Изготовление такого привода на специализированном производстве в необходимой гамме параметров позволит получить высококачественное изделие для широкого применения. Он может заменить применяемый в настоящее время в роботах ТУР-10 без принципиальной переделки схемы и конструкции.

Помимо описанной выше задачи усовершенствования приводных механизмов в настоящей работе выполнено исследование по разработке системы трансляции вращательного движения от приводов к исполнительному органу. В этой части будут изучены возможности использования в качестве передаточных звеньев гибких связей, разработанных авторами.

В основе этих гибких связей - металлокордные нити, сплетенные по оригинальной технологии. Используется металлокорд, производимый на Белорусском металлургическом заводе.

В робототехнике в принципе можно использовать все известные в механике устройства передачи движения, однако, не все они обеспечивают требуемые эксплуатационные характеристики. Технические условия передачи определяются на основе ряда критериев, характеризующих конкретные условия работы системы передачи движения. Критерии качества передачи в основном связываются с массами или моментами инерции движущихся тел. Движения происходят в большинстве случаев как повороты вокруг осей. При этом требования малых инерционных нагрузок несовместимы с требованиями высокой жесткости. Для получения заданной точности предъявляются высокие требования к зазорам в соединениях (по терминологии теории механизмов - кинематических парах).

Независимо от конструкции роботов в них всегда имеет место передача движения от модуля системы, задающей движение, к механизму, непосредственно реализующему манипуляционные функции всего устройства. Механизм передачи движения, как и любой другой механизм, обладает присущими ему погрешностями (зазоры в соединениях, сухое трение или вязкое сопротивление, гибкость звеньев), которые неблагоприятно сказываются на основных характеристиках робота, накладывают дополнительные ограничения на методы управления механизмами в динамическом режиме, порождают непредсказуемые изменения, увеличивают погрешность, а также ухудшают вибрационную устойчивость конструкции. Все указанные обстоятельства должны приниматься во внимание при разработке совершенных систем приводов роботов.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ЗУБКОВ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Монтик С.В.

Брестский политехнический институт

Основным породоразрушающим инструментом при бурении нефтяных и газовых скважин являются шарошечные долота. Оснащение их твердосплавным вооружением в виде зубков значительно повысило про-

ходку и другие эксплуатационные показатели долот. Однако твердый сплав расходуется нерационально, т. к. большая часть твердосплавного зубка находится в корпусе инструмента и играет роль державки. Разработанный в ГАНГ им. И.М.Губкина (г. Москва) метод электроконтактного механотермического формирования (МТФ) биметаллических изделий позволяет изготавливать комбинированные зубки (КЗ), состоящие из твердосплавной рабочей головки и стального основания, что сокращает расход твердого сплава.

Автором была предложена технология МТФ КЗ сложной формы, при которой происходит спекание под давлением порошка твердого сплава и его соединение со сталью за счет пропускания электрического тока через графитовую пресс-форму. Данные КЗ предназначены для работы в условиях высоких ударных нагрузок и абразивного изнашивания.

Разные коэффициенты линейного расширения твердого сплава и стали вызывают возникновение остаточных термических напряжений I рода в КЗ после охлаждения. Величина и распределение остаточных напряжений оказывают существенное влияние на зарождение и развитие трещин в твердом сплаве, что в свою очередь определяет долговечность КЗ при ударных нагрузках.

Вследствие малых размеров КЗ экспериментальные исследования остаточных напряжений являются весьма сложным, поэтому была разработана математическая модель напряжённого состояния КЗ.

Представим КЗ в виде соединённых между собой стального и твердосплавного цилиндров. После охлаждения от температуры спекания до температуры окружающей среды радиус стального цилиндра уменьшится на большую величину, чем радиус твердосплавного вследствие большего коэффициента линейного расширения стали. Разность относительных деформаций цилиндров после охлаждения равна

$$\Delta \varepsilon = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где α_1, α_2 - коэффициенты линейного расширения стали и твердого сплава, ΔT - изменение температуры. Напряжения, возникающие вследствие разности относительных деформаций цилиндров, передаются через переходную зону твердый сплав - сталь. В ней будут возникать деформации сдвига и касательные напряжения, направленные по радиусу.

Выделим в твердосплавном цилиндре криволинейный шестигранник со сторонами h_1, dr, rd, φ , где h_1 - высота твердосплавного цилиндра.

Под действием касательных напряжений шестигранник будет испытывать внецентренное сжатие. После преобразования определим радиальные σ_r и окружные σ_t напряжения, действующие на свободной поверхности твердого сплава

$$\sigma_r = \frac{\Delta \varepsilon G_1 G_2 r^2}{h_1 (G_2 h_1 + G_1 h_2)} \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{3 \Delta \varepsilon G_1 G_2 r^2}{h_1 (G_2 h_1 + G_1 h_2)} \quad (3)$$

где h_2 - высота стального цилиндра, G_1, G_2 - модули сдвига твердого сплава и стали. Преобразовав выражения (2) и (3), получаем зависимость напряжений на свободной поверхности твердого сплава от соотношения высот твердосплавной и стальной частей КЗ.

Расчеты показывают, что на свободной поверхности твердого сплава возникают напряжения растяжения, а у границы со сталью - сжатия. Наименьшие растягивающие напряжения на поверхности твердого сплава возникают при соотношении высот твердосплавной и стальной частей КЗ равной 1:1, однако это соотношение нецелесообразно из-за использования большого количества твердого сплава и трудно осуществимо из-за технологических особенностей МТФ. При соотношении 1:2 скачок напряжений в переходной зоне твердый сплав - сталь наименьший, что обеспечивает высокую прочность КЗ и не нарушает технологию МТФ. Это соотношение использовалось при изготовлении КЗ.

Для повышения долговечности КЗ при ударном нагружении необходимо создать напряжения сжатия на поверхности твердого сплава и уменьшить напряжения на границе твердый сплав - сталь. Этого можно достичь путем выбора соответствующей марки стали и режимов термообработки КЗ после МТФ. Так мартенситное превращение в стали, происходящее при закалке, сопровождается увеличением объема стали, что приводит к снижению величины и смене знака напряжений на свободной поверхности твердого сплава, припаянного к стали. Однако, резкое охлаждение отрицательно влияет на прочность твердого сплава при ударных нагрузках, поэтому оптимальным является использование сталей мартенситного класса (45ХНМФА, 38ХН3ВА, 18Х2Н4ВА), закаливаю-

щихся при охлаждении на воздухе. Наиболее перспективной является сталь 18X2H4BA, которая после цементации, последующей пайки с твердым сплавом и охлаждении на воздухе, обеспечила сжимающие напряжения на поверхности твердого сплава. При этом твердость поверхности стали составила HRC 54..56. Высокая твердость поверхности стального основания позволит запрессовывать КЗ в шарошки и не изменять существующую технологию крепления зубков.

В настоящее время разработан руководящий документ на КЗ формы Г26 для оснащения шарошечных долот типа К геологоразведочного сортамента. По результатам стендовых испытаний долот ПП 132 К-ЦВ, проведенных на Дрогобычском долотном заводе, рекомендовано применять КЗ для долот малых диаметров. Вопросы изготовления и крепления КЗ больших диаметров требуют дальнейших исследований.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РЕМОНТА АВТОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Климов Ю. В.

Белорусская государственная политехническая академия

Автомобильный транспорт является сложной производственной системой, эффективность которой зависит от уровня технической готовности и поддержания необходимой работоспособности автомобилей. Согласно принятой планово-предупредительной системе ТО и ремонта поддержание надежности автомобилей на этапе эксплуатации возлагается на техническую службу АТП. От того, насколько будут сохранены технико-эксплуатационные качества автомобиля, зависят срок службы, техническая готовность и его способность удовлетворять потребности в перевозках грузов и пассажиров.

Развитие рынка конкуренции транспортных работ и услуг ставит перед АТП задачу реконструкции производства, обновления его производственно-технической базы, повышения качества работ по ТО и текущему ремонту, экономии топливно-энергетических, финансовых и трудовых ресурсов.

Установлено, что в настоящее время существуют три основных метода расчета мощности системы ТР:

1. По суммарной годовой трудоемкости постовых работ;

2. Вероятностный;
3. По дням простоя в ремонте.

Первый метод базируется на использовании нормативной трудоемкости ТР на 1000 км пробега, а затем на распределении суммарной годовой трудоемкости по постам и отделениям. Такой подход является детерминированным, поскольку не учитывает случайного влияния многих факторов, таких как суточный пробег, момент поступления в зону ремонта, содержание и объем работ и др.

Более точен второй метод, основанный на применении аппарата теории массового обслуживания (ТМО). ТМО изучает системы, в которых переменными и случайными являются моменты поступления требований на ремонт и продолжительность самих обслуживаний. При его использовании требуется соблюдение определенных условий: стационарности, ординарности и отсутствия последствия. Стационарным потоком называется такой, у которого вероятность поступления заявки зависит только от значения рассматриваемого текущего пробега, а не от значения этого пробега в общем пробеге автомобиля с начала эксплуатации. Применительно к автомобилям, стационарность можно принять реальной только на каком-то ограниченном участке времени или пробега. Ясно, что за один и тот же отрезок времени в начале эксплуатации автомобиля вероятность поступления в ТР гораздо ниже, чем после длительной эксплуатации. Ординарным потоком называется поток требований, когда в любой момент времени практически невозможно одновременное появление двух или большего числа отказов. На практике это происходит не всегда, поскольку приблизительно 25% заявок приходится на ремонт нескольких агрегатов или систем. Отсутствие последствия - это независимость поступления требований в данный момент от того, когда и сколько требований поступило этого момента. На практике это условие не выполняется, так как входящий поток требований определяется исправными автомобилями, работающими на линии.

В ТМО рассмотренные допущения сделаны для простоты математической модели. Если эти условия нарушаются, математическое описание значительно усложняется и требует громоздких аналитических зависимостей. Кроме того, время между очередными поступлениями требований и трудоемкость ремонта распределены по показательному закону. Однако, этот закон иногда нарушается, что приводит к дополнительным погрешностям в расчетах.

В реальных условиях система ремонта представляет собой сложную

замкнутую систему, в которой выходные параметры одной подсистемы являются входными параметрами другой. Например, от производительности системы ТР зависит поток автомобилей, которые возвращаются в исправное состояние. Практическое исследование подобных систем с использованием аналитических зависимостей является достаточно сложным и трудоемким. Наиболее эффективным является метод имитационного моделирования, который позволяет учитывать практически все вероятностные параметры и характеристики системы ТР. В отличие от реального эксперимента, который, как правило, слишком дорог, требует значительного времени и не всегда возможен, имитационное моделирование позволяет просмотреть (проиграть) различные организационные варианты и выбрать из них оптимальный.

Разработанная имитационная модель позволяет решить задачу оптимизации производственной мощности системы ТР с учетом оперативного планирования и управления. Кроме того, на модели можно проследить влияние различных факторов на эффективность функционирования технической службы предприятия в целом.

КОМПЛЕКСНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Попок Н.Н., Мартинчик С.Н.

Полоцкий государственный университет, Беларусь

В условиях развития рыночной экономики основной целью машиностроительного производства является повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции. Достичь этого можно путем уточнения и изменения номенклатуры изделий с учетом конъюнктуры рынка, повышения их качества и снижения затрат на производство. В этом случае, как правило, предполагается переход к многономенклатурному и мелкосерийному производству деталей, требующий выбора оптимальных организационных структур производства, технологий, методов обработки, оборудования и оснастки.

При такой широкой постановке проблемы задача оптимизации механической обработки является многокритериальной и многофакторной.

Существующие подходы к ее решению подразделяются на следующие: оптимизация по одному наиболее важному критерию; оптимизация по нескольким критериям, выстраиваемым последовательно с определенными приоритетами; мультикритериальная оптимизация и системный просмотр многомерного пространства факторов. Математически наиболее полно обоснованы первых два подхода, которые приняты в качестве базовых при разработке методики комплексной оптимизации механической обработки деталей. Методика включает: создание статистической модели производственной и технологической систем и проведение анализа применимости конструктивно-технологических элементов детали, видов обработки резанием и режущих инструментов; моделирование, формирование базы данных и оптимизация системы резания по технологическим и физическим параметрам; комплексная оптимизация производственной системы с приоритетной расстановкой организационных, технологических, физических и экономических критериев.

Методика реализуется с учетом обобщения классификационных признаков механической обработки по пяти основным группам: материально-информационных, свидетельствующих о материальных объектах, процессах механической обработки и их параметрах; пространственно-временных, характеризующих относительное расположение и перемещение объектов в процессе обработки и включающих кинематические, установочные и временные признаки; энергетических, к которым относятся параметры действия объектов и среды обработки; структурно-технологических, характеризуемых наименованием, функцией, структурой и параметрами производства и техпроцесса; кибернетических, определяемых параметрами управляемости объектов и процессов резания механической обработки.

Статистическая модель производственной системы предусматривает формирование базы данных по конструктивно-технологическим элементам деталей, видам обработки резанием, режущим инструментам и другим объектам с учетом организационно-технологической структуры и параметров производственной и технологической систем и обработку этих данных с применением методов математической статистики. Например, информационные модели детали, ее конструктивно-технологических элементов, видов обработки резанием и режущих инструментов представлены в следующем виде:

$$D_i = \{K(E_i^n), KP(E_i^n), SKP(E_i^n), S(E_i^n) / t^n = 1, K, T^n, n = 1, K, N\};$$

$$E_i^n = \{K(E_i^n), KP(E_i^n), SKP(E_i^n)\};$$

$$WOR_i = \{K(WOR_i^n), KP(WOR_i^n), SKP(WOR_i^n), S(WOR_i^n)\};$$

$$RI_i = \{K(RI_i^n), KP(RI_i^n), SKP(RI_i^n), S(RI_i^n)\}.$$

Физическая модель процесса резания представляет собой общий (комплексный) вид обработки детали многолезвийным вращающимся режущим инструментом. Главными отличительными особенностями комплексного вида обработки резанием являются наличие наряду с традиционными движениями инструмента и детали - главным и движением подачи, дополнительных движений лезвий, осуществляемых по касательной или нормали к поверхности резания, а также возможность установки базовой оси инструмента в любое положение относительно детали и широкий диапазон изменения скоростей относительного перемещения инструмента и детали. Физическая модель позволяет реализовать разные виды обработки резанием, например, строгание, обтачивание, фасонное и ротационное точение, фрезерование, фрезоточение, шлице- и зубонарезание, круговое протягивание и т.п. путем трансформации кинематических, конструктивно-геометрических и установочных параметров процесса и инструмента и изучать в комплексе механо-физические характеристики обработки резанием. На основе экспериментальных исследований физической модели, а также математического моделирования получены формулы для расчета параметров контакта, стружкообразования, сил и температуры резания, износостойкости инструмента и шероховатости обработанной поверхности, позволяющие проводить оптимизацию разновидностей обработки резанием. Например, модель теплового воздействия на поверхности различных типов инструментов в процессе резания получена в следующем виде:

$$\theta_{\Pi} = \frac{2q_{\Pi}}{R^2 \lambda \sqrt{\pi} \cdot k} \cdot \left[l \sin^2 \mu (2R - l \sin^2 \mu) \cdot \left[2\sqrt{t} \exp\left(-\frac{z^2}{4kt}\right) - \frac{z\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \right] + \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{k}} \sum_{\alpha=0}^{\infty} \frac{I^{\alpha} I_0(\alpha r)}{\alpha^2 (\alpha R)} \right] \times$$

$$\times \left[\frac{R}{\alpha} I_1(\alpha k) - \frac{R - l \sin^2 \mu}{\alpha} \cdot I_1\left[\alpha(R - l \sin^2 \mu)\right] \right]$$

С использованием предложенной методики и моделей на одном из ма-

шиностроительных предприятий была проведена поэтапная или многоуровневая оценка эффективности применения режущих инструментов с износостойкими покрытиями при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов. На первом этапе определялись частота и продолжительность использования в производстве тех или иных типоразмеров режущих инструментов. На втором этапе для наиболее часто используемых инструментов оценивалось их работоспособное состояние с учетом нанесенного покрытия и без него по коэффициентам стойкости, обрабатываемости материала детали, точности и качества обработки:

$$K_c = T_{ип} / T_б; K_o = V_{ип} / V_б; K_{тк} = (IT, Ra)_б / (IT, Ra)_{ип}.$$

При этом была проведена оптимизация профиля и рельефа поверхностей лезвия под покрытие. На третьем этапе инструмент оценивался по коэффициентам себестоимости и срока окупаемости. Эффективность режущего инструмента с износостойкими покрытиями определялась в конечном итоге по показателям одного или нескольких уровней в баллах.

Таким образом, на основании предложенной методики, статистической и физической моделей процесса резания можно оперативно и с высокой степенью достоверности определять оптимальность того или иного вида обработки резанием и режущего инструмента по комплексу признаков и критериев приоритетных для данных условий предприятия, что позволяет повысить гибкость последнего при освоении выпуска мелкими сериями многономенклатурной продукции.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗАНИЯ ИНСТРУМЕНТОМ С ПОДВИЖНЫМ ЛЕЗВИЕМ

Петров В.А., Костюченко А.В.

Полоцкий государственный университет

Характер и темп износа режущего инструмента влияет на производительность и точность механической обработки и в конечном счете сказывается на себестоимости продукции машиностроительных предприятий. Поэтому повышение износостойкости режущего инструмента является одной из актуальных проблем в машиностроении.

Эффективность автоматизации технологических процессов в значительной мере определяется стабильностью параметров и точностью изделий при обработке на станках-автоматах. Точность обработки, в свою

очередь, жестко связана с размерной стойкостью инструмента, т.е. с изменением его размеров в процессе износа. Из-за низкой размерной стойкости режущего инструмента окончательную обработку поверхностей с точными размерами зачастую приходится исключать из автоматических линии и включать в отдельную операцию, за счет чего резко увеличивается затраты на изготовление деталей.

Особенно актуальна задача повышения стойкости инструмента, предназначенного для обработки жаропрочных и других труднообрабатываемых материалов, скорости резания которых в ряде случаев в 50-100 раз меньше, чем для обычных конструкционных сталей.

В настоящее время наряду с традиционными методами успешно развивается метод активного охлаждения режущего инструмента основанный на сообщении резцу в процессе резания перемещения режущей кромки параллельно самой себе. Из всех известных методов наиболее изучен метод ротационного точения.

Но несмотря на это еще не выработана единая точка зрения на характер и природу изнашивания инструментов при ротационном резании; не сопоставлена износостойкость инструмента с применяемыми в производстве; не выявлены изменения в характере изнашивания инструмента с непрерывной и прерывистой режущей кромкой при его работе в режиме самовращения и принудительного вращения, а также при реверсировании вращения инструмента; не определены рациональные кинематические, геометрические и технологические параметры процесса ротационного резания, повышающие стойкость инструмента.

В связи с этим во многих политехнических институтах нашей страны, а также за рубежом проводятся исследования ротационного инструмента при обработке различных труднообрабатываемых материалов.

В Полоцком государственном университете (ПГУ) были проведены исследования характера изнашивания инструмента за максимально возможный период его работы при различных видах ротационного точения с применением разных инструментальных и обрабатываемых материалов, режимов резания и геометрических параметров режущей части инструмента.

В результате проведенных опытов были сделаны выводы, что при ротационном резании зависимости величины износа от времени работы инструментов аналогичны зависимостям при изнашивании токарных резцов и других инструментов. Время работы вращающегося инструмента

до катастрофического износа для всех видов ротационного резания примерно одинаково и в 80-100 раз больше, чем время работы невращающегося инструмента.

За рубежом были проведены исследования температуры и сил резания в условиях продольного точения заготовки самовращающимся ротационным резцом. Для расчета тепловых потоков и распределения температуры была использована модель с движущимся импульсным источником тепла. Опыты проводились в условиях обработки алюминиевого сплава, армированного волокнами карбида кремния, и титанового сплава Ti6Al4V вращающимся резцом из твердого сплава группы K10.

Было установлено, что касательное перемещение режущей кромки ротационного резца приводит к снижению температуры на 80K при обработке армированного алюминиевого сплава и на 220K— при обработке титанового сплава. После выхода нагретого участка режущей кромки из зоны контакта его температура уменьшается почти до уровня комнатной, что обуславливает ударный характер теплового нагружения режущей кромки, достаточно заметный при обработке материалов с низкой теплопроводностью. Силы резания при обработке ротационным инструментом по сравнению с обычным, оснащенным пластиной того же диаметра, существенно уменьшается, причем радиальная сила уменьшается на 35-40% [1].

Также многие зарубежные специалисты приводят методику и результаты экспериментального исследования работоспособности самовращающихся ротационных резцов в условиях продольного точения композиционного материала на основе алюминия с наполнителем из SiC, титанового сплава Ti6Al4V и высокомарганцевой стали 18Mn [2]. Установлено, что твердосплавный (группы K10) самовращающийся резец обладает повышенной стойкостью, особенно, при обработке композиционных материалов. Стойкость его в несколько раз выше стойкости обычных резцов и приближается к стойкости более дорогого алмазного резца. При обработке титановых сплавов и высокомарганцевой стали на передней поверхности самовращающегося резца износ не обнаружен. Не наблюдается и наростообразования на передней поверхности и вершине в отличие от обычных резцов.

Как показывают проведенные исследования способ ротационного резания материалов обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами обработки. Благодаря большой длине круговой режущей кромки лезвия, непрерывному вращению его во время работы,

обеспечивающему прерывистость и кратковременность работы каждого его участка, хорошими условиями охлаждения лезвия за время холостого пробега и меньшей истинной скорости резания по сравнению со скоростью главного движения температура в зоне резания при обработке ротационным инструментом по сравнению с традиционным инструментом снижается до 40%.

Кинематические и конструктивные особенности ротационных режущих инструментов, обеспечивают высокое качество и хорошие эксплуатационные показатели обработанной поверхности, что позволяет исключить из технологических процессов последующие трудоемкие операции шлифования, шабрения и особенно сухого шлифования.

Для подрезки торцев деталей применение обычных ротационных резцов затруднено из-за изменения скорости при резании от наружного диаметра к внутреннему. Ввиду разности скоростей сложно подобрать такую установку инструмента, которая обеспечила бы необходимое качество обрабатываемой поверхности. В связи с этим нами поставлена задача провести исследования обработки торцев труб ротационным резцом.

Литература

1. Работоспособность самовращающихся резцов при резании труднообрабатываемых материалов / Chen Piung, Hoshi Tetsutaro // Int. J. Jap. Soc. Precis. Eng.- 1991.-25, N°4.-С.267-270.
2. Температура и силы резания при точении амовращающимся ротационным резцом /Chen Piung // JSME. Int.J. Ser.3.-1992.-35, N°1.-С.180-185.-Англ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТОЧНОСТИ СБОРНОГО ИНСТРУМЕНТА

Михайлов М.И.

Гомельский политехнический институт им. П.О.Сухого

Динамическая точность сборного инструмента является интегральной величиной геометрической погрешности входящих в него элементов, и статической обусловленной силами трения, силами дисбаланса, массами, инерционностью элементов и т.д. Запишем эту зависимость в виде

$$Y_{\text{ит.}} = Y_1 + Y_2 + Y_3 \quad (1)$$

где Y_1 - величина податливости в направлении оси Y инструмента,

$$Y_1 = f(P_1, P_2, \dots, P_n) \quad (2)$$

Y_2 - погрешность инструмента от точности геометрических параметров его элементов

$$Y_2 = f(d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (3)$$

Y_3 - погрешность сборного инструмента от действия сил зажима режущего элемента

$$Y_3 = f(F_1, F_2, \dots, F_n) \quad (4)$$

При проектировании сборного инструмента выбирают такую схему базирования режущих, направляющих и крепежных элементов, которая упрощает функциональную зависимость (3).

Погрешность инструмента (1) следует разложить в ряд Тейлора для того, чтобы получить удобные для вычисления функции и придать наглядность и физический смысл членам этого ряда.

$$\Delta Y_{инт} = \sum_{i=1}^n (\partial Y / \partial p_i)_0 \Delta p_i, \quad (5)$$

где нулевой индекс означает, что частная производная вычисляется для номинального значения параметров. Второе приближение получается, если при разложении сохранить вторые и смешанные производные

$$\Delta Y_{инт} = \sum_{i=1}^n (\partial Y / \partial p_i)_0 \Delta p_i + 1/2 \sum_{i=1}^n (\partial^2 Y / \partial^2 p_i)_0 \Delta p_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\partial^2 Y / \partial^2 p_{ij}) \Delta p_i^2 \Delta p_j \quad (6)$$

При разложении часть членов $j(m+1, \dots, n)$ образует степенной ряд Маклорена. Выбор допустимых степеней приближения и оценка погрешностей связанных с отбрасыванием остаточных членов ряда Тейлора, производится по известным правилам. На инструмент большое значение оказывают внешние возмущения (z_1, \dots, z_k), характеризующие условия его эксплуатации (усилия резания, силы зажима элементов, точки приложения этих сил и создаваемых ими моментов, удары при зажиме, непостоянство сил зажима в партии пластин, температура среды и станка и т.д.). Поэтому в общем случае первичная погрешность состоит из двух слагаемых

$$\Delta q_i = \Delta q_i' + \Delta q_i'' \quad (7),$$

где $\Delta q_i'$ - основная первичная погрешность, зависящая от внутренних параметров системы; $\Delta q_i''$ - дополнительная первичная погрешность, вызванная влиянием внешних факторов и изменением условий эксплуатации.

Для определения зависимости $\Delta q_i''$ от внешних факторов необходимо выразить параметры q_i в виде функции

$$q_i = \varphi(z_1, \dots, z_k) \quad (8).$$

За номинальное значение внешних факторов принимаем их значения $z_{10}, z_{20}, \dots, z_{k0}$ отвечающие расчетным условиям работы инструмента, тогда для нормальных расчетных значений

$$\Delta q_i'' = \varphi(z_1, \dots, z_k) - \varphi(z_{10}, \dots, z_{k0}) \quad (12).$$

Разложив в ряд Тейлора и взяв линейное приближение, получим

$$\Delta q_i'' = \sum_{j=1}^k (\partial q_i / \partial z_j)_0 \Delta z_j \quad (13)$$

где Δz_j - отклонение j -го внешнего фактора от номинального значения (частная производная берется для значений $z_j = z_{j0}$, отвечающим нормальным условиям). Во втором приближении

$$\Delta q_i'' = \sum_{j=1}^k (\partial^2 Y / \partial z_j^2) \Delta z_j + 1/2 \sum_{j=1}^k (\partial^2 q_i / \partial z_j^2) \Delta z_j^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{\tau=1}^k (\partial^2 q_i / \partial z_j \partial z_\tau) \Delta z_j \Delta z_\tau \quad (14)$$

Суммируя все погрешности, получим полное линеаризованное уравнение статической погрешности инструмента

$$\Delta Y = [f(x, q_{10}, \dots, q_{m0}) - f(x)] + \sum_{i=1}^n (\partial Y / \partial q_i)_0 \Delta q_i + \sum_{i=1}^n \{ (\partial Y / \partial q_i)_0 \sum_{j=1}^k (\partial Y / \partial z_j) \Delta z_j \} \quad (15)$$

где $[..]$ - погрешность базирования режущей пластины; 2-е слагаемое - геометрическая погрешность инструмента; 3-е слагаемое - погрешность закрепления пластины.

Общую погрешность ΔY можно представить в виде суммы основной и дополнительной

$$\Delta Y = \Delta Y_{\text{осн}} + \Delta Y_{\text{доп}} \quad (16),$$

т.е. разобьем общую погрешность на две составляющие по их функциональной роли в инструменте. Основная погрешность есть функция внутренних факторов при нормированных условиях эксплуатации, дополнительная погрешность добавляется при влиянии внешних факторов, связанных с измененными условиями эксплуатации. Тогда основная погрешность выразится

$$\Delta Y_{\text{осн}} = f(x, q_{10}, \dots, q_{m0}) - f(x) + \sum_{i=1}^n (\partial Y / \partial q_i)_0 \Delta q_i \quad (17)$$

Дополнительная погрешность

$$\Delta Y_{\text{доп}} = \sum_{i=1}^n \{ (\partial Y / \partial q_i) \sum_{j=0}^k [(\partial q_i / \partial z_j) \Delta z_j] \} \quad (18)$$

Выражение (15) представляет собой уравнение погрешности инструмента в размерной форме, а входящая частная производная является коэффициентом влияния i -го звена на общую погрешность инструмента. Для перехода к безразмерной форме преобразуем (5)

$$\Delta Y / Y = \sum_{i=1}^N (\partial Y / \partial Y_i) Y_i / Y \Delta Y_i / Y_i$$

где $\Delta Y_i / Y_i$ - относительная погрешность i -го звена; $\Delta Y / Y$ - относительная погрешность всего инструмента, или

$$\Delta Y / Y = \sum_{i=1}^N \Psi_i \Delta Y_i / Y_i \quad (19)$$

где $\Psi_i = (\partial Y / \partial Y_i) Y_i / Y$ - безразмерный коэффициент влияния i -го элемента или части инструмента.

Коэффициенты влияния элементов могут быть вычислены путем анализа структурной схемы. Общая чувствительность структурной цепи является функцией чувствительности S_1, S_2, \dots, S_N элементов.

$$S = \varphi(S_1, \dots, S_N)^2 \quad (20)$$

Вид функции (20) определяется типом структурной цепи инструмента. Если чувствительности звеньев получают независимые приращения $\Delta S_1, \dots, \Delta S_N$, то приращение общей чувствительности в линейном приближении

$$\Delta S = \sum_{i=1}^N \partial S / \partial S_i \Delta S_i \quad (21)$$

В безразмерном виде

$$\Delta S / S = \sum_{i=1}^N \partial S / \partial S_i S_i / S \Delta S_i / S_i \quad (22)$$

Пусть требуемая характеристика i -го узла $\varphi = S Y$. Если при некотором фиксировании значений входной величины X выходная

величина отличается от требуемой, то возникает погрешность ΔY , которую можно трактовать как результат изменения чувствительности звена

$$Y_i + \Delta Y_i = (S_i + \Delta S_i) Y_{i-1} \quad (23)$$

Из уравнения (22) и (23) можно получить соотношение

$$\Delta S/S = \Delta Y/Y \quad (24)$$

Рассуждая таким образом можно получить аналогичное соотношение для всего инструмента

$$\Delta S/S = \Delta Y/Y \quad (25)$$

Подставляя (24) и (25) в (22) получим

$$\Delta Y/Y = \sum_{i=1}^N \partial S / \partial S_i S_i / S \Delta Y_i / Y_i \quad (26)$$

Сравнивая выражения получим формулу для определения безразмерных коэффициентов влияния i -го узла структурной схемы, состоящей из элементов с пропорциональными характеристиками

$$\varphi = \partial S / \partial S_i S_i / S \quad (27)$$

Уравнение (19) остается в силе и для приведенных относительных погрешностей. Действительно, если вместо Y и Y подставить абсолютные значения допусков изменения этих параметров Y и Y , то получим

$$\xi = \sum_{i=1}^N \psi_i \xi_i \quad (28)$$

где $\xi = \Delta Y/Y$ - приведенная относительная погрешность инструмента;
 $\xi_i = \Delta Y_i/Y_i$ - приведенная относительная погрешность i -го элемента.

В случае если элементы инструмента с пропорциональными характеристиками соединены между собой одним из трех типовых способов, то коэффициенты влияния вычисляются по стандартным формулам, которые следуют из (27). Например, при последовательном соединении узлов, чувствительность механической цепи

$$S = S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_N = \prod_{i=1}^N S_i \quad (29)$$

откуда

$$\frac{\partial S}{\partial S_i} = 1/S \prod_{i=1}^N S_i \quad (30)$$

При параллельном соединении узлов чувствительность цепи имеет вид

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_N = \sum_{i=1}^N S_i, \quad (31)$$

Т.о. предлагаемая методика позволяет производить анализ точности любого сборного инструмента.

О ВЫБОРЕ ЗАКОНОВ ТРЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОКРЫТИЯ В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ

Бельский А. Т.

Гомельский политехнический институт им. П. О. Сухого

Разрабатывая технологический процесс нанесения на длинномерные изделия покрытий из металлических порошков и их сплавов, возникает необходимость в определении действующих напряжений как в сердечнике, так и в формируемом покрытии. При выводе аналитических зависимостей для определения действующих напряжений приходится задаваться законами трения между покрытием и волоочильным инструментом, а также между покрытием и сердечником.

При обработке металлов давлением силы трения зависят не только от физико-химического состояния контактных поверхностей, но и от факторов, определяющих механику деформации, а именно: формы очага деформации, упрочнения материала, наличия натяжения и так далее. Формулы, встречающиеся в литературе для определения сил трения в очаге деформации, можно разделить на три группы:

а) формулы, содержащие в качестве независимой переменной какой-либо физический фактор, например: нормальное давление, предел текучести деформируемого материала и так далее;

б) формулы, описывающие распределения сил трения по длине контакта. Одним из аргументов в этих формулах является чисто геометрический параметр, например: координата точки контактной поверхности;

в) формулы, по которым определяют среднюю удельную силу трения

в очаге деформации.

К законам трения в строгом физическом смысле могут относиться только формулы, относящиеся к первой группе. Наиболее широко применяемой формулой для определения сил трения является закон Амонтона.

Поскольку предполагается, что удельная сила трения является касательным напряжением на контактной поверхности, то можно записать

$$\tau = fp,$$

где f - коэффициент внешнего трения;

p - нормальное удельное давление.

В настоящее время в литературе отсутствуют сведения об изменении коэффициента внешнего трения пористого материала в процессе волочения, но имеются экспериментальные данные об его изменении при прокатке и прессовании металлических порошков.

Учитывая, что коэффициент внешнего трения при обработке металлов давлением является величиной переменной и зависит от многих факторов, авторы большинства работ, применяя закон Амонтона, считают его величиной постоянной.

В некоторых случаях при пластической деформации значение удельной силы трения наиболее точно может быть определено двухчленным законом трения типа формулы Кулона

$$\tau = f'p + a,$$

где f' - коэффициент, отличающийся по величине от коэффициента трения;

a - удельное сопротивление сдвигу, обусловленное молекулярным сцеплением поверхностей.

Однако этот закон не нашел пока распространения в обработке металлов давлением из-за отсутствия значения величин f' и a .

В последнее время в теории обработки металлов давлением все более часто используется закон Зибеля для определения удельной силы трения

$$\tau = f_{\sigma} \sigma_{\tau},$$

где f_{σ} - коэффициент трения по пределу текучести,

σ_{τ} - предел текучести материала.

Уравнение Сен-Венана - Треска в упрощенной форме имеет вид:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_{\tau},$$

σ_1 - максимальное касательное напряжение определяется по зависимос-

ти:

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2,$$

где σ_1, σ_3 - главные нормальные напряжения;

β - коэффициент Лоде, изменяющийся в пределах от 1 ... 1,5.

Сравнивая эти выражения, получаем зависимость для определения удельной силы трения в следующем виде:

$$\tau = \beta \sigma_T / 2.$$

При формировании покрытия в процессе волочения у входа в рабочую зону порошок металла находится в состоянии утряски и дальнейшее его перемещение происходит слоями. Это возможно в том случае, если он будет скользить по поверхности волочильного инструмента и не иметь перемещения относительно сердечника. Другими словами как бы произошло схватывание порошкового материала с сердечником. На основании вышесказанного было принято, что при формировании порошкового покрытия в процессе волочения удельная сила трения между покрытием и волочильным инструментом определяется по закону Амонтона, при этом значение внешнего коэффициента трения принималось постоянным вдоль всей зоны уплотнения и деформации. Удельная сила трения между сердечником и покрытием определяется по закону Зибеля, а коэффициент трения по пределу текучести принимается равным максимальной величине, что соответствует условию схватывания.

В результате принятия таких законов трения была получена зависимость для определения усилия волочения при формировании порошкового покрытия в процессе волочения. Усилия волочения, рассчитанные по полученной зависимости, хорошо согласуются с экспериментальными данными, что говорит о правильности выбора законов трения.

СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ПОСЛЕ БЫСТРОЙ ЗАКАЛКИ РАСПЛАВА

*Верещагин М.Н., Целуев М.Ю., Стасенко Д.Л., Кирилук С.И.
Гомельский политехнический институт им. П.О. Сухого*

Аморфные сплавы кристаллизуются с помощью процесса зарождения и роста зародышей, а движущей силой является различие свободных энергий между аморфной и кристаллической фазами.

Для исследования использовались образцы сплава Fe-Si-B, полученные закалкой из расплава на быстровращающийся медный диск. Температура кристаллизации определялась по скачку электросопротивления. В диапазоне низких скоростей нагрева измерения проводились на установке ДТА при высокой скорости нагрева - пропусканием электрического тока. Температура измерялась с помощью прецизионного пирометра Крок-2. Скорость нарастания температуры определялась графическим методом. С ростом скорости нагрева температура кристаллизации увеличивается, причем в диапазоне высоких скоростей она возрастает особенно резко. В интервале низких скоростей нагрева (до 10°С/с.) зависимость температуры кристаллизации от времени имеет прямолинейный характер. В высокотемпературном интервале криволинейность зависимости также спрямляется. В разных областях скоростей нагрева атомная перестройка происходит по различным механизмам. При низких температурах основным механизмом является диффузия вакансионного типа. В области высоких температур происходит перестройка окружения атома, носящая коллективный характер и обуславливающая вязкое течение.

Фазовый состав сплава системы Fe-Si-B-Cr-C проводился расчетом межплоскостных расстояний по интерференционным линиям с последующим сравнением полученных значений с таблицами картотеки ASTM. Он соответствовал следующему: α -Fe, FeO, Fe₂B, FeC, Fe₃B, Fe₃C, BN, B₂O₃, Cr₃Si, FeSi. Количество аморфной фазы составляло 97,2% при $N\mu=6350$ МПа (линейная скорость вращения диска ≈ 21 м/с.) и 87,2% при $N\mu=5587$ МПа (линейная скорость диска ≈ 15 м/с.). В процессе отжига микротвердость сплавов и потеря массы уменьшаются по экспоненциальному закону. Результат действия дислокационных полей рассматривается как локальное изменение межплоскостного расстояния. Области кристаллита с изменением d будут давать дифракционный максимум (линию) под углом θ , отличным от угла для идеального кристалла θ_0 . А так как d меняется непрерывно, то кристалл будет "отражать" в диапазоне углов $\theta \pm \Delta\theta$, т.е. дифракционная линия уширяется. Тогда плотность дислокаций

$$\rho = (\beta^2 / 2b^2) \text{ctg}^2 \theta,$$

где b -вектор Бюргера, θ -угол дифракции.

Съемка образцов, полученных методом быстрой закалки расплава, велась на дифрактометре Дрон-3 в монохроматизированном излучении FeK α . Линия (110) снималась с шагом 0,05 и временем набора импульсов до 20 с., линия (220)- с шагом 0,1 и временем набора 40с. Для определения параметров тонкой кристаллической структуры использовался метод

гармонического анализа формы рентгеновских линий.

Результаты исследования показывают на значительное влияние режимов обработки сплава с точки зрения сохранения аморфной структуры. Наиболее стабильны, с точки зрения сохранения аморфной фазы, являются условия закалки сплава из расплава при линейной скорости вращения 18-22 м/с. Аморфная фаза сохраняется вплоть до температуры 450-470°C, что перспективно с точки зрения выполнения дополнительных процессов, связанных с нагревом металлической нити.

ТОРЦОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ КОНСОЛЬНЫХ НАСОСОВ

*Голуб М.В., Плющев Ю.И., Косьянчук В.В., Кудрицкий Я.В.
Брестский политехнический институт.*

Применяемые в системах тепло- и водоснабжения насосы перекачки рабочих жидкостей оснащены сальниковыми уплотнениями (набивкой) для герметизации вращающегося вала.

Сальниковые элементы уплотнения имеют низкую надёжность и недолговечность. Затраты на их обслуживание велики.

С целью замены устаревших конструкций сальниковых элементов разработаны современные торцовые вращающиеся уплотнительные соединения (торцевые уплотнения).

При проектировании торцовых уплотнений необходимо было решать две задачи:

1) разместить относительно сложный и насыщенный рабочими элементами узел в ограниченном пространстве штатного насоса, предназначенного для размещения сальниковой набивки;

2) обеспечить эффективный отвод тепла из зоны контакта пары трения.

Эти задачи были решены конструкциями торцовых уплотнений, которые условно можно разделить на две группы:

а) уплотнения, устанавливаемые вне сальниковой камеры;

б) уплотнения, устанавливаемые в сальниковой камере.

К уплотнителям первой группы относятся модели УТН-45М; УТН-40М2; УТН-25М; УТН-00М.

Уплотнения этой группы выполнены одинарными, гидравлически разгруженными: $k=0.58$. Контактные поверхности трения образованы двумя кольцами из антифрикционного металлокерамического материала

ТМ-1. Предварительное нагружение осуществляется цилиндрическими пружинами, количество которых определяется габаритными размерами уплотнения и необходимым усилием предварительного нагружения.

С целью снижения металлоёмкости торцовых уплотнений этой группы была разработана модель УТН-33, у которой функции корпуса уплотнения и обоймы совмещены в одной детали (рис. 1).

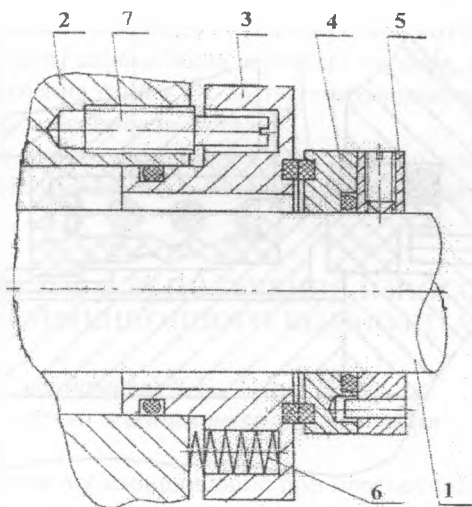


Рис. 1. Уплотнение УТН-33:

1-вал; 2-корпус насоса; 3,4-контактные кольца;

5-монтажное кольцо; 6-пружины; 7-винт.

Такое решение позволило уменьшить количество деталей, снизить габаритные размеры, упростить монтаж на насосе. Но эффективность работы этого соединения зависит от состояния внутренней поверхности камеры, в которой размещается сальниковая набивка. При длительной эксплуатации насоса установка торцового уплотнения типа УТН-33 возможна после предварительной обработки поверхности этой камеры для обеспечения герметичности. Это приводит к необходимости полной разборки насоса и его доработки в заводских условиях, что в ряде случаев сопряже-

но с большими затратами и снижает эффективность применения уплотнений УТН-33.

Ко второй группе уплотнений относятся уплотнения модели УТН-П25 (рис. 2).

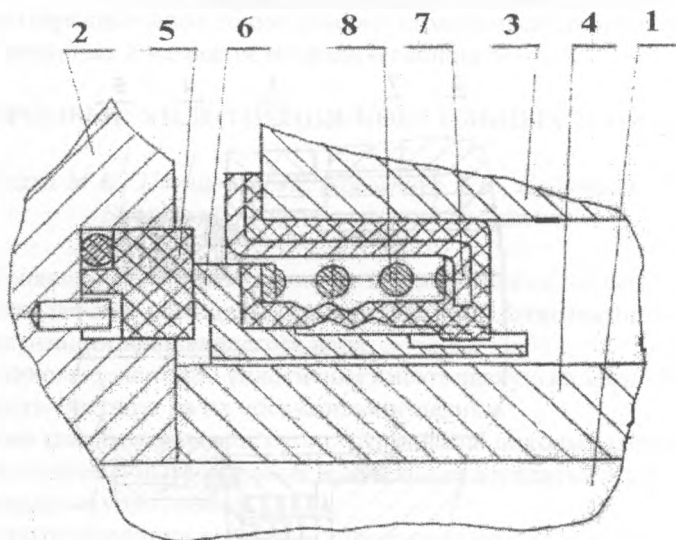


Рис. 2. Уплотнение УТН-П25:

- 1-вал; 2- рабочее колесо; 3- корпус насоса; 4- втулка;
2- 5,6- контактные кольца; 7- манжета; 8- пружины.

Контактная поверхность трения образована вращающимся кольцом из углярафита и неподвижным металлическим кольцом. Основу конструкции уплотнения составляет резиноталлическая манжета с размещённой в ней центральной пружиной для обеспечения необходимого усилия предварительного нагружения. Манжета устанавливается внутри сальниковой камеры.

Установка уплотнения возможна только в заводских условиях после необходимой доработки рабочего колеса и корпуса насоса.

Исходя из особенностей рассмотренных конструкций, возможен вывод:

а) уплотнения типа УТН-45М; УТН-40М2 и др. рекомендуются для установки в насосы, находящиеся в интенсивной эксплуатации и установка которых на длительное время для установки или замены уплотнений невозможна;

б) при ремонте насосов в заводских условиях, при которых осуществляется полная разборка, дефектация и ремонт насосов, рекомендуется устанавливать уплотнения типа УТН-33, подтвердившие высокий ресурс при испытании в условиях производства;

в) целесообразен поиск оптимальной конструкции уплотнений типа УТН-П125 как наиболее перспективной конструкции малогабаритных уплотнений.

ПОДГОТОВКА ШИХТЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОГО АНТИФРИКЦИОННОГО КОМПОЗИТА

Кудрицкий Я.В., Голуб В.М.

Брестский политехнический институт

Наиболее интенсивному изнашиванию при перекачивании абразиво-содержащих жидкостей подвержены рабочие поверхности контактных колец торцовых уплотнений. В связи с этим, к материалу контактных колец предъявляются жесткие требования по износостойкости. Кроме того, этот материал, работая в условиях неудовлетворительной смазки, должен быть антифрикционным и иметь высокую теплопроводность. Таким комплексом свойств может обладать композит, состоящий из компонентов с вышеперечисленными свойствами. Для исследований нами была выбрана композиция, матрица которой представляла собой систему медь - никель - хром - мелкозернистый карбид вольфрама, а наполнителем является релит. Такие компоненты, как медь, никель и хром в определенных условиях могут работать в режиме избирательного переноса, выполняя роль твердой смазки. При этом, карбид вольфрама, обладая высокой твердостью, способствует повышению износостойкости композита. Кроме того, медь обладает высокой теплопроводностью. Целью исследований является оптимизация процентного содержания компонентов в матрице ком-

позита, так как особенностью изнашивания композиционных материалов абразивом является первоочередной износ матрицы с последующим вскрытием и выкрашиванием зерен наполнителя. Также, возникла необходимость исследования процессов взаимодиффузии компонентов систем типа металл - карбид вольфрама, так как от прочности закрепления карбидных зерен в металлической матрице зависит износостойкость композита в целом.

Технология изготовления образцов для испытаний заключалась в подготовке шихты с различными процентными соотношениями компонентов, соответствовавшими плану проведения эксперимента, смешивании, прессовании и спекании под слоем специального флюса [1].

Данная технология отличается от известных тем, что состав композита задается на подготовительном этапе, то есть композит не требует последующей пропитки определенным материалом. Кроме того, использование специального флюса исключает необходимость применения печей с защитной атмосферой. Эти особенности значительно упрощают технологический процесс изготовления контактных колец торцовых уплотнений методом порошковой металлургии.

Наиболее важным на начальном этапе данного технологического процесса является получение максимально однородной шихты. Нами были использованы порошки меди (зернистость 30 - 40 мкм), хрома (зернистость 100 мкм), СР-3 (зернистость 100 мкм), ВК-6 (зернистость 10 мкм) и релит (зернистость 0,8 - 1 мм). Порошковые компоненты были разбиты на группы попарно медь - хром, СР-3 - ВК-6, матрица - наполнитель. Смешивание производилось отдельно для каждой пары в присутствии жидкости с целью выявления точного времени, необходимого для получения шихты заданного состава. Учитывая, что при смешивании необходимо стремиться к максимальному увеличению первоначальной поверхности раздела между компонентами S_m , текущая поверхность раздела S_t в любой момент времени перемешивания t для двухкомпонентной смеси будет:

$$S_t = S_m (1 - e^{-tc}) \quad (1)$$

где $c = \ln [1/(1 - \epsilon)]$, $\epsilon = (S_{t+1} - S_t)/(S_m - S_t)$, S_{t+1} - величина поверхности раздела в момент времени $t+1$.

Поверхность раздела не может в полной мере характеризовать однородность смеси, поэтому необходимо знать степень распределения ком-

понентов по объему. Вероятность попадания P_t в каждый данный объем хотя бы одного элемента поверхности S_t определялась выражением:

$$P_t = 1 - e^{-c_1 S_t} = 1 - e^{-c_1 S_m (1 - e^{-\tau c})} \quad (2)$$

Для расчета времени достижения требуемой однородности смешивания по экспериментальным данным сначала определялись величины c_1 , S_m и c . С этой целью весь объем двухкомпонентной смеси V условно разбивался на 10 элементарных объемов v , и через интервал времени t , равный 10 мин производились пробы по десяти элементарным объемам. Таким образом, выявлялся процент элементарных объемов, в которых состав компонентов соответствовал заданному. Принятая нами степень однородности смешивания составляла 95%. Обработка экспериментальных данных проводилась на ЭВМ по соответствующей программе.

Литература

1. Кудрицкий Я.В., Голуб М.В., Пучинский В. Разработка износостойких композиционных материалов на основе разнозернистых порошков карбидов металлов. Сборник тезисов Второй Американско-Восточно-Европейской Конференции НМТТ-97, с. 202-203, 1997.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ

Басинюк Я.В., Ишин Н.Н.

Институт надежности машин НАН Беларуси

В процессе контроля режимов и характера взаимодействия основных элементов объекта при проведении исследований и в процессе безразборной диагностики технического состояния в ряде случаев оказывается достаточно эффективным комплексный анализ, основанный на использовании результатов одновременного фиксирования в реальном масштабе времени двух и более функциональных параметров [1]. Как правило, он осуществляется с использованием микропроцессорных систем, включающих ПЭВМ, адаптер и периферийные датчики. При этом достаточно удобно и экономически целесообразно применение датчиков, фик-

сирующих не сам процесс поведения внутренних звеньев системы, а внешние результаты его проявления в виде виброакустических, температурных и прочих параметров. Так, например, взаимодействие динамически нагруженных элементов приводных механизмов может контролироваться по виброакустическим параметрам пьезоэлектрическими датчиками и (или) микрофонами, фиксирующими не сами процессы, а их отклик на корпусных элементах диагностируемого объекта в месте установки датчиков или в заданной точке пространства.

При построении анализа на основе зафиксированных в реальном масштабе времени данных неизбежно возникает вопрос об уровне корреляции между формой и амплитудно-частотными характеристиками действительных и фиксируемых процессов и стабильности ее поддержания измерительными трактами, в общем случае включающими передающие сигнал элементы диагностируемого объекта. Необходимо учитывать так же, что использование микропроцессорных средств контроля предполагает дискретизацию съема параметров процесса, частота которой может оказывать самое существенное влияние на полученные результаты. При этом, в процессе длительного контроля динамических процессов система оперирует значительными по объему массивами данных, полный визуальный контроль которых затруднителен и вряд ли целесообразен.

К одному из достаточно эффективных путей решения проблем, связанных с решением приведенных выше задач для сложных технических объектов, можно отнести создание интеллектуальных систем контроля, имеющих гибкое самоорганизующееся программное обеспечение, оперативно определяющее номенклатуру и объем использования микропроцессорной системы;

- исходя из технически обоснованного подбора контролируемых параметров и критериев их оценки определение рациональной номенклатуры и мест размещения периферийных датчиков;
- разработка близкой к адекватной полуимперической модели физических процессов, протекающих в диагностируемом объекте;
- создание рационального алгоритма контроля, включающего:
 - определение режимов тестирования и тарировки измерительных трактов, включая выявление зон собственных колебаний передающие сигнал элементы диагностируемого объекта;
 - выбор наиболее информативных режимов контроля, обеспечивающих рациональный объем съема контролируемых параметров;
 - обработку результатов тестирования с созданием на основе приня-

тых математических зависимостей полуэмпирической модели, описывающей динамические процессы физического взаимодействия контактирующих элементов;

- обработку результатов контроля с выходом на оценку функционального состояния диагностируемого объекта и прогнозирование его изменения в последующий период.

Создание технически обоснованной архитектуры с соответствующими уровню решаемых задач функциональными возможностями микропроцессорной системы позволяет корректно и с высокой степенью достоверности решать основные задачи диагностирования. Однако излишнее усложнение может привести не только к неоправданному удорожанию, но и к существенному снижению надежности функционирования.

Вопросы о технически обоснованном подборе контролируемых параметров и критериев их оценки, во многом определяющие номенклатуру и размещение периферийных датчиков, тесно взаимосвязаны с проблемой идентификации фиксируемой информации с функциональным состоянием диагностируемого объекта. При этом в ряде случаев весьма полезным оказывается использование экспертных систем.

Использование экспертных систем в области диагностирования позволяет сформировать алгоритмы типовых связей между контролируемыми параметрами и отклонениями в функционировании, принять корректное решение при возникновении нестандартных ситуаций, приводящих к возникновению ошибочных выводов и в целом обеспечить высокую эффективность.

Литература

1. Создание микропроцессорного комплекса для диагностики технических систем. Часть I./ Берестнев О.В., Басинюк В.Л., Берестнев Я.О., Антюшена Л.М.: Оперативно-информационные материалы ИНДМАШ НАН Беларуси, Минск, 1997,-60С.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ И ДЕКОРАТИВНАЯ ХИМИКО-ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Степанова Л.И., Воробьева Т.Н., Бодрых Т.И.,

Пуrowsкая О.Г., Рева О.В.

НИИ физико-химических проблем Белгосуниверситета, г. Минск

Металлизированные диэлектрики (пластмасса, керамика) сочетают полезные свойства металлов (электропроводность, улучшенные механические свойства, повышенная коррозионная стойкость, пониженные газо-, свето-, водопроницаемость и горючесть) и диэлектриков (низкий удельный вес, меньшие энергоемкость изготовления и стоимость), что делает их перспективными для применения в приборостроении, электронной и радиопромышленности, бытовой технике, при производстве фурнитуры и т.д.

Основными проблемами на пути расширения областей применения и внедрения в промышленность процессов металлизации диэлектриков являются обеспечение высокой прочности сцепления осаждаемых из растворов металлических покрытий с подложкой, достижение требуемых электрофизических и механических свойств покрытий и селективность осаждения при получении металлических рисунков на нефольгированных диэлектриках.

В данном сообщении в аннотационной форме суммированы результаты исследований коллектива сотрудников НИИ физико-химических проблем в области нанесения сплошных металлических покрытий и селективного осаждения металлов в виде рисунков или локальных покрытий на диэлектрики различной химической природы, позволившие создать ряд технологических процессов металлизации таких диэлектриков как АБС-пластики, полиимидная пленка, полистирол, полиэтилентерефталат, полиметилметакрилат, поликор, поликарбонат, стеклотекстолит и др.

Учитывая, что каждая операция в многостадийном процессе металлизации диэлектриков влияет на конечные свойства получаемых изделий, ясно, что условия их проведения определяются конкретной технологической задачей. Основными операциями процесса металлизации являются: обезжиривание, травление, активация, химическое осаждение тонкой пленки металла (обычно меди или никеля), химическое или электрохимическое осаждение металла с необходимыми свойствами до требуемой толщины.

Подготовка поверхности. В ходе многочисленных исследований нами установлено, что в результате травления происходит гидрофилизация поверхности, формируется развитый рельеф, требующийся для увеличения площади зоны адгезионного взаимодействия и замкового зацепления, создаются функциональные группы (-COOH, -OH, =SO₂ и др.), необходимые для химического и вандер-ваальсовского взаимодействия ионов металлов с подложкой при их адсорбции из растворов. Модификация подложки в значительной мере определяет микроструктуру тонких пленок металлов.

Травление стеклотекстолита с эпоксикаучуковым адгезионным слоем, а также АБС, полистирола, поликарбоната проводили в хромовосерно-кислых растворах при повышенной температуре в течение 10-30 мин, не допуская перетравливания, которое вызывает разрушение приповерхностных слоев подложки. Нередко травлению предшествовало предварительное набухание полимера в органических растворителях, что позволяло снизить температуру и уменьшить его длительность. Для травления полиимидной пленки, полиэтилентерефталата использовали щелочные растворы с органическими азотсодержащими добавками. Травление стекла, поликора, пьезо- и сегнетокерамики осуществляли в растворах, содержащих плавиковую кислоту или кислые фториды. Показано, что в случае гладких подложек травление должно обеспечивать получение мелкозернистого рельефа с размерами элементов не более 0,1 мкм.

Активирование. В процессе активирования на поверхности диэлектрика образуются каталитические центры, инициирующие процесс химического осаждения металла. Установлено, что качественные металлические покрытия формируются на диэлектриках, поверхность которых в результате процесса активирования содержит большое количество (до 1000 мкм²), нанометровой величины, равномерно распределенных частиц металла-активатора. Показано, что наряду с солями палладия для активирования поверхности диэлектриков перед химическим меднением можно использовать соединения меди [1], при этом достигается высокое качество металлического покрытия.

Разработан и защищен патентом способ активирования, основанный на нанесении на металлизированную поверхность токопроводящих слоев полисульфида меди, позволяющий проводить прямое гальваническое осаждение никеля, минуя стадию химического осаждения металла. Показана перспективность этого способа активирования при получении экранов электромагнитного излучения из металлизированных пластмасс.

Разработанные способы селективного палладиевого и беспалладиевого активирования используются при получении гибких кабелей и печатных плат на нефольгированной полиимидной пленке [2], а также при зарациивании медью сквозных отверстий в керамических подложках для получения вакуумноплотных токопроводов и заземляющих структур в производстве СВЧ-микросхем [3].

Химическое осаждение металлов. Достаточно подробно сведения о процессах химического осаждения металлов из водных растворов приведены в монографии [4], подготовленной при участии авторов статьи. Подобраны растворы химического осаждения меди и никеля, позволяющие получать на полиимиде мелкозернистые селективно осажденные пленки меди (толщиной до 1-3 мкм) и никеля (толщиной до 10 мкм) с минимальным размером проводников ~ 10 мкм и адгезией 600-800 Н/м [2].

Создан работающий при повышенных температурах (40-70°C) раствор химического осаждения пластичных пленок меди, пригодный для доращивания тонких пленок меди до толщины 30 мкм и более, характеризующийся скоростью осаждения 1-7 мкм/ч, высокой стабильностью, простотой эксплуатации и корректировки, отсутствием шлама в объеме раствора и явлений пассивации растущей поверхности, высокой рассеивающей способностью. Перечисленные свойства позволили использовать раствор: для селективного заполнения медью микроотверстий в керамических подложках с получением вакуумно-плотных покрытий; при металлизации отверстий печатных плат вместо традиционно используемых растворов тонкослойного химического меднения и гальванозатяжки; при получении равномерного медного покрытия на поверхности цилиндрических керамических резонаторов с узкими цилиндрическими отверстиями взамен серебряного покрытия, получаемого путем нанесения сереброросодержащих паст и последующего вакуумного отжига; при получении толстых (до 30 и более мкм) пластичных паяемых медных покрытий на изделиях сложной формы [3].

Разработаны и используются на практике низкотемпературные гипофосфитные растворы химического никелирования, позволяющие получать рисунки из черного никеля на полиметилметакрилате (оптические шкалы, шильдики), черные никелевые покрытия, характеризующиеся специфическими оптическими свойствами (коллекторы солнечной энергии, солнечные батареи, датчики космического и других ионизирующих излучений); отражающие никелевые покрытия (оптические призмы из полиметилметакрилата).

Разработаны процессы избирательного и неизбирательного осаждения сплавов Ni-W-P и Ni-Mo-P, характеризующихся высокой термостойкостью и хорошими резистивными характеристиками, что позволяет использовать их в качестве тонкопленочных резисторов, диффузионных барьеров и т.п.

Литература

1. Степанова Л.И. и др. // Вестник БГУ. Сер. 2. 1997. № 1. С. 14-18.
2. Воробьева Т.Н. // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1994. Т. 36. № 9. С. 1491-1498. (Polymer. Sci. Ser. A. Vol. 36. № 9. P. 1240-1246.).
3. Степанова Л.И., Бодрых Т.И. // Гальванотехника и обработка поверхности. 1993. Т.1. № 5-6. С. 33-36.
4. Химическое осаждение металлов из водных растворов. Под ред. Свиридова В.В. Минск. Изд-во Университетское. 1987. 270 с.

СОСТАВ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ ОСАЖДЕННЫХ СПЛАВОВ МЕДЬ-ОЛОВО И НИКЕЛЬ-ОЛОВО

*Бобровская В.П., Воробьева Т.Н., Рева О.В.
НИИ физико-химических проблем Белгосуниверситета*

Из литературы известно, что биметаллические электрохимически осажденные покрытия часто обладают комплексом ценных свойств, выгодно отличающих их от покрытий из индивидуальных металлов и металлургических сплавов. К таким свойствам относятся повышенная твердость, износостойкость, наличие антифрикционных свойств, декоративный внешний вид, улучшенная способность к пайке (для сплавов содержащих олово) [1-3].

Особый интерес представляют биметаллические электрохимически осажденные пленки Cu-Sn и Ni-Sn, воплотившие все перечисленные достоинства: микротвердость - до 3-6 ГПа, коэффициент трения бронз по стали - до 0,08-0,11 [1] в сочетании с высокой (особенно у покрытий Ni-Sn) коррозионной стойкостью [2,3]. Несмотря на эти преимущества электрохимически осажденных биметаллических покрытий, их осаждение из растворов не получило широкого распространения в технике. Виной тому является ряд причин, которые в комплексном виде в литературе не анализируются.

Биметаллические покрытия Cu-Sn и Ni-Sn наилучшего качества с

хорошо воспроизводимыми свойствами осаждаются из растворов, содержащих цианид-ионы. В отсутствие лигандов (например, сульфат, пиррофосфат, хлорид и фторид ионов) растворы нестабильны. Введение в растворы таких лигандов, как сульфат, пиррофосфат, хлорид и фторид ионы обеспечивает получение биметаллических пленок, но их качество, в первую очередь - постоянство состава и воспроизводимость свойств неудовлетворительны. Более того, биметаллические покрытия часто меняют внешний вид, теряют декоративные свойства при хранении или в результате мягких тепловых обработок. Причины этих недостатков и пути их преодоления в литературе не анализируются, а к внедрению результатов электрохимического осаждения биметаллических сплавов приходится относиться с осторожностью.

В данной работе проанализированы особенности химического, фазового состава и свойств электрохимически осажденных биметаллических покрытий Cu-Sn и Ni-Sn, влияние на них ряда факторов, особенности поведения покрытий при хранении и эксплуатации и даны рекомендации по улучшению качества и воспроизводимости свойств указанных покрытий. Часть результатов опубликована нами ранее [4-7], и в настоящей работе эти данные суммируются с новыми относительно влияния разных факторов на свойства и стабильность покрытий.

Установлено, что при использовании известных сульфатных и пиррофосфатных электролитов осаждения сплавов Cu-Sn при различных соотношениях концентраций солей обоих металлов в электролите (от 1:10 до 10:1), а также пиррофосфатных и фторидно-хлоридных растворов для осаждения сплава Ni-Sn при соотношении ионов этих металлов в растворе от 1:3 до 3:1, химический состав покрытий меняется по мере увеличения их толщины до 6-10 мкм, после чего перестает изменяться. Поэтому в практических рекомендациях необходимо учитывать не только традиционные параметры — соотношение ионов металлов, концентрацию лигандов в растворе, плотность тока, но также - требуемую толщину покрытий, от которой будет зависеть состав сплава.

Найдено, что химический и фазовый состав всех изученных покрытий различаются. Это свидетельствует о включении в биметаллические пленки рентгеноаморфных фаз. Их присутствие нередко заметно по уширению пиков на рентгенограммах, по появлению гало, по данным РФЭС и Оже спектроскопии, свидетельствующим о наличии фаз, не обнаруживаемых рентгенографически. В состав кристаллических фаз в пленках Cu-Sn входят пересыщенный твердый раствор олова в меди, а также интерме-

таллические соединения CuSn , Cu_6Sn_5 , Cu_nSn (n меняется от 3 до 6) и иногда олово и (или) медь. Кристаллическая фаза в пленках Ni-Sn включает интерметаллические соединения Ni_3Sn_2 , Ni_3Sn , Ni_3Sn_4 и иногда небольшое количество олова.

Данные ЭМ исследования показывают, что пленки, получаемые в оптимальных режимах электролиза, состоят из зерен с малыми размерами в пределах 50-250 нм. Особенностью процесса осаждения сплавов Cu-Sn и Ni-Sn является отсутствие укрупнения зерен по мере роста толщины пленок, а также сращивания их в компактные агрегаты, что обычно характерно для электрохимического осаждения индивидуальных металлов.

Установлено, что в пленках сплавов Cu-Sn и Ni-Sn протекают процессы низкотемпературной диффузии. Так, данные Оже спектроскопии свидетельствуют об одинаковом распределении металлов по всей глубине пленок обоих сплавов, несмотря на установленный факт, что каждой толщине пленок вплоть до 6-10 мкм соответствует свой состав. Кроме того, при низкотемпературном прогреве пленок (100-250 °C) происходит накопление более летучего компонента (Sn) в приповерхностном слое пленок. Процессы низкотемпературной диффузии обнаруживаются также по появлению в результате мягких тепловых обработок в составе покрытий атомов металла подложки и, наоборот, проникновению атомов металлов из сплавов в приповерхностные слои подложки на глубину до нескольких микрон. В ряде случаев при этом образуются интерметаллические соединения, а внешний вид покрытий и их свойства ухудшаются (появляются пятна, серые или бурые оттенки, хрупкость).

Полученные результаты позволили понять многие из причин недостаточной воспроизводимости процессов электрохимического осаждения сплавов Ni-Sn и особенно Cu-Sn, причины нестабильности характеристик этих биметаллических покрытий и наметить пути устранения указанных недостатков и улучшения свойств сплавов. Главными из указанных причин являются неравновесный состав сплавов и протекание в них низкотемпературных процессов диффузии и кристаллизации при эксплуатации и хранении.

Авторами сообщения найдены пути увеличения стабильности свойств электролитов за счет введения дополнительных лигандов, коррозионной устойчивости покрытий, снижения их пористости уже при малых толщинах, а также стабилизации их свойств при хранении. Важнейшими из них являются увеличение доли рентгеноаморфной составляющей покрытий, что позволяет уменьшить пористость, увеличить блеск в отсутствие блес-

кообразующих добавок, уменьшить хрупкость и внутренние напряжения. В качестве одного из возможных путей предлагается осаждение покрытий Cu-Sn в специально подобранном режиме периодического изменения плотности тока, обеспечивающем поочередное осаждение сплавов, обогащенных тем или иным компонентом. Предлагается обращать особое внимание на тепловые режимы обработок, эксплуатации и хранения покрытий, а также учитывать роль природы подложек и толщины осаждаемых покрытий.

Литература

1. Иванов А.Ф. //Журн. Всесоюзн. хим. общ-ва им. Д. И. Менделеева. 1988. Т.33. № 2. С.126-138.
2. Тютин К.М., Космодамианская Л.В. // Там же, с.146-152.
3. Jordan M., Leuze E.G. /The electrodeposition of tin and its alloys. Sauglau, Wurt. Germany. 1995.
4. Воробьева Т.Н., Бобровская В.П., Свиридов В.В. // Известия АН Беларуси, сер. хим. наук. 1997. № 3. С.38-43.
5. Vorobyova T.N., Bobrovskaya V.P., Sviridov V.V. // Metal Finish. 1997. V.95, №. 11. P.14-20.
6. Воробьева Т.Н., Бобровская В.П., Рева О.В., Ивашкевич Л.С. // Тез.докл. II конференции «НОМАТЕХ-96», Минск 15-17 мая 1996. /Материалы, технологии, инструмент. 1996. № 2. С.51-52.
7. Воробьева Т.Н., Свиридов В.В., Рева О.В., Бобровская В.П. //Там же, с.103.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДУГИ, ГОРЯЩЕЙ В ПЛАЗМОТРОНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА С МЭВ

*Бублиевский Д.А.**, *Каролинский В.Г.* *Кузьмич В.А.*,
Пекун А.И., *Сазонов М.И.*, *Хвисевич В.М.*
** Институт тепло- и массообмена НАНБ,*
Брестский политехнический институт

Формирование и стабилизация дуги в канале плазмотрона происходит при взаимодействии ее с потоком нагреваемого газа и стенкой электродазарядной камеры. Это взаимодействие носит как тепловой, так и электрический характер и в значительной мере определяется свойствами газа.

Один из способов увеличения мощности плазмотрона и достижения заданной температуры газа путем увеличения длины и напряжения дуги основан на применении между электродами изолированной от них медной вставки (МЭВ). Анализ результатов исследований показал, что целесообразно МЭВ выполнять многосекционной с подачей холодного газа в зазоры между секциями небольшой толщины.

В результате исследований установлено, что секции МЭВ заряжаются до потенциала некоторой точки участка столба дуги внутри секции из-за наличия несамостоятельного разряда между столбом и внутренней стенкой секции. Поэтому разность потенциала между дугой и секцией МЭВ становится существенно меньше, чем в случае несекционированной МЭВ при одинаковых их длинах. В плазмотронах с водяным охлаждением секций возможна утечка заряда с секции из-за электропроводности воды. Вследствие этого возможна ситуация, когда разность потенциалов столба и секции МЭВ окажется большой и достаточной для пробоя, что приведет к возникновению дуг по секциям и выходу плазмотрона из строя. Для того, чтобы избежать такого пробоя, секции подключались к системе охлаждения водой достаточно длинными дюритовыми шлангами, а потенциал секций постоянно контролировался в процессе проведения экспериментов. Таким образом, можно ожидать, что использование секционированной МЭВ в сочетании с распределенной подачей части рабочего газа для организации газовой завесы позволит увеличить не только длину, напряжение и мощность дуги при заданном токе, но и существенно повысить тепловой к.п.д. плазмотрона.

1. Описание экспериментальной установки

В экспериментальном плазмотроне использовались МЭВ с различным внутренним диаметром. Диаметр канала МЭВ в различных экспериментах составлял 4 мм, 6 мм, 8 мм или 10 мм. Число секций варьировалось от 3 до 11 штук, что позволяло изменять длину L МЭВ. Толщина одной секции экспериментального плазмотрона с учетом межсекционных изолирующих прокладок составляла 5,25 мм.

Рабочий газ (аргон) с расходом $G = 5-40$ л/мин подавался с закруткой в зазор между катодом и первой секцией МЭВ. Этот расход газа измерялся ротаметром типа РМ-2,5 ГУЗ, а давление аргона — манометром ВПЗ-У -1 - 0 атм. Кроме того, аргон подавался между секциями с расходом $G = 1-5$ л/мин. Этот расход измерялся ротаметром типа РМ-0,63 ГУЗ, а давление — манометром типа ОБМ В1-160 со шкалой -1 - 0 - 1,5.

Напряжение дуги и разность потенциалов между секциями и катодом

измерялись вольтметрами типа М826 с точностью 0,75%, а ток дуги измерялся амперметром типа М42100 класса 1,5. Давление в вакуумной камере поддерживалось равным 300 ÷ 800 Па и измерялось вакуумметром ВТЗ-1М.

Запуск плазмотрона осуществлялся путем кратковременного замыкания стержнем с электромагнитным приводом катода и первой секции МЭВ. При этом все секции перед запуском подключались к аноду. После зажигания короткой дуги между катодом и первой секцией, секции поочередно отключались от анода, при этом дуга вихревым потоком аргона устанавливалась на оси электроразрядной камеры.

2. Вольт-амперные характеристики

На рис. 1-2 приведены типичные вольт-амперные характеристики дуги, горящей в плазмотроне с МЭВ.

Эти характеристики определены при токах дуги 30-90 А, расходах ар-

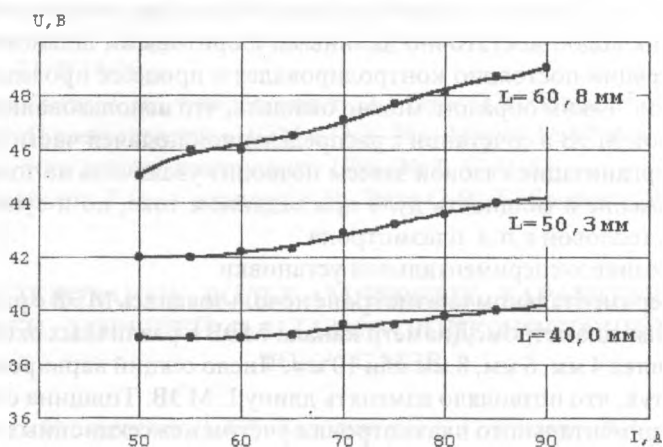


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики дуги в плазмотроне с МЭВ. $d = 10$ мм, $G = 13,7$ л/мин, $P_k = 64 \cdot 10^2$ Па, $P_c = 2,34 \cdot 10^4$ Па, $G_{оси} = 11,2$ л/мин, $G_{под} = 2,5$ л/мин.

гона $G = 6-25$ л/мин, диаметрах электроразрядной камеры $d = 4-10$ мм.

При исследовании этих характеристик плазматрон устанавливался на вакуумной камере установки ВУ-1Б.

Из приведенных рисунков видно, что вольт-амперные характеристики дуги являются восходящими. В результате проведенных экспериментов определено, что с увеличением межэлектродного расстояния путем добавления секций МЭВ напряжение дуги возрастало. После каждого проведенного эксперимента производился осмотр плазматрона, при этом

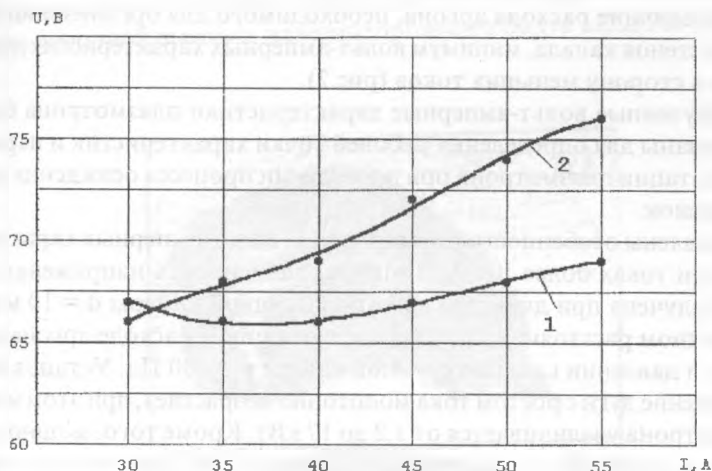


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики дуги в плазматроне с МЭВ при различных соотношениях расхода аргона G_i на организацию газовой завесы и основного расхода G_o .
 $d = 4 \text{ мм}$, $L = 29,3 \text{ мм}$, $G = 8,6 \text{ л/мин}$, $P_k = 54 \cdot 10^2 \text{ Па}$, $P_c = 34 \cdot 10^4 \text{ Па}$,

$$1 - \frac{G_i}{G_{\text{осн}}} = 0,7, 2 - \frac{G_i}{G_{\text{осн}}} = 0,18.$$

было установлено отсутствие горения дуги на секции. Это означает, что дуга горела в расчетном режиме на оси плазматрона. Обработка полу-

ченных данных позволяет сделать вывод, что вольт-амперные характеристики дуги имеют минимум при критерии I/d меньше $7,5$ А/мм. Такой вид характеристик позволяет эксплуатировать плазмотрон, используя силовой источник с жесткой вольт-амперной характеристикой, и этим обеспечить электрический к.п.д. плазмотрона близким к единице.

Изучение влияния перераспределения расхода аргона на входе в электроразрядную камеру и расхода газа в щели между секциями МЭВ показало, что положением минимума вольт-амперных характеристик дуги можно управлять. Так, снижая отношение величины основного расхода газа к величине расхода аргона, необходимого для организации газовой завесы стенок канала, минимум вольт-амперных характеристик дуги сдвигается в сторону меньших токов (рис.2).

Полученные вольт-амперные характеристики плазмотрона будут использованы для определения рабочей точки характеристик и параметров эксплуатации плазмотрона при проведении процесса осаждения углеродных пленок.

Выявлены особенности формирования вольт-амперных характеристик дуги при токах более 100 А. Типичная зависимость напряжения дуги от тока получена при диаметре электроразрядной камеры $d = 10$ мм, межэлектродном расстоянии $L = 29,3$ мм, суммарном расходе аргона $G = 13,7$ л/мин, и давлении газа в вакуумной камере $p = 600$ Па. Установлено, что напряжение дуги с ростом тока монотонно возрастает, при этом мощность плазмотрона увеличивается от $1,2$ до 17 кВт. Кроме того, мощность плазмотрона может быть увеличена не только за счет увеличения тока дуги, но и за счет увеличения межэлектродного расстояния.

Таким образом, исследования вольт-амперных характеристик дуги позволяют сделать следующие выводы.

1. Вольт-амперные характеристики плазмотрона с МЭВ являются восходящими при отношении тока к диаметру канала электроразрядной камеры более 30 . Это позволяет использовать стандартные силовые источники питания плазмотрона с жесткой характеристикой и нет необходимости использовать специальные источники электропитания с крутопадающей характеристикой, которые значительно дороже. Применение источников питания плазмотронов с жесткой характеристикой позволяет поднять электрический к.п.д. установки до единицы.

2. Мощность плазмотрона можно увеличить не только за счет увеличения тока дуги, но и за счет увеличения длины МЭВ и напряжения дуги.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ХОЛОДНОВЫСАДОЧНЫХ МАТРИЦ ОТ ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

В. М. Кенько, И. Н. Степанкин, А. И. Столяров.

Гомельский политехнический институт им. П. О. Сухого.

Исследовали влияние на напряженно-деформированное состояние радиуса сопряжения формообразующих поверхностей матриц третьего перехода для холодной высадки железнодорожного болта М22х70. Оценка



Рис. 1 Характер разрушения холодно-высадочных матриц с радиусом сопряжения а) 2 мм; б) 5 мм

распределения нагрузок проводилась с использованием компьютерной программы ANSYS 5.3 реализующей метод конечных элементов.

Радиус сопряжения формообразующей поверхности матрицы с от-

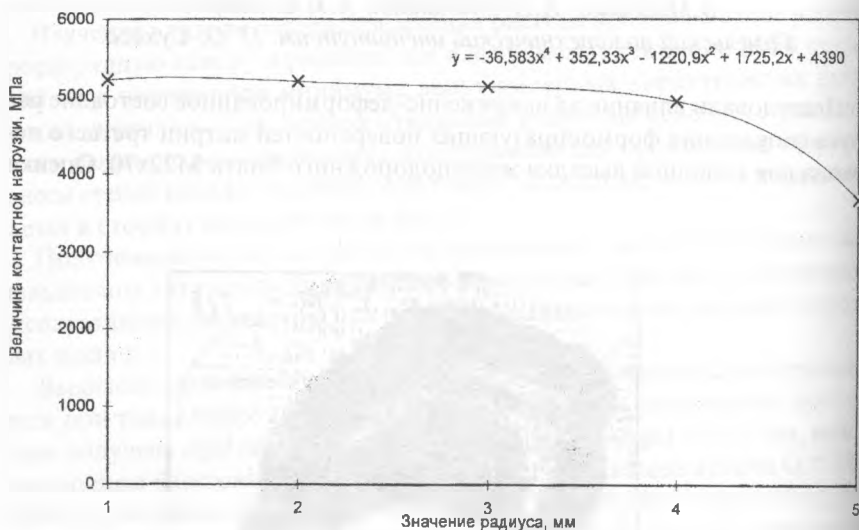


Рис.2. Зависимость контактной нагрузки в зоне радиуса сопряжения формообразующей поверхности с отверстием под стержень болта.

вертием под стержень болта у матрицы прототипа имел величину 3,1 мм. При этом в процессе эксплуатации матрицы поверхность металла в зоне радиуса интенсивно изнашивалась и растрескивалась (рис. 1 а).

Предположили, что увеличив радиус можно уменьшить контактную нагрузку на металл и тем самым снизить скорость разрушения матрицы. С помощью конечно-элементного анализа был проведён расчёт эквивалентных напряжений возникающих в матрицах с радиусами сопряжения формообразующих поверхностей имеющими следующие значения: 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм, 5мм. Изменение эквивалентных напряжений в зависимости от радиуса сопряжения отражено на рис.2.

Учитывая результаты расчёта была изготовлена партия матриц с ра-

диусом сопряжения 5 мм, что является предельно допусκαемым значени-ем требованиями чертежа изготавливаемого болта. После проведенных испытаний матриц, стойкость которых повысилась в 2-2,2 раза, на рабочей поверхности матриц в зоне радиуса сопряжения формообразующих поверхностей отмечено отсутствие проявлений износа и интенсивного разрушения (рис. 16). Это говорит о том, что увеличение радиуса привело к оптимальному распределению нагрузок по рабочей поверхности матрицы и улучшило её работоспособность.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ, УПРОЧНЕННЫХ ТВЕРДЫМ СПЛАВОМ

Лысов А. А., Аришников А. С., Куксинский И. Н.

Полоцкий государственный университет

В последние годы широкое развитие получили различные методы восстановления и упрочнения изношенных деталей машин, в частности уплотнительных поверхностей запорной арматуры. Однако, высокие требования плоскостности и шероховатости таких поверхностей вызывает значительные трудности при освоении технологии финишной обработки таких изделий. Использование абразивных паст и шлифовальных шкур для отделочной обработки твердосплавных труднообрабатываемых поверхностей мало эффективно из-за низкой производительности и возможности шаржирования обрабатываемых поверхностей.

Значительно повысить производительность и качество обработки уплотнительных поверхностей позволяет алмазное шлифование планетарными дисками. Они представляют собой корпус-водило, в котором эксцентрично смонтированы шлифовальные шпиндели, оснащенные алмазными шлифовальными кругами. При вращении планетарного диска шлифовальные шпиндели дополнительно вращаются вокруг собственной оси за счет сил трения. Однако, это вращение имеет случайный, нерегулярный характер, что приводит к неравномерному износу алмазосодержащего слоя и не всегда обеспечивает стабильное качество и высокую производительность обработки.

Для обеспечения регулярного сетчатого рисунка шлифования и равномерного износа алмазного инструмента на кафедре «Технология машиностроения» Полоцкого государственного университета была предло-

жена новая конструкция планетарного диска, предусматривающая дополнительное принудительное вращение шлифовальных шпинделей. При использовании предложенной технологической схемы резания при определенных условиях образуется равномерный сетчатый рисунок шлифования и наблюдается равномерный износ алмазосодержащего слоя. С целью изучения микрогеометрии обрабатываемой поверхности по предлагаемой схеме финишной обработки была разработана математическая модель процесса, описывающая движение режущих зерен алмазного слоя, позволяющая отслеживать закономерности формирования следов обработки каждого активного зерна. Данная модель реализовывалась с помощью персонального компьютера, на котором воспроизводился рельеф обрабатываемой поверхности при различных технологических параметрах обработки, направления взаимного вращения планетарного диска и шлифовальных шпинделей, концентрации алмазных зерен, их фракционного состава и топографии расположения на рабочей поверхности инструмента.

За критерий качества обработки принималась приведенная неравномерность распределения следов микрорезания и шероховатость обрабатываемой поверхности. На основе анализа полученных рисунков шлифования определены оптимальные структурно-топографические и фракционные характеристики алмазосодержащего слоя. Установлено, что наибольшая эффективность резания и стойкость инструмента обеспечивается при упорядоченном расположении алмазных зерен на поверхности инструмента в виде секторов, ограниченных кривыми близкими по форме к логарифмической спирали.

Результаты компьютерного моделирования проверялись экспериментально при отделочной обработке уплотнительных поверхностей корпусов задвижек Ду150...Ду250, восстановленных самофлюсующимися порошками на никелевой основе типа ПГ-СР. Было показано, что обработка по предложенной технологической схеме позволяет обеспечить повышение эффективности работы резания алмазных зерен, высокое качество обрабатываемой поверхности и производительности обработки. При этом стойкость инструмента повышается в 1,5 раза, производительность - на 30...40%.

В результате исследования были определены оптимальные соотношения скоростей вращения шлифовальных шпинделей и планетарного диска, обеспечивающие минимальную шероховатость обрабатываемых твердосплавных поверхностей при заданной концентрации и топографии

расположения алмазных зерен на рабочей поверхности инструмента.

Разработанная модель позволяет воспроизводить микрогеометрию обрабатываемой поверхности в зависимости от структурно-конструктивных особенностей алмазного инструмента матрично-наполненного типа, оптимизировать конструкцию данного инструмента и технологические параметры обработки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСА РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПРУЖИННЫХ МЕЛЬНИЦ

Кургузинов А. М.

Могилевский машиностроительный институт

Качество продукции ряда отраслей промышленности, прежде всего строительной, промышленности строительных материалов, дорожного строительства, электронной, химической и др. во многом зависит от качества исходного сырья - крупности, чистоты, формы зерен порошков и т.д.

Центральными операциями многих стадий таких производств является измельчение, механоактивация и смешивание. Это чрезвычайно массивные, трудоемкие и энергоемкие операции.

Например, сейчас в мире добывается не менее 25 млрд. тонн минерального сырья в год. В нашей стране на цели получения порошков расходуется около 10 % всей потребляемой промышленностью электроэнергии, несколько миллионов тонн высококачественных сталей материалов для измельчительной гарнитуры.

Значителен удельный износ рабочих частей измельчителей, составляющий 1...3 кг/т готовой продукции.

Решить проблему износа мелющей фурнитуры и рабочих органов (РО) мельниц можно через создание гаммы конструкций аппаратов, обеспечивающих селективную обработку материала с активной циркуляцией через зону разрушения, в которой происходит комплексное воздействие на частицу материала с максимально возможным числом единичных актов разрушения в единицу времени без излишних холостых проходов абразивной среды через зону разрушения. Таким устройством на наш взгляд может служить пружинный рабочий орган (ПРО) и аппараты на его основе (см. рисунок 1).

Мельницы для небольших объемов производства типа региональных

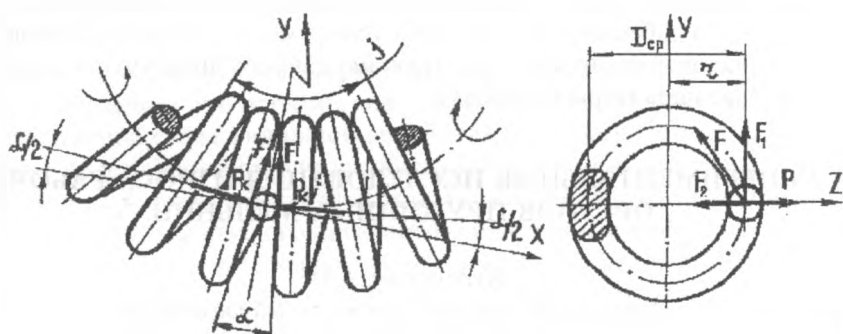


Рисунок 1 - Расчетная схема взаимодействия ПРО на частицу материала

помольных установок с производительностью 0,5... 5 т/ч по цементному клинкеру, основу которых составляют ПРО, уже эксплуатируются в различных организациях.

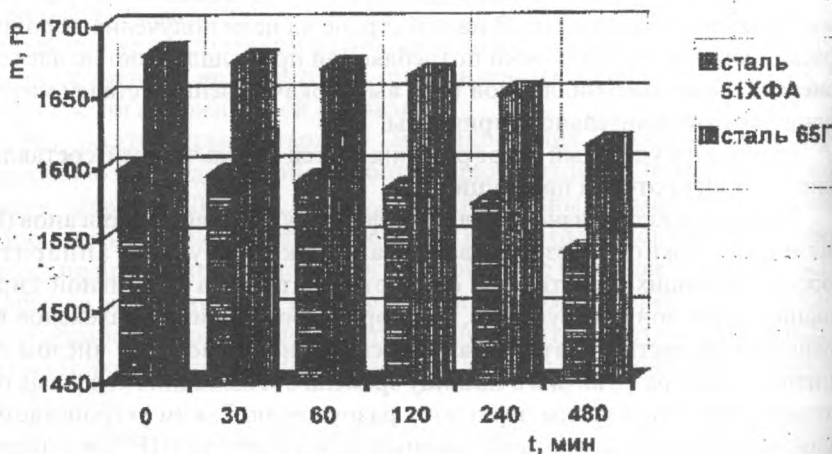


Рисунок 2 - Зависимость потери массы m ПРО от времени работы t

Намол в готовый продукт материала РО и корпуса на порядок ниже, чем у других мельниц, например, шаровых. Однако направленных, широко масштабных исследований в области износа ПРО до настоящего времени не проводилось.

Нами проведены исследования по выявлению влияния износа Δt рабочих поверхностей и витков ПРО на усилие обжатия R_k частиц материала

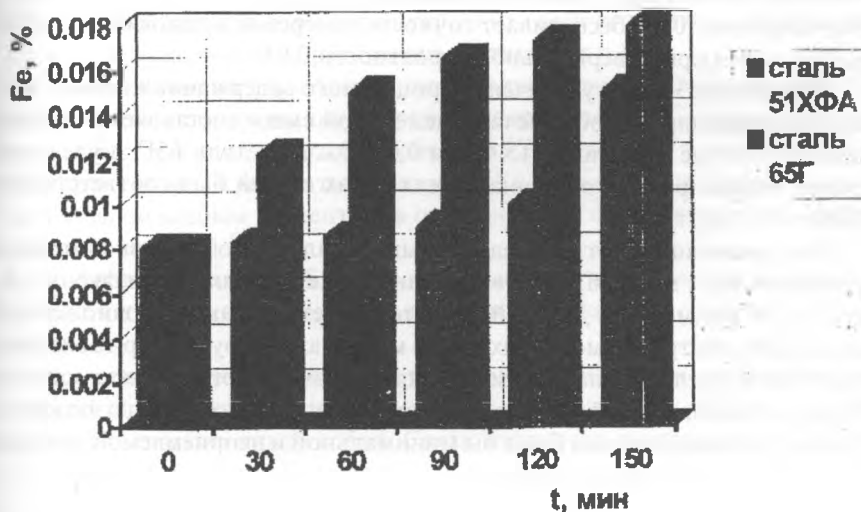


Рисунок 3. - Изменение содержания металла в продукте от времени t обрабатываемого последним.

В ходе эксперимента была исследована зависимость изменения массы m и длины L рабочего органа от времени обработки t песчано-цементной смеси с максимальной крупностью частиц до 4 мм.

На рисунке 2 представлена зависимость потери массы m рабочего органа от времени работы t и материала проволоки пружины.

Графическая зависимость выше названных параметров ясно указывает на преимущества пружинных рабочих органов, выполненных из проволоки 51ХФА по отношению к проволоке из стали 65Г. С увеличением

времени измельчения наблюдается постепенное снижение скорости износа. Значительно меньший износ и более высокая стабильность геометрических размеров рабочего органа из стали 51ХФА предполагает и меньший намол материала пружины в объем готового продукта.

Исследование (см. рисунок 3) по определению кинетики намола материала рабочего органа и камеры мельницы были исследованы с учетом методики ГСО 3257-85, предназначенной для определения процентного содержания магнитного материала (Fe) в пробах. Применяемый прибор «Магнит-704» обеспечивает точность измерений в диапазоне от 0,004 до 2,0 % (Fe) при доверительной вероятности 0,95.

Из рисунка 3 видно увеличение процентного содержания железа от времени обработки, в пробе песчано-цементной смеси составляет в среднем 0,0028 % в час для стали 51ХФА и 0,004 % для стали 65Г, а удельный износ, только рабочего органа $q_{\text{м}}$ для таких сталей был соответственно 0,065 и 0,11 кг/т.

По сравнению с другими мельницами, с аналогичной производительностью по классу минус 63 мкм, в пружинных мельницах намол фурнитуры от 2 до 10 раз меньше. Данный характер кинетики намола возможен при минимальном трении мелющих тел по материалу загрузки. При более значительном удельном намоле материала рабочего органа, из-за малости массы пружинного рабочего органа долговечность последнего, по критерию абразивного износа была бы минимальной и неприемлемой даже для лабораторного оборудования.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Благодарный В. М.

Могилевский машиностроительный институт

Передаточный механизм привода, состоящий из зубчатых передач, опор, валов, муфт и т.п., т.е. механических элементов, представляет собой механическую систему (МС).

Как свидетельствуют испытания и эксплуатация, причинами отказов МС являются отказы одного, двух, реже - нескольких элементов системы, которые оказываются наиболее слабыми по сравнению с другими. Поэтому при прогнозировании надежности МС вполне приемлемой оказы-

вается концепция слабого элемента; задача определения надежности МС сводится к задаче определения надежности слабого элемента. Слабыми элементами МС являются элементы, которые обладают худшими характеристиками работоспособности по сравнению с другими, находятся в наиболее тяжелых условиях функционирования.

Характеристика работоспособности элемента - это обобщенный показатель, зависящий от множества факторов, определяющих состояние элемента (нагруженности, скорости и точности перемещения, воздействия окружающей среды, внешних и внутренних свойств элемента, характеристик материала, связей с другими элементами и т.п.).

Приняв за нормативное значение характеристику работоспособности X_n элемента, обеспечивающего работоспособность МС, будем сравнивать характеристики работоспособности X_i остальных элементов МС с этим значением. Те элементы, у которых $X_i < X_n$, будут отнесены к предпочтительно слабым элементам, в основном они определяют надежность системы.

Оценка работоспособности элементов осуществляется на основе принципов системного подхода: целостности, связанности и существенности.

В общем случае МС декомпозируется на подсистемы и элементы. Простейший элемент состоит из одной кинематической пары или звена. Элементы МС связаны между собой. Связи элементов делятся на активные и пассивные.

При анализе МС первоначально рассматривается ее модель в виде структуры системы без учета особенностей элементов. Это позволяет на первом этапе исследования ограничить объем информации только теми данными, которые характеризуют лишь структуру МС. Каждый элемент характеризуется структурной значимостью, определяемой количеством и качеством связей элемента с другими.

Модель МС представляется в виде графа $G(X, R)$, где X - множество составляющих его вершин - элементов МС, а R - множество связей между вершинами. В множество вершин X графа МС включается особая вершина X_0 , обозначающая окружающую среду, под которой можно принимать также взаимодействие рассматриваемой МС с другими системами.

Структурная модель МС записывается в виде конечной квадратной матрицы смежности $R^n = \|r_{ij}\|_{n \times n}$, где n - число вершин графа G , а элемент r_{ij} матрицы R^n , стоящий на пересечении x_i строки с x_j столбцом, определяет

число дуг, принадлежащих вершинами x_i и x_j . Определение структурной значимости элемента производится путем сложения элементов матрицы R^n по строкам.

Следующим этапом исследования является анализ функционирования МС и элементов. МС представляется в виде модели, целевая функция которой выражается

$$\{F_2, \omega_2, 3\Pi_2\} = u\{F_1, \omega_1, 3\Pi_1\}$$

при ограничениях

$$P_c(t) \geq [P(t)], \quad t \geq [t]$$

где F - сила, ω - скорость, 3Π - закон перемещения, u - передаточная функция; индексы 1 и 2 принадлежат соответственно входу и выходу МС;

$[P(t)]$ и $[t]$ - заданные значения вероятности безотказной работы и ресурса МС; $P_c(t)$ - вероятность безотказной работы и ресурс слабого элемента.

Целевая функция МС определяет ее показатели функционирования. Каждый показатель, входящий в комплексный показатель функционирования элемента, определяется как отношение действительного значения параметра δ_i к его нормированному значению $\delta_{нi}$. Совокупность показателей функционирования характеризует элемент с разных сторон с точки зрения участия в функционировании системы, поэтому комплексный показатель функционирования представляет собой объединение частных показателей. Учитывается продолжительность работы элемента в соответствующем режиме работы относительным коэффициентом, принадлежность элемента разным подсистемам весовым коэффициентом.

Структура и связи элементов МС оцениваются с помощью функциональной значимости элемента (ФЗЭ). Определение ФЗЭ производится путем преобразования структурного графа G в функциональный G' . При этом в качестве графа G' берется множество ребер графа G , а в качестве ребер графа G' взято множество вершин графа G . Таким образом, функциональный граф состоит из множества вершин, где каждая вершина является функцией перехода, и из множества ребер, где каждое ребро есть элемент системы.

Для определения показателей ФЗЭ производится численный анализ структурного и функционального графов МС, для чего вершинам и ребрам графов предаются соответствующие веса. В качестве весов ребер функционального графа G' служат комплексные показатели функциони-

рования элементов. Составляется матрица смежности функционального графа G' , ранг любой i -й вершины графа определяется по матрице смежности путем сложения комплексных показателей связанных между собой элементов.

Записывается матрица смежности структурного графа, в качестве элементов которой подставляют значения рангов вершин функционального графа.

Сумма элементов в каждой строке матрицы соответствует функциональной значимости элементов.

С целью уменьшения времени и объема расчетов последующей оценки работоспособности элементов, а также в соответствии с концепцией слабого элемента формируется группа функционально значимых элементов, т.е. таких элементов, у которых показатели ФЗЭ наибольшие. Элементы, попавшие в группу функционально значимых, подвергаются анализу для определения характеристик работоспособности. Назначается «стандарт», т.е. элемент с нормативными значениями критериев работоспособности. Слабый элемент из числа функционально значимых элементов определяется по следующему условию

$$\forall \left| \vec{\theta} \right| \left\{ \max \left(\left| \vec{\theta} \right| - \left| \vec{\theta} \right| \right) < 0 \right\} \Leftrightarrow \left| \vec{\theta} \right| \in C$$

где C - множество слабых элементов.

Если рассчитать функционально значимые элементы по критериям работоспособности не удастся, то используются для их оценки работоспособности абсолютные и косвенные информативные параметры. Информативные параметры проверяются по критериям достаточности, существенности и некоррелированности. Для всех параметров по каждой кинематической паре и звену определяются коэффициенты близости. Сумма коэффициентов близости по всем параметрам является характеристикой работоспособности элемента. По величинам характеристик работоспособности элементы выстраиваются в ряд приоритетности. Элемент, занимающий первое место в этом ряду, является предположительно слабым, он должен в первую очередь быть подвергнут тщательному анализу и расчетам, и если надо, то ускоренным испытаниям для оценки его работоспособности.

После определения надежности слабых элементов производится оцен-

ка надежности всей МС методами схемной (структурной) надежности для трех типов систем: с последовательным, параллельным и смешанном соединением элементов.

ТЕХНОЛОГИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ИГЛ

Божкова О. В.

Могилевский машиностроительный институт

Иглы для промышленных и бытовых швейных и трикотажных машин, выпускаемые в странах СНГ, не соответствуют мировому уровню качества. Острота игл, чистота поверхности, состояние ушка для нити - все эти параметры ниже зарубежных. Поэтому отечественные иглы не могут быть использованы в импортных машинах, у которых частота ударов иглы составляет от 12 до 18 тысяч в минуту, у отечественных машин частота ударов иглы не более 6 тысяч в минуту [1].

Повысить качество отечественных игл можно путем организации высококачественной финишной обработки. Эффективная и качественная финишная обработка, сочетающая процессы шлифования и полирования одновременно, может быть достигнута с помощью магнитно-абразивного способа обработки.

Особенностью магнитно-абразивной обработки является то, что этот процесс является мягким, упругим, не допускающим прижогов поверхности. Это очень важно для такой детали, как игла, которая обладает очень малыми геометрическими размерами в поперечном сечении и невысокой жесткостью. При использовании магнитно-абразивной обработки повышается качество поверхности: снимаются заусенцы, мелкие царапины и задиры, повышается чистота поверхности, снижается волнистость, повышается острота вершины иглы. За счет интенсивного действия абразивных частиц изменяется микроструктура поверхностного слоя, повышается твердость и износостойкость поверхности.

Для более качественного и эффективного шлифования и полирования игл при магнитно-абразивной обработке (МАО) необходимо обеспечить возможность контакта абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью иглы в различных направлениях [2]. Чем больше направлений относительного движения частиц и детали, тем в большем количестве мест частицы контактируют с обрабатываемой поверхностью иглы, при этом множество частиц касается обрабатываемой поверхности своими граня-

ми в различных точках контакта. Такой контакт с обрабатываемой поверхностью иглы можно назвать неупорядоченным, хаотичным. При хаотичном контакте несвязанных частиц абразива с деталью рельеф поверхности обрабатываемой иглы не может быть регулярным и, следовательно, имеется больше возможностей для срезания всех неровностей и создания более гладкой поверхности.

Сколько же направлений движений может быть получено при MAO для такой детали, как игла? Для того, чтобы обеспечить одинаковые условия обработки для всех игл, вставленных в патрон установки, необходимо обеспечить патрону вращательное движение вокруг своей оси. В этом случае происходит снятие заусенцев, выступающих за основную поверхность, а также выглаживание всех задиров, выступов, полирование поверхности. Для заострения игл необходимо обеспечить иглам вертикальное возвратно-поступательное движение. При этом абразивные частицы должны включаться в работу лишь при выходе иглы из ванны с абразивной суспензией. Происходит выглаживание и полирование поверхности иглы вдоль оси.

Чтобы контакт обрабатываемых поверхностей игл происходил с разными абразивными частицами, т.е. чтобы контакт был хаотичным, каретка, с находящейся в ней суспензией, должна иметь возвратно-поступательное продольное движение между полюсами магнитов. И, наконец, под действием магнитного поля абразивные частицы в каретке получают поперечное движение [3]. Таким образом, в процессе MAO для обработки игл обеспечивается четыре взаимных относительных движения абразивных частиц и деталей: круговое (планетарное) и вертикальное возвратно-поступательное движение иглы, продольное и поперечное движение каретки и абразивных частиц (рис. 1).

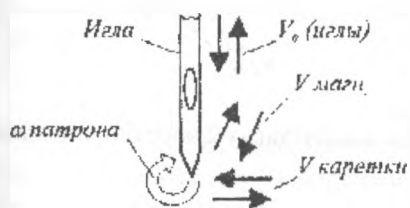


Рисунок 1. Траектория и относительные движения иглы в процессе MAO

и вертикальное возвратно-поступательное движение иглы, продольное и поперечное движение каретки и абразивных частиц (рис. 1).

Абсолютная скорость произвольной точки обрабатываемой поверхности иглы (рис.2) определяется из выражения

$$V_{\Sigma} = \sqrt{V_{\text{п}}^2 + V_{\text{к}}^2 + V_{\text{в}}^2},$$

где V_n — окружная скорость иглы, вставленной в патрон;

$$V_n = \frac{\pi d n}{6 \cdot 10^4}$$

d — диаметр расположения игл в патроне, мм;

n — частота вращения патрона, мин⁻¹;

v_k — скорость возвратно-поступательного движения каретки, которая является переменной величиной, т.к. движение каретки осуществляется при помощи кулачка. Скорость v_k легко определить при известных геометрических размерах кулачка и частоте его вращения.

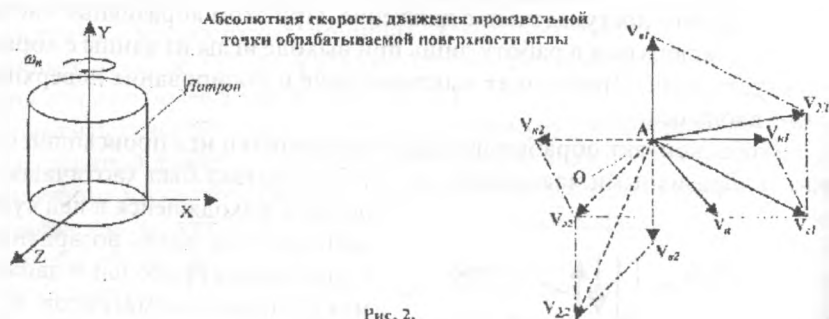


Рис. 2.

Вектор скорости точки K_2 , принадлежащей звену 2 каретки, определяется из векторного уравнения

$$\vec{V}_{k2} = \vec{V}_{k1} + \vec{V}_{k2k1}$$

где $V_{k1} = \omega_{k1} \cdot OK_1$ — вектор скорости точки, принадлежащей звену

1-кулачку, перпендикулярен радиус-вектору OK_1 ;

\vec{V}_{k2k1} — вектор относительной скорости параллелен касательной, проведенной к профилю кулачка в точке касания его с кареткой;

ω_{k1} — угловая скорость кулачка;

V_{θ} — скорость вертикального возвратно-поступательного движения патрона с иглами. Эта скорость определяется скоростью импульса электромагнитной катушки.

Таким образом, зная закон движения произвольной точки поверхности

иглы, можно определить скорость движения самой иглы в рабочей зоне, а также положение ее по отношению к магнитным силовым линиям в любой момент времени. И, следовательно, можно определить оптимальное положение иглы в рабочей зоне, когда резание поверхности иглы абразивными частицами будет наиболее интенсивным.

Спроектирована и изготовлена установка, представляющая собой конструкцию, состоящую из электромагнита с двумя полюсами, между которыми находится ванна с абразивно-магнитной субстанцией. Ванна свободно перемещается по направляющим между полюсами электромагнита.

На несущей плите закреплено приводное устройство с патронами для игл. Приводное устройство обеспечивает три относительных движения абразивных частиц и игл, четвертое движение осуществляется за счет магнитного поля.

В течение одного цикла обрабатывается в четырех патронах сорок игл. В это время в запасные патроны вставляются иглы для последующей обработки.

Литература

1. Божкова О.В., Благодарный В.М. Качество отечественных и зарубежных швейных игл // Современные методы и средства электромагнитного контроля и их применение в промышленности: тез. докладов VI межвуз. научно-техн. конф. стран СНГ, Могилев, 1995 с.59.

2. Сакулевич Ф.Ю., Кожуро Л.М. Объемная магнитно-абразивная обработку. Мн.: Наука и техника, 1978, 168 с.

3. Божкова О.В. Кинематика магнитно-абразивной обработки швейных игл /// Новые технологии и оборудование в промышленности: Сб. научных трудов, Могилев, 1997, с. 19-22.

ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА НА ОБЩУЮ НАРАБОТКУ ДО ОТКАЗА ПРУЖИННОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА

Кургузиков А. М., Партнов С. Б.

Могилевский машиностроительный институт

Технологические процессы большинства производств содержат такой энергоемкий процесс как измельчение. Это наиболее насыщенный процесс многообразием технических средств и в тоже время наиболее несовершенный. КПД наиболее распространенных мельниц для размола минеральных материалов не превышает 1% в лучшем случае, не говоря уже о других существующих проблемах в этой области, например, износ и недолговечность рабочей фурнитуры мельниц.

В качестве мельниц с невысокой производительностью (0,5...5 т/ч) на рынок технических средств постепенно выходят пружинные мельницы (ПМ) в основе конструкции которых рабочие органы в виде пружин (ПРО). Новый класс аппаратов позволяет существенно снизить энергоемкость процесса, металлоемкость, габариты и повысить удельную производительность. Область применения их - тонкое и сверхтонкое измельчение минеральных материалов исходной крупностью до 5 мм с твердостью до 5...7 единиц по шкале Мооса и $R_{сж} = 250...300$ МПа. Общие энергозатраты при размоле кварцевого песка до $S_{уд} = 300$ м²/кг в циклическом режиме составляют 12...18 кВт ч/т, а в непрерывном - 8...12 кВт ч/т.

Наиболее узким местом этих аппаратов является надежность и износостойкость ПРО. Исследования выполненные авторами показывают реальные пути увеличения в будущем надежности ПРО.

В процессе эксплуатации мельниц в ПРО в основном подвергаются износу боковые поверхности витков (см. рисунок 1). Уменьшение сечения витка пружины приводит к увеличению зазора между соседними витками, значительному уменьшению жесткости пружины и как следствие снижению усилия обжатия P_x частиц обрабатываемого материала и снижению производительности.

Результаты эксперимента по определению влияния среды и условий работы пружинного рабочего органа на его общую наработку на отказ и абразивный износ отражены на гистограмме (рисунок 2).

В процессе эксперимента параллельно контролировалась температура местного разогрева как подшипниковых опор, так и рабочего органа с камерой обработки. При работе мельницы без рабочей камеры происходило значительное отклонение рабочего органа от плоскости осей вра-

щения валов в поперечном направлении с амплитудой $\lambda > 2 D_{cp}$ пружины. Чрезмерная перегрузка- первых витков рабочего органа и их разогрев приводит к образованию усталостно-температурных трещин и выходу пружины из строя.



Рисунок 1 - Вид ПРО вышедшего из строя по причине усталостного разрушения

При работе пружинного рабочего органа с камерой без материала, подлежащего обработке, в меньшей мере, но все же присутствуют поперечные колебания пружины и удары о стенку камеры, последующий разогрев ее и выход из строя.

Присутствие материала, подлежащего обработке в камере мельницы, стабилизирует процесс колебания и значительно уменьшает амплитуду как поперечных, так и продольных колебаний, повышая при этом наработку до отказа.

Однако, износ рабочих поверхностей витков Δd , уменьшение момента сопротивления изгибу и кручению приводит в последующем к снижению долговечности рабочего органа.

Для определения усилия обжатия P_k с минимальной ошибкой в данном диапазоне измерений в результате измерения необходимо ввести поправочный коэффициент по износу $k_n = 1,1...1,18$.

Из исследованных рабочих органов наиболее предпочтительным материалом для их производства может служить клапанная пружинная проволока типа 51ХФА-А-П-ХП-5,50 ГОСТ 14963-78. Более предпочтительными условиями работы при этом являются: оптимально заполненная рабо-

чая камера, рубашка охлаждения и защитная футеровка.

Материал рабочего органа работает в условиях сложного напряженного состояния при симметричном цикле нагружения, и поэтому оценка долговечности работы пружины по пределу сопротивления усталости имеет важное значение.

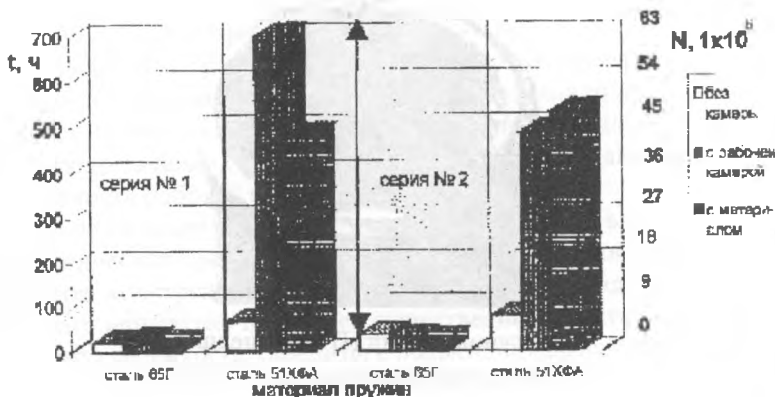


Рисунок 2.-Влияние материала ПРО и условий работы на наработку до отказа

Экспериментальные исследования отражают влияние многих факторов на износостойкость и циклическую долговечность упругих элементов машин и приборов, тем более пружинных рабочих органов.

Для оценки долговечности принимаем обобщающий коэффициент снижения степени предела выносливости рабочего органа по отношению к гладкому полированному лабораторному образцу К:

$$K = \frac{\sigma_1}{\sigma_{1d}} = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_F} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v \cdot K_A}$$

Для пружинных рабочих органов, с учетом технологии и качества материала применяемых при их изготовлении, условий проведения испытаний (температура, износ, коррозия и др.) был проведен расчет сопротивления усталости в соответствии с методикой по ГОСТ 25.504-82 «Расчеты испытания на прочность».

Для пружинной стали 65Г согласно ГОСТ 14959-79:

$$K = \left(1,06 + \frac{1}{0,9} - 1\right) \cdot \frac{1}{1,5 \cdot 0,83} = 0,94$$

Для стали 51ХФА согласно ГОСТ 14959-79:

$$K = \left(1,06 + \frac{1}{0,88} - 1\right) \cdot \frac{1}{1,3 \cdot 0,8} = 1,15$$

Коэффициент, учитывающий снижение механических свойств металла (σ_b , σ_T , σ_{-1}) с ростом размеров заготовки:

$$K_1 = 1 - 0,21 \lg \frac{d \cdot k_w}{d_0}$$

где d - диаметр проволоки из которого навита пружина, $d = (4 \dots 10)$ мм;

d_0 - диаметр гладкого лабораторного образца, $d_0 = 7,5$ мм.

В нашем случае $K_1 = 0,95 \dots 0,96$. Предел выносливости материала заготовки с учетом K_1 :

$$\sigma_{-1} = K_1 \cdot \sigma_b$$

где σ_b - временный предел сопротивления, МПа.

Для стали 65Г $\sigma_b = 980$ МПа, $\sigma_{-1} = (930 \dots 945)$ МПа.

Для стали 51 ХФА $\sigma_b = 1275$ МПа, $\sigma_{-1} = (1220 \dots 1233)$ МПа.

Таким образом средний предел выносливости детали (пружины):

$$\sigma_{-1D} = \frac{\sigma_{-1}}{K}$$

Для стали 65Г $\sigma_{-1D} = (990 \dots 1005)$ МПа.

Для стали 51 ХФА $\sigma_{-1D} = (1060 \dots 1072)$ МПа.

Используя полученные данные построим приближенную кривую усталости ПРО. По оси ординат откладываются значения σ , а по оси абсцисс $\lg N$ или $\lg T$, где N - количество циклов нагружения; T - время работы пружины до отказа, часы.

На рисунке 3 представлены приближенные кривые усталости.

Область значений σ значений заключается между кривыми усталости определяет долговечность ПРО по усталостной прочности и составляет

54...72 10^6 циклов, что соответствует 600...800 часов работы мельницы.

Необходимо отметить достаточно высокую сходимость результатов теоретического расчета предела выносливости и результатов эксперимен-

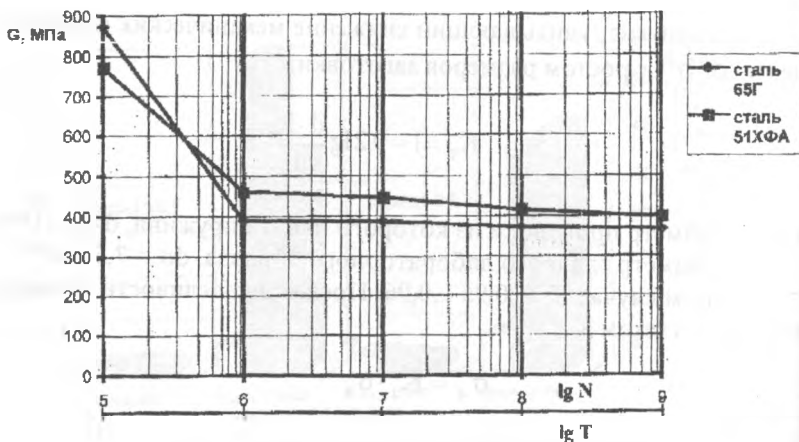


Рисунок 3 - Кривые усталости ПРО из пружинных сталей

тальных исследований в двух сериях опытов для по составу материалов пружин (рисунок 2 и рисунок 3).

Проведенные испытания ПРО показали, что они обладают высокой технологической эффективностью. Однако работоспособность ПРО ограничена не только факторами усталостной прочности и износа, но и крутильной жесткостью, поперечной устойчивостью, поперечными и продольными колебаниями, скоростью соударения витков и износом наружных поверхностей витков о стенки камеры измельчения или материал. Отказы происходили в основном из-за усталостной прочности. Износ рабочих поверхностей витков был незначительным, так для стали 60С2А с $d = 10$ мм после 420 часов работы с гранулированным шлаком износ составил 2,5...2,8 мм на диаметр витка. Для пружины из стали 51 ХФА с $d = 5$ мм после 126 часов размола кварцевого песка максимальный износ витка составил 0,5...0,6 мм на диаметр.

Пути устранения указанных недостатков определяются в каждом конкретном случае с учетом основных параметров рабочего органа, динами-

ки и условий работы.

Снизить внутренние напряжения в витке пружины и увеличить число циклов нагружения в единицу времени можно путем уменьшения центрального узла изгиба и применением устройств усиливающих жесткость пружины. Повысить надежность ПРО можно также за счет снижения частоты вращения и увеличения габаритных размеров ПРО. Применение проката проволоки с улучшенной поверхностью, использование последних разработок в металловедении по пружинным сталям и новых методов поверхностной обработки позволит повысить предел выносливости ПРО.

Снижение износа можно добиться путем применения специальных износостойких сталей, а также за счет твердости рабочих поверхностей и защиты их с помощью футеровок и поверхностной самофутеровки материалом обработки.

Износ может быть снижен с помощью организационных мероприятий проведения процесса помола, а особенно при механоактивации компонентов строительных смесей. Идея в том, что для получения прироста прочности и улучшения других свойств смесей и изделий из-них не совсем обязательно обрабатывать весь объем смеси.

Следует заметить, что в данной работе предложены лишь некоторые варианты идей по модернизации ПМ многие из которых, из-за значительного объема изложения, не нашли должного отражения.

2 ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЛОСКОЙ ЗАДАЧЕ

*Холодарь Б. Г., Найчук А. Я.
Брестский политехнический институт*

В случае, когда рассматривается задача о теле, содержащем трещины, обычно используют нелинейные конечные элементы (КЭ), включающие шесть (треугольник) или восемь (четыреугольник) и более узловых точек. Сравнительно с линейными элементами это позволяет улучшить аппроксимацию напряженно-деформированного состояния, увеличить размеры самих элементов, описать криволинейные границы тела или берегов самих трещин.

На практике наиболее широкое применение получили так называемые изопараметрические КЭ, для которых аппроксимация геометрической формы элемента (его отображение на стандартный симплекс-элемент (СЭ)) выполняется с помощью функций, которые используются и для аппроксимации физических полей в элементе. Рассматриваются также суб- и суперпараметрические элементы. Наиболее целесообразным является увеличение точности внутренней аппроксимации (например, увеличивая порядок полиномов для аппроксимации физических полей), что приводит, однако, к усложнению вычислительных процедур и с этой точки зрения требует согласования используемого метода с конкретным типом рассматриваемой задачи на основании имеющегося опыта и рекомендаций [1,2,3].

В частности, использование изопараметрических квадратических элементов является корректным и для столь сложной задачи, какой является задача о вычислении коэффициентов интенсивности напряжений для тел с трещинами. При этом, правда, размеры элементов, непосредственно прилегающих к вершине трещины, должны быть достаточно малыми по сравнению с ее длиной [2], что объясняется наличием в вершине трещины особенности для поля напряжений вида $\sqrt{1/r}$ (здесь r - расстояние

от вершины трещины). Одним из способов учета этой особенности является использование сингулярных КЭ, у которых два примыкающих к вершине трещины (сингулярной точке) промежуточных узла располагаются на расстоянии одной четверти длины ребра соответствующего СЭ.

Построение аппроксимирующих функций является неоднозначным даже при использовании полиномов одного порядка. "Гашение" соответствующих степеней свободы производится за счет наложения ограничений в выбранных некоторым образом внутренних точках области отображающего СЭ. Поэтому вдоль границ смежных КЭ сохраняется требуемая C^0 -гладкость аппроксимации. Необходимым условием выбора аппроксимирующих функций $F_i(\xi, \eta)$ является удовлетворение требованиям:

$$F_i(\xi_j, \eta_k) = 1 \quad i=j=k \quad (1a)$$

$$F_i(\xi_j, \eta_k) = 0 \quad i \neq j, i \neq k \quad (1b)$$

$$\sum F_i(\xi, \eta) = 1 \quad -1 \leq \xi, \eta \leq 1 \quad (2)$$

Здесь ξ, η - безразмерные локальные координаты отображающего СЭ, i, j, k - индексы узловых точек СЭ, расположенных на его границах.

Прием, который мы использовали для построения аппроксимирующей функции в каком-либо узле заключается в записи ее в виде константы, умноженной на произведение функций, являющихся левыми частями уравнений соответствующих прямых, проходящих через остальные узловые точки. Константа определяется из условия (1a), а условия (1b) и (2) выполняются при этом автоматически. Этот прием можно легко перенести на отображающие СЭ любой формы и порядка.

Построенные таким образом функции имеют вид (3a)-(3г). Обозначения узловых точек показаны на рис. 1.

Четырехугольный несингулярный: :

$$\begin{aligned}
 F_1(\xi, \eta) &= -1/4(1-\xi)(1-\eta)(1+\xi+\eta) \\
 F_3(\xi, \eta) &= 1/4(1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1) \\
 F_5(\xi, \eta) &= 1/4(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1) \\
 F_7(\xi, \eta) &= -1/4(1-\xi)(1+\eta)(\xi-\eta+1) \\
 F_2(\xi, \eta) &= 1/2(1-\eta)(1-\xi) \\
 F_4(\xi, \eta) &= 1/2(1+\xi)(1-\eta^2) \\
 F_6(\xi, \eta) &= 1/2(1+\eta)(1-\xi^2) \\
 F_8(\xi, \eta) &= 1/2(1-\xi)(1-\eta^2)
 \end{aligned} \tag{3a}$$

Четырехугольный сингулярный

$$\begin{aligned}
 F_1(\xi, \eta) &= -1/2(1-\xi)(1-\eta)(3/2+\xi+\eta) \\
 F_3(\xi, \eta) &= -1/6(1+\xi)(1-\eta)(1-\xi+3/2\eta) \\
 F_5(\xi, \eta) &= 1/4(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1) \\
 F_7(\xi, \eta) &= -1/6(1-\xi)(1+\eta)(1-\eta+3/2\xi) \\
 F_2(\xi, \eta) &= 2/3(1-\eta)(1-\xi^2) \\
 F_4(\xi, \eta) &= 1/2(1+\xi)(1-\eta^2) \\
 F_6(\xi, \eta) &= 1/2(1+\eta)(1-\xi^2) \\
 F_8(\xi, \eta) &= 2/3(1-\xi)(1-\eta^2)
 \end{aligned} \tag{3b}$$

Треугольный несингулярный:

$$\begin{aligned}
 F_1(\xi, \eta) &= -1/8(1 - 2\xi - \eta)(1 + 2\xi + \eta) \\
 F_3(\xi, \eta) &= -1/8(1 + 2\xi - \eta)(1 - 2\xi + \eta) \\
 F_5(\xi, \eta) &= 1/2\eta(1 + \eta) \\
 F_2(\xi, \eta) &= 1/4(1 - 2\xi - \eta)(1 + 2\xi - \eta) \\
 F_4(\xi, \eta) &= 1/2(1 + \eta)(1 + 2\xi - \eta) \\
 F_6(\xi, \eta) &= 1/2(1 + \eta)(1 - 2\xi - \eta)
 \end{aligned}
 \tag{3в}$$

Треугольный сингулярный:

$$\begin{aligned}
 F_7(\xi, \eta) &= -1/6(1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \eta + 3/2\xi) \\
 F_3(\xi, \eta) &= -1/12(1 + 2\xi - \eta)(1 - 2\xi + 2\eta) \\
 F_5(\xi, \eta) &= 1/12(1 + \eta)(1 - 2\xi + 5\eta) \\
 F_2(\xi, \eta) &= 1/3(1 - 2\xi - \eta)(1 + 2\xi - \eta) \\
 F_4(\xi, \eta) &= 1/2(1 + \eta)(1 + 2\xi - \eta) \\
 F_6(\xi, \eta) &= 2/3(1 + \eta)(1 - 2\xi - \eta)
 \end{aligned}
 \tag{3г}$$

В качестве примера на рис. 1а приведены также линии, использованные для определения функций F_1 и F_4 , на рис. 1б - функции F_3 , на рис. 1в - функций F_2 и F_5 .

Понятно, что использование квадрата или равнобедренного треуголь-

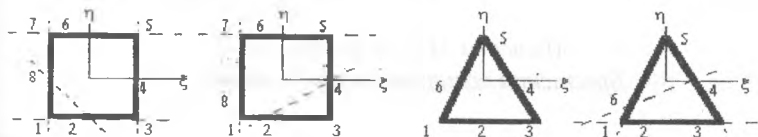


Рис. 1

ника в качестве отображающих СЭ не требует прямолинейности сторон исходных КЭ, поэтому функции (3а)-(3г) могут быть применены и для криволинейных областей.

Нетрудно видеть, что выписанные выше функции обладают полно-

той (3а и 3б - серендиповского типа, 3в и 3г - паскалевского типа). Применение указанных функций к ряду модельных задач для тел с трещинами показывает достоверность получаемых результатов.

Представляется, что следующим шагом для сингулярных элементов является введение для функции $F_1(\xi, \eta)$ выражений:

$$\text{для четырехугольника } F_1(\xi, \eta) = -(1-\xi)(1-\eta)((1+\xi)^2 + (1+\eta)^2 - 1/4) \quad (4)$$

$$\text{для треугольника } F_1(\xi, \eta) = (1-2\xi-\eta)((1+\xi)^2 + (1-\eta)^2 - 1/4) \quad (5)$$

которые обеспечат для напряжений выполнение особенности $\sqrt{1/r}$ на любом из радиальных направлений от вершины трещины. Геометрически последние сомножители в (4)-(5) соответствуют окружности радиуса $R=1/2$, построенной вокруг сингулярной точки. При этом КЭ превращаются в кубические, а тип полноты аппроксимации остается прежним.

Литература

1. О. Зенкевич, К. Морган. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986,-318с.
2. Е.М. Морозов, Г.П. Никишков. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Наука, 1990, -256с.
3. В.Н. Апанович. Метод внешних конечно-элементных аппроксимаций. Мн.: Выш. шк.,1991,-171с.

РАСЧЁТ БРУСЬЕВ НА СЖАТИЕ И ВАЛОВ НА КРУЧЕНИЕ МЕТОДОМ ПРОДОЛЖЕНИЯ

Мазырка М.В., Савченко В.А.
Брестский политехнический институт

В инженерной практике часто приходится осуществлять прочностной анализ элементов конструкций, расчетная схема которых может быть сведена к схеме бруса или вала переменной жесткости при различных условиях его опирания и нагружения. Получение аналитического решения для этих задач связано с определенными трудностями и является весьма проблематичным. Поэтому приходится прибегать к численным методам ре-

шения подобного класса задач. Одним из таких методов является метод продолжения.

В основу метода продолжения, как известно, положено дифференциальное уравнение задачи и его последующие производные. Применение матричной формулировки и в особенности получение на этой основе матрицы участков и переходов в сочетании с использованием матричной формулы продолжения (см. ниже) образуют алгоритм решения граничных задач методом продолжения [1], основывающийся на матричной зависимости

$$\bar{Y}_k = P \bar{Y}_0, \quad (1)$$

где \bar{Y}_0 - начальное напряженно-деформированное состояние;

\bar{Y}_k - напряженно-деформированное состояние в k -ом сечении системы;

P - матрица воздействия, представляющая собой получаемое по формуле продолжения произведение соответствующих матриц пролетов и переходов

$$P = \prod_{i=k}^1 A_i(l_i) F_{i-1}. \quad (2)$$

Входящие в формулу (2) матрицы участков, как уже было сказано выше, определяются из дифференциального уравнения

$$L_n[\bar{Y}] = \bar{R}(x), \quad (3)$$

где $L_n[\bar{Y}]$ - линейный дифференциальный оператор;

$\bar{R}(x)$ - произвольная вектор-функция действительного аргумента,

записанного для каждого конкретного i -го участка.

Матрицы участков при растяжении и сжатии, таким образом, запишутся в следующем виде:

а) при сжатии

б) при кручении

$$A_i(l_i) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{l_i}{E_i F_i} & \frac{q_i l_i^2}{2 E_i F_i} \\ 0 & 1 & q_i l_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_i(l_i) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{l_i}{G_i J_{pi}} & \frac{m_i l_i^2}{2! G_i J_{pi}} \\ 0 & 1 & m_i l_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Матрицы скачков F_i определяются из рассмотрения условий сопряжения граничных точек смежных интервалов. Поскольку разбиение брусков и валов на участки осуществляется таким образом, что все внешние сосредоточенные силы и моменты сил попадают в узловые j -е точки (граничные точки участков), то при переходе через эти точки статические компоненты векторов претерпевают разрывы, при этом

$$\bar{Y}_j^{прав} = F_j \bar{Y}_j^{лев} \quad (5)$$

Здесь F_i - матрица перехода (скачка) которая имеет следующий вид

а) при сжатии

б) при кручении

$$F_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & P_j \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad F_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & M_j \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

где P_j, M_j - внешние сосредоточенные силы и моменты сил.

Вектор напряженно-деформированного состояния в произвольной точке имеет вид:

а) при сжатии

б) при кручении

$$\bar{Y}_j = [\lambda \quad N \quad 1]^{-1} \quad \bar{Y}_j = [\varphi \quad N \quad 1]^{-1} \quad (7)$$

где λ - перемещение в точке j ;

φ - угол поворота в точке j ;

N , M - продольная сила и крутящий момент в точке j соответственно.

При решении граничных задач для рассматриваемых систем одна из компонент вектора $\bar{Y}_0^{лев}$ неизвестна. В качестве неизвестной полагаем:

а) $N = X \quad M = X$ (жесткое защемление);

б) $\lambda = X \quad \varphi = X$ (свободный конец).

Представим одну из неизвестных в виде линейной зависимости (11)

Тогда любой вектор-столбец начального состояния можно представить в виде (для случая, когда левая опора жесткая заделка)

$$\bar{Y}_0^{лев} = \begin{bmatrix} 0 \\ X \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

или в сокращенном виде для любого случая

$$\bar{Y}_0^{лев} = \bar{B}_1^0 X + \bar{B}_2^0 \quad (9)$$

Векторы \bar{B}_1^0 , и \bar{B}_2^0 являются столбцами матрицы начального состояния \bar{B}_0 имеющей размерность (3×2) .

Подставляя (9) и (2) в (1), получим для правого конца бруса (вала)

$$\bar{Y}_n^{прав} = P \left[\bar{B}_1^0 X + \bar{B}_2^0 \right] \quad (10)$$

Неизвестный параметр X определяется из граничного условия на правом конце бруса (вала). Так в случае жесткой заделки на правом кон-

це этим условием является условие равенства нулю перемещения (угла поворота).

$$\lambda_n^{прав}(\varphi_n^{прав}) = Pb_{11}^0 X + Pb_{12}^0 = 0, \quad (11)$$

откуда

$$X = -\frac{Pb_{12}^0}{Pb_{11}^0}. \quad (12)$$

Зная параметр X , мы полностью определяем вектор-столбец начального состояния. Дальнейший расчет бруса или вала осуществляется по формуле продолжения (1). По формулам аналогичным (8), (9), (11), (12) производится расчёт при других видах граничных условий.

На основании рассмотренного метода разработан алгоритм и составлены программы расчёта брусьев и валов с произвольным количеством участков при различных условиях опирания (свободный конец, жёсткая заделка, опора с зазором, упругая опора) на обоих концах. В программе так же учитывается и промежуточные упругие опоры, а при расчёте брусьев учитываются и температурная нагрузка. Результаты расчётов представляются в виде таблицы и графиков.

Данные программы могут использоваться студентами при выполнении расчётно графических работ по сопротивлению материалов, а так же при проведении конструкторских расчётов в интерактивном режиме.

Литература

1. Пономарев К.К. Расчёт элементов конструкций с применением ЭЦВМ, М., Машиностроение, 1972.

К РЕШЕНИЮ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Хвисевич В.М.

Брестский политехнический институт

Рассмотрим тело вращения, ограниченное поверхностью S . На S задана осесимметричная функция температуры

где z, r — координаты цилиндрической системы отсчета,
 t — время.

В такой постановке будем иметь задачу типа Дирихле. В зависимости от того, следует ли искать решение внутри области D , ограниченной поверхностью S , или вне области говорят соответственно о внутренней или внешней краевой задаче Дирихле.

Ввиду осевой симметрии области D и функции T достаточно рассмотреть меридиональное сечение области. Решение внутренней задачи разыскиваем в виде теплового потенциала:

$$W(x, t) = W(\rho_x, z_x, t) = \int_L \mu(y, \tau) \cdot K(y, x, t - \tau) dl, \quad (1)$$

где

$$K(y, x, t - \tau) = \exp\left(-\frac{z_y^2 + \rho_x^2 + \rho_y^2}{4a(t - \tau)}\right) [cI_1(B) - BI_0(B)],$$

x, y — фиксированная и текущая точки интегрирования,
 m — плотность потенциала W , a — коэффициент теплопроводности, L — контур, ограничивающий область D ,

$$B = \frac{2\rho_y\rho_x}{4a(t - \tau)}, \quad I_1, I_0 — \text{сомножители функции Бесселя.}$$

При этом учтем, что фундаментальное решение уравнения теплопроводности представляется согласно [1] функцией:

$$T^*(x, t, y, \tau) = \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi a(t - \tau)}}\right)^3 \exp\left(-\frac{r^2(x, y)}{4a(t - \tau)}\right), \quad (2)$$

где $r(x, y)$ — расстояние между точками $x(x_1, y_1, z_1)$, $y(x_2, y_2, z_2)$.

В цилиндрической системе координат $r = \sqrt{Z^2 + \rho_x^2 + \rho_y^2 - 2\rho_x\rho_y \cos\theta}$;

$Z = z_y - z_x$, $\theta = \vartheta_y - \vartheta_x$, τ — текущее время на интервал интегрирования.

Предположим, что на контуре L распределены двойные тепловые источники (1) с плотностью $m = m(y, t)$. При этом от совокупности воздействия источников внутри области D^+ получилось распределение температуры, переходящее на границе области непрерывно в

$$f(y, t) = F_T.$$

Таким образом, с учетом формул разрыва для теплового потенциа-

ла двойного слоя [2] получаем:

$$\frac{1}{2}\mu(x,t) + \frac{4a^t}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{d\tau}{[2\sqrt{a(t-\tau)}]^5} \int_L \mu(y,\tau) K(y,x,t-\tau) \rho_y dy = F_T. \quad (3)$$

Уравнение (3) является линейным интегральным уравнением второго рода в двумерном измерении L, t . Оно носит Фредгольмов характер по переменной L и имеет признак уравнения Вольтера по переменной t . Ядро этого уравнения имеет сингулярную особенность в точке $x=y$.

Решением уравнения будет плотность $m(y,t)$, с помощью которой можно найти температуру в любой точке области D , в любое время t .

Подобным образом можно поставить и решить краевую задачу во внешней области D . На основании проведенных выкладок было получено интегральное уравнение:

$$\frac{1}{2}\mu(x,t) + \frac{4a^t}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{d\tau}{[2\sqrt{a(t-\tau)}]^5} \int_L \mu(y,\tau) K(y,x,t-\tau) \rho_y dy = F_T. \quad (4)$$

Реализация этого уравнения позволяет найти значение температуры в любой точке внешней области D .

В инженерной практике часто приходится иметь дело с заданными тепловыми потоками (производными от температур в определенных направлениях), то есть речь идет о задаче типа Неймана [3]. Для решения таких задач используем тепловой потенциал простого слоя:

$$V(x,t) = \frac{2a^t}{\pi} \int_0^t \frac{d\tau}{[2\sqrt{a(t-\tau)}]^3} \int_L V(y,\tau) P(y,x,t-\tau) \rho_y dy, \quad (5)$$

$$\text{где } P(y,x,t-\tau) = \exp\left(-\frac{z^2 + \rho_y^2 + \rho_x^2}{4a(t-\tau)}\right) I_0(B),$$

$n(y,t)$ — плотность потенциала простого слоя.

Потенциал (5) зависит только от положения параметрической точки x и это обстоятельство учитываем при определении производной теплового потенциала по нормали n_x , опущенной из точки x к поверхности S . Выполняя дифференцирование получим:

$$\frac{dV(x,t)}{dn_x} = \frac{4a}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{d\tau}{[2\sqrt{a(t-\tau)}]^5} \int_L v(y,\tau) P^*(y,x,t-\tau) \rho_y dl_y, \quad (6)$$

где $P^*(y,x,t-\tau) = \exp\left(-\frac{z^2 + \rho_y^2 + \rho_x^2}{4a(t-\tau)}\right) [cI_0(B) + dI_1(B)]$,

$c = \alpha_{zx} z_1 - \alpha_{\rho_x} \rho_x$; $d = \alpha_{\rho_y} \rho_y$, $\alpha_{zx}, \alpha_{\rho_x}$ — направляющие косинусы.

Считаем, что температурный режим приведен к однородному. Тогда тепловой процесс представляем происходящим от некоторого теплового слоя с плотностью $n(y,t)$, распределенного по контуру L с учетом заданных краевых условий.

Используя формулы скачка [2] получим:

— для внутренней задачи

$$\frac{1}{2} v(x,t) + \frac{4a}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{d\tau}{[2\sqrt{a(t-\tau)}]^5} \int_L v(y,\tau) P^*(y,x,t-\tau) \rho_y dl_y = F_p, \quad (7)$$

где $F_p = f_1(y,t)$ — тепловой поток;

— для внешней задачи

$$-\frac{1}{2} v(x,t) + \frac{4a}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{d\tau}{[2\sqrt{a(t-\tau)}]^5} \int_L v(y,\tau) P^*(y,x,t-\tau) \rho_y dl_y = F_p \quad (8)$$

Кроме рассмотренных выше случаев немаловажное значение в практике имеет конвективный теплообмен между поверхностью тела и окружающей средой.

Здесь имеют место следующие граничные условия:

$$\lambda_T \frac{\partial T(y,t)}{\partial n} = h [T_0 - T(y,t)], \quad (9)$$

где λ_T — коэффициент теплопроводности, h — коэффициент теплопередачи, n — нормаль к поверхности S .

Исследуя величины условия (9) очевидно, что решения данной задачи можно получить с помощью теплового потенциала (5).

Таким образом, с учетом формул скачка [2] получаем интегральные уравнения для неизвестной плотности $n(y,t)$.

$$\begin{aligned} & \pm \frac{1}{2} v(x, t) + \frac{4a}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{d\tau}{[2\sqrt{a(t-\tau)}]^5} \int_L v(y, \tau) P^*(y, x, t-\tau) \rho_y dy + \\ & + \frac{ab_0}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{d\tau}{[2\sqrt{a(t-\tau)}]^5} \int_L v(y, \tau) P(y, x, t-\tau) \rho_y dy = b_0 T_0, \end{aligned} \quad (10)$$

где $b_0 = \frac{2h}{\lambda_T}$, знак “+” имеет место для внутренней задачи, “-” — для внешней.

Ядра полученных интегральных уравнений имеют сложный характер. В них имеется произведение показательной функции на модифицированную функцию Бесселя первого рода нулевого или первого порядка. Наличие двойных интегралов усложняет численную реализацию соответствующей краевой задачи на ПЭВМ.

Для преодоления указанных трудностей были выведены соответствующие разрешающие уравнения.

Таким образом, решение краевых осесимметричных задач теплопроводности сводится к решению соответствующих интегральных уравнений (2), (3), (6), (7), (9).

При этом, по сути пространственная задача теплопроводности сводится к интегрированию по контуру меридионального сечения области D , что существенно облегчает численную реализацию задачи с высокой степенью точности на ПЭВМ. Для достижения этой цели разработан соответствующий алгоритм решения.

Литература

1. Тихонов А.Н., Самарский Л.А. Уравнения математической физики.— М. Наука, 1974.
2. Хижняков А.В. К расчету температурных полей для тел вращения. В ст. “Проектирование металлических конструкций”. ЦИНИС Госстроя СССР, 1973, вып. 3, с 47.
3. Гюнтер Н.М. Теория потенциала и ее приложение к задачам математической физики. М.-Л., ГТТИ, 1953.

**ПРЕДПОСЫЛКИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ТОНКИХ
ОБОЛОЧЕК НА ПРОИЗВОЛЬНОМ КОНТУРЕ**

Брикса В. П.

Брестский политехнический институт

В [1] изложена методика и алгоритм расчета собственных колебаний тонких оболочек на прямоугольном контуре. В основу расчета положен метод Бубнова-Галеркина с выбором системы координатных функций, аппроксимирующих контактное давление, в виде произведения тригонометрических функций

$$f_{ij}(x, y) = \sin \frac{i\pi x}{a} \sin \frac{j\pi y}{b} \quad (1)$$

где x, y - координаты; a, b - размеры контура оболочки.

Для оболочек на произвольном контуре основные трудности реализации вариационных принципов связаны именно с выбором системы координатных функций, отвечающих условиям полноты и ортогональности. Ниже предлагается один из возможных способов построения ортогональной системы функций для реализации вариационных принципов при расчете тонких оболочек на произвольном контуре.

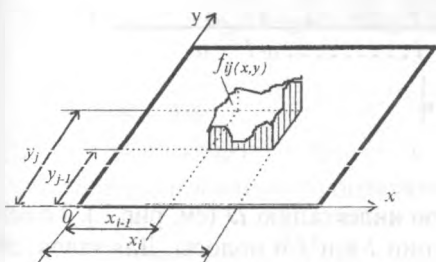


Рис. 1.

Предлагается в качестве функций, аппроксимирующих перемещения оболочки, принимать фи-

нитные функции $f_{ij}(x, y)$, подчиняющиеся условиям

$$f_{ij}(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_{i-1} > x > x_i, \quad y_{j-1} > y > y_j; \\ f_{ij}(x, y), & \text{при } x_{i-1} \leq x \leq x_i, \quad y_{j-1} \leq y \leq y_j. \end{cases} \quad (2)$$

Схематический вид функции $f_{ij}(x, y)$ для двумерных задач представлен на рис. 1.

Рассмотрим плоскость xoy (рис.2). При этом сделаем некоторые

уточнения, касающиеся нумерации координатных финитных функций.

Разобьем плоскость прямоугольной сеткой на n частей вдоль x и m частей вдоль y . Узлы сетки, попадающие на оси пронумеруем $0, 1, 2, \dots$; отрезки, отсекаемые сеткой на осях также пронумеруем I, II, \dots . Таким образом, прямоугольная область разбита на прямоугольные элементы.

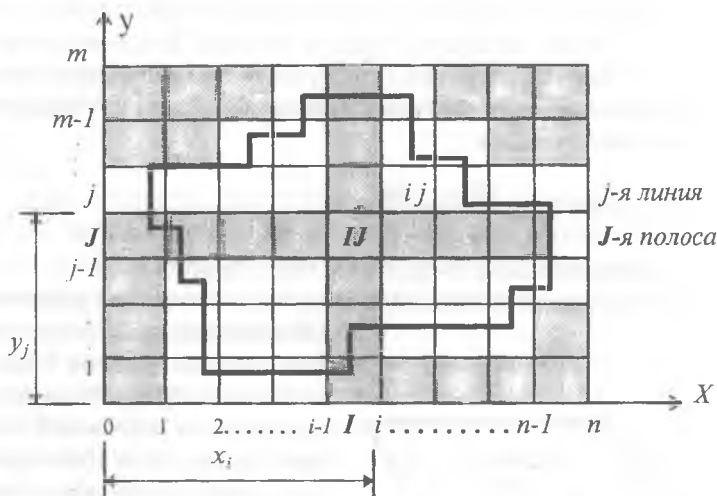


Рис. 2.

Для этих элементов примем двойную индексацию IJ (см. рис.2.). То есть IJ -й элемент находится на пересечении I -й и J -й полосы. Для узлов, образованных сеткой, также примем двойную индексацию ij (рис.2). То есть i -й узел находится на пересечении i -й и j -й линий.

На каждом элементе IJ задаем финитную функцию вида

$$f_{ij}(x, y) = (a_{1ij}x^2 + b_{1ij}x + c_{1ij})y^2 + (a_{2ij}x^2 + b_{2ij}x + c_{2ij})y + (a_{3ij}x^2 + b_{3ij}x + c_{3ij}). \quad (3)$$

Для функций $f_{ij}(x, y)$ потребуем выполнения условий:

$$f_{ij}(x_i, y) = f_{(i+1)j}(x_i, y); \quad \frac{\partial}{\partial x} f_{ij}(x_i, y) = \frac{\partial}{\partial x} f_{(i+1)j}(x_i, y); \quad (4)$$

$$f_{ij}(x, y_j) = f_{i(j+1)}(x, y_j); \quad \frac{\partial}{\partial y} f_{ij}(x, y_j) = \frac{\partial}{\partial y} f_{i(j+1)}(x, y_j). \quad (5)$$

То есть при переходе через границы элементов должны совпадать зна-

чения и первые производные функций $f_{ij}(x, y)$, $f_{(i+1)j}(x, y)$ и $f_{i(j+1)}(x, y)$.

Покажем, что в случае задания $f_{ij}(x, y)$ в форме (3), условия (4) и (5) позволяют получить для каждой области IJ 8 соотношений между коэффициентами a_{1ij} , b_{1ij} , ..., c_{3ij} ($i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$), т.е. все b_{1ij} , c_{1ij} , ..., c_{3ij} выразить через a_{1ij} .

Действительно, используя (4), получаем соотношения

$$c_{lij} = c_{l1j} - \sum_{k=1}^{i-1} x_k^2 (a_{lkj} - a_{l(k+1)j}); \quad b_{lij} = b_{l1j} + 2 \sum_{k=1}^{i-1} x_k (a_{lkj} - a_{l(k+1)j}); \quad (6)$$

$$l = 1, 2, 3; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Используя граничные условия $f_{1j}(x_0, y) = 0$; $f_{nj}(x_n, y) = 0$ (7)

и соотношения (6), b_{lij} и c_{lij} можно выразить через a_{ij} ($l=1, 2, 3$; $i=1, 2, \dots, n$).

Таким образом, все b_{lij} , c_{lij} ($l=1, 2, 3$; $i=1, 2, \dots, n$) выражаются через a_{ij} ($l=1, 2, 3$; $i=1, 2, \dots, n$).

Перепишем (3) в виде

$$f_{ij}(x, y) = (a_{1ij}y^2 + a_{2ij}y + a_{3ij})x^2 + (b_{1ij}y^2 + b_{2ij}y + b_{3ij})x + (c_{1ij}y^2 + c_{2ij}y + c_{3ij}). \quad (8)$$

Учитывая, что

$$b_{lij} = b_{lij}(a_{i1j}, a_{i2j}, \dots, a_{inj}), \quad c_{lij} = c_{lij}(a_{i1j}, a_{i2j}, \dots, a_{inj}),$$

после использования (5) получаем соотношения

$$a_{3ij} = a_{3i1} - \sum_{k=1}^{j-1} y_k^2 (a_{ik} - a_{i(k+1)});$$

$$a_{2ij} = a_{2i1} + 2 \sum_{k=1}^{j-1} y_k (a_{ik} - a_{i(k+1)}) \quad (9)$$

$$j = 1, 2, \dots, m.$$

Условия на границах $f_{ij}(x, y_0) = 0$; $f_{ij}(x, y_m) = 0$, (10)

а также (9) при $j=m$ позволяют выразить a_{2i1} и a_{3i1} через a_{ij} ($j=1, 2, \dots, m$).

Таким образом, после использования соотношений (4), (5), граничных условий (7) и (10) в разложениях (3) или (8) независимыми коэффици-

ентами будут только a_{ij} ($i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$), то есть количество неизвестных равно количеству задаваемых финитных функций $f_{ij}(x,y)$.

Дифференциальные уравнения свободных колебаний гибких оболочек

$$L_{yn}[w(x,y,t)] + L_{ин}[w(x,y,t)] = 0 \quad (11)$$

решается одним из вариационных методов. В частности, используя метод Бубнова-Галеркина имеем

$$w(x,y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij}(x,y), \quad \text{и}$$

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_{y_{j-1}}^{y_j} [L_{yn}\{f_{ij}(x,y,t)\} + L_{ин}\{f_{ij}(x,y,t)\}] dx dy = 0 \quad (12)$$

$i=1,2,\dots,n; \quad j=1,2,\dots,m.$

В (11) обозначено: L_{yn} - дифференциальный оператор 2-го порядка, описывающий упругие силы; $L_{ин}$ - дифференциальный оператор инерционных сил; $w(x,y,t)$ - функция перемещений.

Уравнения (12) представляют собой систему однородных линейных алгебраических уравнений относительно a_{ij} ($i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,m$). Таким образом, задача о свободных колебаниях тонких безмоментных оболочек в принципе решена.

Сделаем замечание о преимуществах аппроксимации перемещений финитными функциями перед аппроксимацией (1). Выше (рис.2) показана прямоугольная область, на которой задаются финитные аппроксимирующие функции, но область, занятая конструкцией, может быть любой. Главное, чтобы проекция контура конструкции попадала в указанную прямоугольную область (см.рис.3).

При этом все рассуждения, сделанные выше, остаются в силе, но при записи соотношений вида (6), (9) необходимо положить a_{ij} , b_{ij} и c_{ij} на заштрихованных на рис.2 областях, не попадающих внутрь контура конструкции, равными нулю, тогда

$$c_{lij} = c_{li} \sigma_j - \sum_{k=i_0}^{i-1} x_k^2 (a_{lkj} - a_{l(k+1)j}); \quad b_{lij} = b_{li} \sigma_j + 2 \sum_{k=i_0}^{i-1} x_k (a_{lkj} - a_{l(k+1)j}); \quad (13)$$

$l=1,2,3; \quad i_0 = i_0, i_0 + 1, \dots, i_n$

$$a_{3ij} = a_{3ij_0} - \sum_{k=j_0}^{j-1} y_k^2 (a_{ik} - a_{i(k+1)}); \quad (14)$$

$$a_{2ij} = a_{2ij_0} + 2 \sum_{k=j_0}^{j-1} y_k (a_{ik} - a_{i(k+1)}),$$

$$j = j_0, j_0 + 1, \dots, j_m.$$

$z \{ i, i_r, j, j_m \}$ индексы элементов, через которые проходит проекция контура конструкции.

Граничные условия типа (7), (10) записываются соответственно для элементов, через которые проходит проекция контура конструкции.

Таким образом, предложенный выше подход позволит производить расчет тонких безмоментных оболочек с произвольным контуром.

Литература

1. Попов Н.А., Брикса В.П. Численное определение динамических характеристик мембранных конструкций. - Динамика сооружений: Сб. научных трудов. - М.: ЦНИИСК, 1990.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ И ТЕЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНО-ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ НЕЕ

В.П. Ставров^а, О.А. Кравченко^б, В.М. Ткачев^б, А.И. Столяров^б

^аБелорусский государственный технологический университет

^бГомельский политехнический институт им. П.О. Сухого

В последние годы значительно возрос интерес к исследованию прочности волокнистых систем для высоковязких неньютоновских жидкостей в связи развитием одного из видов т.н. «высоких» технологий - процессов получения высокопрочных композитных материалов и изделий из них. Наиболее перспективные матричные материалы - термопластичные полимеры имеют в состоянии расплава очень высокую вязкость (на 2-4 порядка превышающую вязкость традиционных связующих на основе растворов терморезактивных полимеров), существенно зависящую от скоростей сдвига. Многие известные результаты [1,2], полученные в

линейном приближении (для ньютоновской жидкости), оказались не вполне пригодными для описания процессов производства и формообразования волокнистых композитов с термопластичной матрицей, связанных с проникновением полимерной матрицы в волокнистую систему.

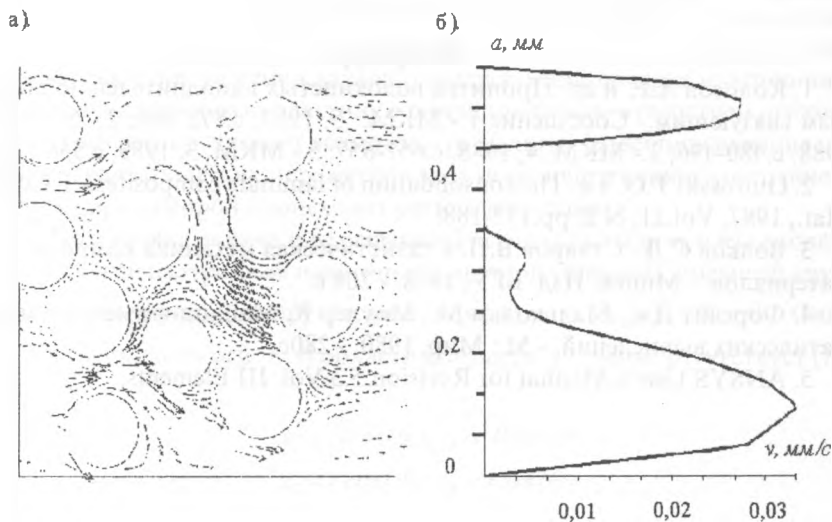
К наиболее существенным факторам, обуславливающим механизм и параметры процесса течения высоковязких жидкостей через волокнистые среды, относятся анизотропия и стохастический характер структуры таких сред, особенности геометрии промежутков между волокнами, по которым протекает жидкость, возможность перемещения волокон в процессе течения жидкости, нелинейность вязких свойств таких жидкостей. С целью учета реальной формы капилляров в волокнистой среде авторами рассматривалась уточненная модель проницаемости однонаправленной волокнистой системы для неньютоновской жидкости: . Здесь m - коэффициент вязкости, n - параметр жидкости.

Задача исследований состояла в применении статистических методов описания геометрии и структуры порового пространства волокнистых сред в процессе протекания через них высоковязких жидкостей. Исследования включали разработку алгоритмов и программ имитационного моделирования на ПЭВМ волокнистой системы и процесса перколяции нелинейно-вязкой жидкости в волокнистой среде.

Моделирование однонаправленной стохастической волокнистой системы сводится к случайному расположению на плоскости непересекающихся кругов со случайными радиусами [3], для которых принят нормальный закон распределения. Нормально распределенные величины генерируются на ПЭВМ по одному из алгоритмов, предложенных Дж. фон Нейманом [4]. Круги, радиусы которых представляют собой выборку из нормально распределенной совокупности, размещаются на квадратном поле со стороной квадрата a . Задается доля P площади квадрата, занятой кругами. В основе нескольких алгоритмов моделирования лежит схема: генерирование такого количества n радиусов кругов, при котором достигается значение P с заданной точностью; сортировка кругов в порядке невозрастания радиусов; расположение кругов на плоскости, т.е. вычисление координат центров кругов с условием их непересечения и достижения равномерного расположения; расчет статистических характеристик радиусов кругов. Разработан также алгоритм, позволяющий достигать максимально возможное значение P . С целью последующего моделирования процессов перколяции высоковязкой жидкости через подвижную волокнистую систему разработаны алгоритмы, позволяющие получить модель

системы, уплотненной в результате воздействия фронта жидкости на одну из границ модельной структуры.

Полученный результат использовали при моделировании процесса течения высоковязкой жидкости через микроячейку однонаправленной волокнистой среды. Указанную микроячейку получали как фрагмент стохастической модели волокнистой системы, построенной по одному из разработанных алгоритмов. Размеры микроячейки в сечении, перпендикулярном волокнам, задавали равными $0,5 \times 0,5$ мм, а средний диаметр кругов, моделирующих сечения волокон - $0,1$ мм. Число кругов, размещаемых в микроячейке, определяется объемной долей заполнения (для рассматриваемого случая $P=0,3$). Расчеты процесса течения жидкости через микроячейку проводили по методу конечных элементов, реализованному в программном комплексе ANSYS 5.3. При этом использовали тип конечного элемента Fluid141 [5], позволяющий рассчитывать параметры течения неньютоновской жидкости. Исходными данными для расчета служат: геометрическая модель микроячейки и свойства жидкости. Внешними условиями могут быть давление на входе и выходе, источник тепла.



Течение нелинейно вязкой жидкости через фрагмент модели волокнистой структуры: а - распределение вектора скорости по току жидкости; б - профиль скорости в а в выводе.

Давление на входе задавали равным 250 кПа . Коэффициент вязкости - $5 \text{ кПа}\cdot\text{с}^n$, параметр жидкости (показатель степени в законе течения) $n=0,56$.

Результатом решения являются компоненты вектора скоростей и давления в узлах конечно-элементной модели. В результате расчета получены распределения векторов скоростей потока жидкости внутри микрочайки (рис.а). На рис.б показаны профили скоростей в выходном сечении. Они типичны для течения жидкости через щелевой канал. При наличии волокон вблизи выходного сечения наблюдается снижение местной скорости истечения. Применяемая здесь имитационная модель дает не только качественную картину течения жидкости через микрочайку волокнистой системы, но и позволяет на основании закона Дарси рассчитать коэффициенты проницаемости.

Для определения расхода через входное и выходное сечения микрочайки достаточно проинтегрировать поля скоростей потока.

Таким образом предлагаемый метод позволяет промоделировать процесс пропитки волокнистой структуры полимерным связующим и оптимизировать режимы таких технологических процессов как, например, пултрузия.

Литература

1. Колосов А.Е. и др. Пропитка волокнистых наполнителей полимерным связующим.- Сообщение 1.- МКМ, 5, 1987, с.878-886; 2.- МКМ, 3, 1988, с.480-496; 3.- МКМ, 4, 1988, с.651-657; 5.- МКМ, 3, 1989, с.536-544.
2. Gutowski T.G. a.a. The consolidation of laminate composites.- J. Comp. Mat., 1987, Vol.21, N 2, pp.172-188.
3. Волков С.Д., Ставров В.П. Статистическая механика композитных материалов. - Минск: Изд. БГУ, 1978. - 208 с.
4. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. - М.: Мир, 1980. - 280с.
5. ANSYS User's Manual for Revision 5.3 Vol. III Elements.

О НАПРЯЖЕННОЙ ПОСАДКЕ ДЕТАЛЕЙ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

А. С. Кравчук

Белорусская государственная политехническая академия

Введение. Оценка прочности различных соприкасающихся деталей даже в простейших механизмах и устройствах возможна лишь при достаточно полной информации о распределении напряжений в местах касания деталей. Решение этих задач методами сопротивления материалов приводит к приблизительным результатам, что стимулировало широкое использование в отечественной и зарубежной практике проектных расчетов данных экспериментальных исследований [1-5]. Поэтому одним из основных направлений развития механики является теоретическое решение соответствующих практических задач в сочетании с экспериментальным обоснованием получаемых результатов [1, 3].

Одним из наиболее распространенных видов соединений, применяющихся в технике являются напряженные посадки деталей [1, 4]. Следует отметить, что многие задачи теории упругости для сопряжений подобного рода приводятся к задачам для односвязных областей [6]. Однако остались нерешенными некоторые вопросы методического характера. Так, используемые при решении задачи о напряженной посадке изотропного цилиндра в изотропную пластину с цилиндрическим отверстием ограничения существенно снижает возможность оценить тенденцию влияния основных геометрических параметров задачи на напряженное состояние и нагрузку при которой происходит раскрытие стыка.

Постановка задачи и ее решение. Рассмотрим задачу о взаимодействии упругой изотропной пластины единичной толщины, имеющей круглый вырез радиуса R с упругим диском радиуса r ($\varepsilon = R - r < 0$). Сила P действует вдоль оси Y . В области контакта L трение отсутствует [1]. Пусть

$$\begin{aligned}x_1 &= R \cos(\theta), \quad y_1 = R \sin(\theta), \\x_2 &= r \cos(\theta), \quad y_2 = r \sin(\theta)\end{aligned}$$

Тогда

$$(x_1 + u_1)^2 + (y_1 + v_1)^2 = (x_2 + u_2)^2 + (y_2 + v_2 - \delta)^2,$$

$u_m, v_m (m = \overline{1,2})$ – компоненты перемещений для плоскости с цилиндрическим отверстием (при $m = 1$) и для диска (при $m = 2$), δ – осадка центра диска. Пренебрегая малыми более высокого порядка, получаем:

$$\frac{R^2 - r^2}{2} + R(u_1 \cos(\theta) + v_1 \sin(\theta)) = r(u_2 \cos(\theta) + (v_2 - \delta) \sin(\theta))$$

Кроме того, на контуре имеем [7]

$$\frac{1}{R_m} \left(\frac{\partial v_{\theta m}}{\partial \theta} + v_{rm} \right) = \frac{1}{E_m} (G_{1m} \sigma_{\theta m} - v_m G_{2m} \sigma_r)$$

где $R_m = R$ (при $m = 1$) и r (при $m = 2$), $G_{1m} = (1 - v_m^2)$, $G_{2m} = (1 + v_m)$ – для плоской деформации; $G_{1m} = G_{2m} = 1$ – для плоского напряженного состояния; $v_m (m = \overline{1,2})$ – коэффициенты Пуассона для плоскости и диска соответственно; $E_m (m = \overline{1,2})$ – модули Юнга; $\sigma_{\theta m}, \sigma_r$ – компоненты напряжений в полярной системе координат. Тогда, используя (4), (5) получаем:

$$\begin{aligned} & \frac{R^2 - r^2}{2} + \frac{R^2}{E_1} (G_{11} \sigma_{11} - v_1 G_{21} \sigma_r) + R \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial u_1}{\partial \theta} \cos(\theta) + \frac{\partial v_1}{\partial \theta} \sin(\theta) \right) = \\ & = \frac{r^2}{E_1} (G_{12} \sigma_{12} - v_2 G_{22} \sigma_r) + r \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \theta} \cos(\theta) + \frac{\partial v_2}{\partial \theta} \sin(\theta) \right) \end{aligned}$$

Известно, что [8]

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta m} + \sigma_{rm} &= 2 \left[\Phi_m(w) + \overline{\Phi_m(w)} \right], \\ \sigma_{\theta m} - \sigma_{rm} + 2i \tau_{r\theta m} &= 2e^{2i\theta} \left[\overline{w} \Phi'_m(w) + \Psi_m(w) \right], \\ 2\mu_m(u_m + iv_m) &= \kappa_m \varphi_m(w) - w \overline{\Phi_m(w)} - \overline{\psi_m(w)} \end{aligned} \quad (1)$$

где $w = \zeta$ для диска и $w = z$ для плоскости, $\mu_m (m = \overline{1,2})$ – коэф-

коэффициент Ляме; $i = \sqrt{-1}$; $\varphi(w)$, $\psi(w)$ - комплексные потенциалы Колосова-Мусхелишвили; $\varphi'(w) = \Phi(w)$, $\psi'(w) = \Psi(w)$. Из (6) с учетом (7) получаем

Учитывая отсутствие трения в области контакта, а также результаты [5, 9] получаем:

$$\Phi_1(z) = \frac{\kappa_1}{2\pi(1+\kappa_1)} \frac{iP}{z} - \frac{1}{2\pi i} \int_L \frac{\sigma_r(\tau) d\tau}{\tau - z}, \quad (2)$$

$$\Phi_2(s) = \frac{-1}{2\pi(1+\kappa_2)} \frac{iP}{s} - \frac{iP}{2\pi(1+\kappa_2)} \frac{s}{r^2} + \frac{1}{2\pi i} \int_L \frac{\sigma_r(\zeta) d\zeta}{\zeta - s} - \frac{1}{4\pi i} \int_L \frac{\sigma_r(\zeta) d\zeta}{\zeta} \quad (3)$$

Но $h = tr/R$, $\zeta = \tau r/R$. Таким образом, из (1)-(3) получаем интегро-дифференциальное уравнение относительно нормальных радиальных напряжений, все коэффициенты которого получены без ограничений на основные геометрические параметры задачи:

$$\frac{t}{\pi} \int_L \frac{\sigma_r'(\tau) d\tau}{\tau - t} = \gamma_1 \sigma_r(\tau) - \frac{iP}{\pi} \gamma_2 \left(\frac{1}{t} - \frac{t}{R^2} \right) - \gamma_3 b - \gamma_4 \frac{R^2 - r^2}{2}, \quad (4)$$

где

$$\gamma_1 = \frac{(G_{12} - \nu_2 G_{22})E_1 R^2 - (G_{11} - \nu_1 G_{21})E_2 R^3}{2(R^3 E_2 G_{11} + r^3 E_1 G_{12})},$$

$$\gamma_2 = \frac{(1 + \nu_2)E_1 R^2 + \kappa_1(1 + \nu_1)E_2 R^3}{4(R^3 E_2 G_{11} + r^3 E_1 G_{12})},$$

$$\gamma_3 = \frac{R G_{11} E_2}{(R^3 E_2 G_{11} + r^3 E_1 G_{12})},$$

$$\gamma_4 = \frac{R E_1 E_2}{2(R^3 E_2 G_{11} + r^3 E_1 G_{12})},$$

$$\frac{b}{R^2} = -\frac{1}{2\pi i} \int_L \frac{\sigma_r d\tau}{\tau}, \quad t = R e^{i\theta},$$

α_0 – полуугол контакта; $\kappa_m = 3 - 4\nu_m$ – для плоской деформации;
 $\kappa_m = (3 - \nu_m)/(1 + \nu_m)$ – для плоского напряженного состояния.

Результаты исследований [1, 5] показывают, что в случае, когда стык не раскрыт, решение (4) имеет вид:

$$\sigma_r(\theta) = -\frac{2P\gamma_2}{\pi R(1-\gamma_1)} \cos(\theta) + \frac{\gamma_4(R^2 - r^2)}{2(\gamma_1 + \gamma_3 R^2)}$$

и величина силы для $\sigma_r(\pi) = 0$:

$$P_{кр} = \frac{\gamma_4(r^2 - R^2) \pi R(1-\gamma_1)}{4(\gamma_1 + \gamma_3 R^2) \gamma_2}$$

При $P > P_{кр}$ происходит раскрытие стыка.

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных полученных для стального диска и пластины из сплава Д16Т (плоское напряженное состояние) показывает, что расхождение не превосходит 6% [1].

Выводы:

- решена задача о напряженной посадке цилиндра в цилиндрической полости изотропной пластины без ограничений на основные геометрические параметры тел;

- установлено, что полученные теоретические зависимости с достаточной для практики точностью описывают напряженное состояние в исследуемом сопряжении.

Литература

1. Сухарев И.П. Прочность шарнирных узлов машин. - М.: Машиностроение, 1977.
2. Биргер И.А., Шорр В.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчеты на прочность деталей машин. - М.: Машиностроение, 1979.
3. Сулов А.Т., Трегер Л.В., Якобсон Г.А. Прочность соединений деталей с гарантированным натягом// Сб.: «Контактное взаимодействие твердых тел».- Калинин. - Изд-во КГУ.- 1982, С.27-31.
4. Решетов Д.Н. Детали машин. - М.: Машиностроение, 1989.
5. Теплый М.И. О расчете напряжений в цилиндрических соединениях// Проблемы прочности, 1979, № 9, с. 97-100.

6. Тарабасов Н.Д. Напряженное состояние машиностроительных деталей и их расчеты// «Расчеты на прочность», вып. 3, 1958, с. 194-200.
7. Прусов И.А. Термоупругие анизотропные пластинки. Минск, 1978.
8. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Кручение и изгиб. М., 1966.
9. Шереметьев М.П. Пластинки с подкрепленным краем. - Львов. 1960.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР ZnSe/ZnMgSSe/GaAs С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Е. В. Луценко, А. А. Гладыщук
Брестский политехнический институт
И. П. Марко, А. Л. Гурский, Г. П. Яблонский
Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси
M. Heuken
AIXTRON AG, Aachen, Germany
H. Kalisch, K. Heime
Institut für Halbleitertechnik, RWTH Aachen, Germany

Гетероструктуры на основе широкозонных полупроводников типа A^3B^6 перспективны для создания на их основе инжекционных лазеров и светодиодов на сине-зеленую область спектра, а также излучателей с электронной и оптической накачкой для лазерного цветного телевидения. Такие лазеры и излучатели будут использованы в видеодисплеях, пьезоэлектрических и акусто-оптических модуляторах, оптических системах памяти с высокой плотностью записи информации.

После создания первых инжекционных лазеров в сине-зеленой области спектра в 1991 г. [1, 2] началось интенсивное развитие работ по оптическим свойствам слоев и структур на основе ZnSe и ZnMgSSe. Во многих работах, в том числе в работах авторов [4-6], было показано, что пороги генерации в эпитаксиальных слоях в несколько раз меньше, чем в объемных кристаллах. В гетероструктурах с квантовыми ямами вследствие эффектов пространственного оптического и электрического ограничения оказалось возможным уменьшить пороги генерации еще почти на порядок величины.

В данной работе изучаются фотолюминесценция (ФЛ) и генерация при оптическом возбуждении в гетероструктурах с одной и многи-ми квантовыми ямами с раздельным ограничением (SCH-SQW, SCH-MQW) в интервале температур 77 - 650 К. Гетероструктуры на основе ZnSe и ZnMgSSe выращены методом осаждения металлоорганических соединений из паровой фазы MOVPE (metal-organic vapour-phase epitaxy) на подложку из GaAs при температуре роста 330°C. Генерация и ФЛ возбуждались излучением лазера на молекулярном азоте ($P=20$ кВт, $\lambda=337.1$ нм, $t=10$ нс, $F=10^3$ Гц, $I=1 \cdot 10^6$ Вт/см²).

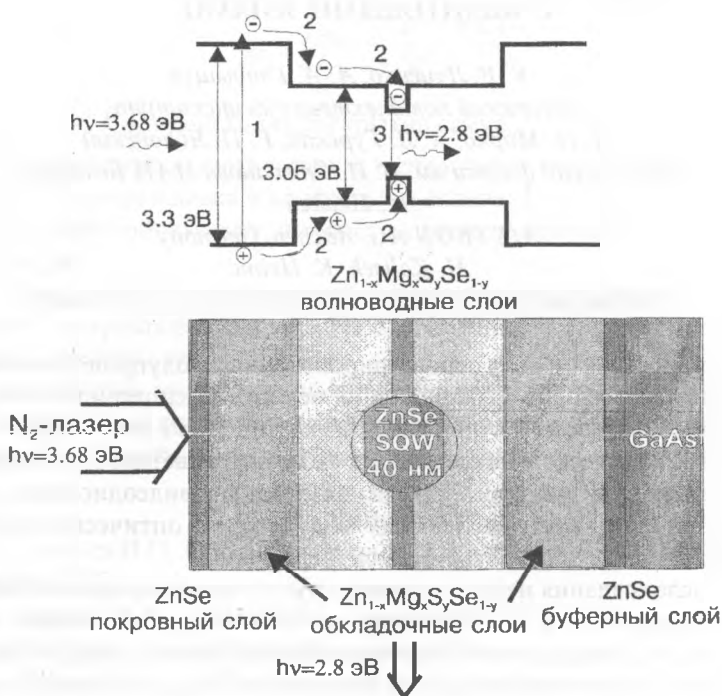


Рис. 1

Резонаторы длиной 200-400 мкм получены скалыванием пластин по плоскостям спайности (110). На рис. 1 показано расположение слоев и

схема энергетических зон структуры SCH-SQW. Возбужденные носители заряда во внешнем широкозонном слое ZnMgSSe (процесс 1) диффундируют и скатываются (2) в более узкозонный слой (с меньшей концентрацией Mg и S), а затем попадают и накапливаются в квантовой яме ZnSe, где они рекомбинируют с излучением квантов света (3).

С ростом интенсивности накачки в спектрах излучения с торца резонатора наблюдается появление более узкой полосы стимулированного излучения (рис. 2) на фоне широкой полосы ФЛ. После достижения порога генерации спектр сужается до 0.5 - 2 нм. Стимулированное излучение и генерация являются строго поляризованными. Вблизи порога генерации

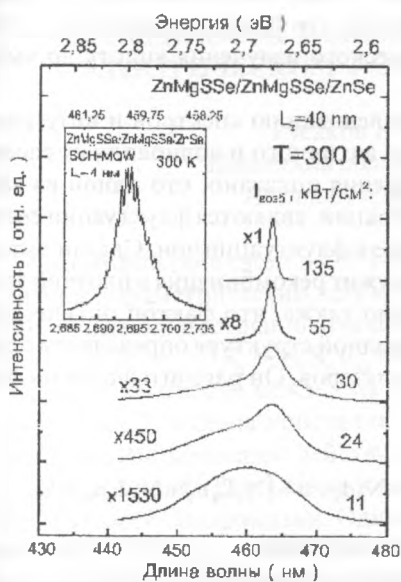


Рис. 2

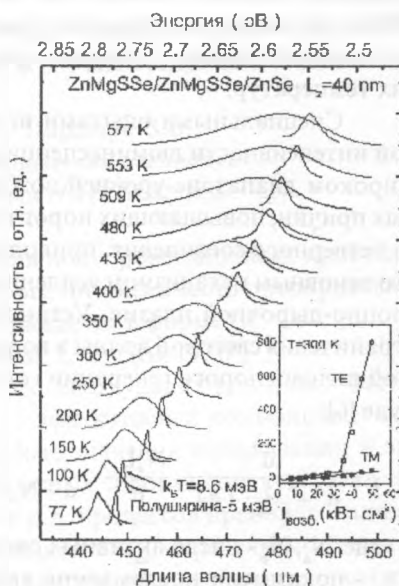


Рис. 3

наблюдается хорошо разрешенная модовая структура, которая показана на вставке к рис. 2 для температуры $T=300$ К. Модовая структура лазерного излучения проявляется в интервале температур от 77 до 400 К. Наиболее низкий порог генерации был получен на SCH с семью квантовыми ямами шириной 4 нм: $I_{\text{пор}} = 6$ кВт/см² при температуре жидкого азота и $I_{\text{пор}} = 20$ кВт/см² при комнатной температуре. Низкие пороги генерации

позволили впервые получить лазерное излучение на таких структурах вплоть до температуры $T=612$ К, которая даже превышает температуру роста.

На рис. 3 показаны спектры люминесценции и генерации SCH с одной ямой шириной 40 нм в широком диапазоне температур от 77 до 577 К. Энергия в импульсе такого лазера при комнатной температуре составила 5 нДж. Расходимость излучения в плоскости образца была $(q/2)_{\parallel}=14^{\circ}$ и в перпендикулярной плоскости - $(q/2)_{\perp}=26^{\circ}$. На вставке к рис. 3 показана зависимость полной интенсивности излучения от накачки для двух поляризации при температуре 300 К. Видно, что вблизи порога мощность излучения в TE моде резко возрастает, в то время как мощность излучения TM моды изменяется незначительно. Все эти факты свидетельствуют о достижении режима генерации оптического излучения вплоть до высоких температур.

Специальными опытами по исследованию спектров и интегральной интенсивности люминесценции из активного и волноводных слоев в широком диапазоне уровней возбуждения показано, что одной из важных причин, повышающих порог генерации, являются флуктуации состава четверного соединения, приводящие к флуктуации зон. Сделан вывод, что основным механизмом усиления служит рекомбинация в плотной электронно-дырочной плазме. Установлено также, что фактор оптического ограничения световой волны в волноводной структуре определяет в большой степени пороги генерации гетеролазеров. Он рассчитывался по формуле [6]:

$$\Gamma = \frac{\bar{d}^2}{\bar{d}^2 + \frac{2}{n^2 - n_1^2} \cdot \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2} \cdot \frac{N_a L_z}{\bar{d}}, \quad \bar{d} = N_a L_z + N_b d_b, \quad \bar{n} = (N_a L_z n_0 + N_b d_b n_b) / \bar{d},$$

где N_a, N_b - число активных слоев и барьеров, L_z, d_b - их ширины, n_0, n_b и n_1 - показатели преломления активного, барьерного и волноводно-го слоя соответственно. Наиболее высокое значение величины $\Gamma=0.182$ получено для SCH-SQW с шириной ямы 40 нм. При $\Gamma < 0.06$ генерация не возбуждалась.

Литература

1. H. Jeon, J. Ding, W. Patterson, A. Nurmikko, W. Xie, D. Grillo, M. Kobayashi, and R. L. Gunshor, Appl. Phys. Lett., **59**, 3619 (1991).
2. M.A. Haase, J. Qiu, J. M. DePuydt, H. Cheng, Appl. Phys. Lett. **59**, 1272 (1991).

3. A. L. Gurskii, V. V. Gruzinskii, A. N. Gavrilenko, I. I. Kulak, A. I. Mitkovets, G. P. Yablonskii, M. Scholl, M. Heuken. *J. Appl. Phys.* 77, 5394 (1995).

4. H. Kalish, H. Hamadeh, J. Muller, G. P. Yablonskii, A. L. Gurskii, J. Woitok, J. Xu, and M. Heuken. *J. Electron Materials*, 26, 1256 (1997).

5. G. P. Yablonskii, A. L. Gurskii, E. V. Lutsenko, I. P. Marko, H. Hamadeh, J. Soellner, W. Taudt, M. Heuken. *Phys. status solidi (a)*, 159, 543 (1997).

6. V. K. Kononenko and I. S. Zakcharova. Preprint IC/91/63 (International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy (1991)).

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ В СУЛЬФИДЕ КАДМИЯ

Русаков К.И., Паращук В.В.

*Брестский политехнический институт,
Институт физики НАН Беларуси*

Взаимодействие света и СВЧ-волн в полупроводниковых кристаллах является параметрическим, для которого интенсивность преобразования в приближении постоянного поля выражается в форме [1]:

$$S_3 \sim S_1 S_2 d_{3\phi}^2 [\sin(\Delta k L/2) / (\Delta k L/2)]^2,$$

где S_j - плотности мощности взаимодействующих волн, Δk - фазовая расстройка, L - длина кристалла, $d_{3\phi}$ - эффективный коэффициент нелинейности, связывающий действительные значения поляризации и электрического поля. Выражение в квадратных скобках соответствует условию фазового синхронизма. Однако к.п.д. процессов преобразования частоты существенно зависит от коэффициента $d_{3\phi}$, определяемого симметрией кристалла, поляризациями и направлениями распространения взаимодействующих волн. Анализ результатов расчета коэффициента нелинейности по данным различных авторов показывает, что в отсутствие электрического поля $d_{3\phi}$ изотропен в плоскости {0001} кристаллов CdS. Сильное внешнее поле, вектор которого расположен в данной плоскости, меняет симметрию решетки кристалла, и он становится псевдотригональным. При этом эффективный коэффициент нелинейности $d_{3\phi}$ для различных видов взаимодействия волн оказывается пропорциональным $\cos 3\phi$ или $\sin 3\phi$, откуда следует зависимость $S_3 \sim \cos^6 \phi$ или $\sim \sin^6 \phi$, озна-

чающая, что направления максимальной эффективности взаимодействия расположены в плоскостях $\{10\bar{1}0\}$ сульфида кадмия. В пределах каждой из таких плоскостей указанные направления определяются преимущественно условиями фазового синхронизма, т.е. соответствуют ориентации стримерных разрядов. Вследствие отсутствия сведений о коэффициентах d и нелинейного электрооптического эффекта учет максимальной эффективности взаимодействия волн в сильном электрическом поле совместно с условиями фазового синхронизма позволяет предсказать развитие данного процесса в пространстве для гексагональных кристаллов.

В расчетах направлений синхронизма СВЧ-волн и света [2] не затрагивался вопрос о границах спектральной области микроволновых колебаний. Рассчитаем длинноволновую и коротковолновую границы СВЧ-спектра, т.к. эти данные необходимы анализа возможных нелинейных взаимодействий волн в полупроводниках.

Значение длины СВЧ-волны ($\lambda_{\text{свч}} \approx 3$ см), использовавшееся в [2], было определено на основании результатов работы [3], в которой показано, что электрическое поле в кристалле под действием высоковольтного короткого импульса напряжения совершает колебания с частотой $\sim 10^9 \div 10^{12}$ Гц и может рассматриваться как источник электромагнитных волн (частота колебаний зависит от скорости нарастания внешнего поля и других факторов). Для кристаллов, рассматриваемых как волновод, необходимо учитывать невозможность распространения в них волн с длиной, превышающей критическую длину волны (λ):

$$\lambda_{\text{max}} < \lambda_{\text{кр}}(\epsilon\mu)^{1/2}, \quad \text{где } \lambda_{\text{кр}} = 2[(m/a)^2 + (l/b)^2]^{-1/2},$$

m, l - характеристические числа; $a \approx b \approx d$ - размер поперечного сечения волновода, $\mu \approx 1$. При условии $0,5\lambda_{\text{кр}} < \lambda < \lambda_{\text{кр}}$ и $m = 1, l = 0$ ($m = 0, l = 1$) в волноводе может распространяться только один тип волн H_{10} , называемый основным.

Для того, чтобы определить границы спектра СВЧ, рассчитаем длину волн в приближении, когда нелинейная поляризация кристалла является постоянной в пространстве, но меняется во времени. В этом случае частота переменного электрического поля, генерируемого мощной световой волной в одноосном отрицательном кристалле, зависит от угла между оптической осью и направлением распространения световых волн с частотами ω_1 и ω_2 :

$$\cos(\Theta) = \{(1 - [(\omega_1/\omega_c) n_c(\omega_1) / n_o(\omega_1)]^2) / (1 - [n_c(\omega_2) / n_o(\omega_2)]^2)\}^{1/2}.$$

Для кристаллов сульфида кадмия при $\lambda_1 = 0,515$ мкм, $\omega_1 \approx 3,664 \cdot 10^{15}$ с⁻¹, $n_o = 2,743$, $n_c = 2,726$. Аппроксимация дисперсии показателя прелом-

ления в области λ_1 приводит к соотношению

$$\omega_1 = 5 \cdot 10^{14} \{0,918 + [0,843 + 359,027/(80,927 - \cos^2\Theta)^{1/2}]^{1/2}\}.$$

Экстраполяция длинноволновой границы СВЧ спектра дает значение $\lambda \approx 3$ см. Коротковолновой край определяется максимальным значением частоты $\omega = \omega_2 \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ($\lambda \approx 0,2$ мм).

Оценку длины СВЧ волны можно получить также исходя из представления о взаимодействии света с потоком электронов [4]. Данный процесс рассматривается как частный случай параметрического взаимодействия, при котором световая волна частоты ω_1 движется навстречу волне ω_2 пространственного заряда и в результате их взаимодействия генерируется или усиливается световая волна большей частоты ω_3 - «преобразование частоты вверх»:

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3,$$

$$k_1 - k_2 = k_3,$$

$$\omega_2 = k_2 v_0 - \omega_p / \zeta^{3/2},$$

где $\zeta = (1 - v_0^2/c^2)^{-1/2}$, ω_p - плазменная (ленгмюровская) частота, v_0 - скорость электронов. Поскольку $\omega_p / \zeta^{3/2} \ll \omega_0(1 + v_0/v_1)$, то

$$\omega_3 \approx \omega_1 (1 + v_0/v_1) / (1 - v_0/v_3),$$

$$\omega_2 = \omega_1 v_0 (1/v_1 + 1/v_3) / (1 - v_0/v_3),$$

где $v_1 = \omega_1/k_1$, $v_3 = \omega_3/k_3$. Учитывая, что для близких световых частот $v_1 \approx v_3 = c$, имеем $\omega_2 \approx 2\omega_0 v_0/c$. При $\lambda = 0,5$ мкм, $v_0 \approx 10^7$ см/с (дрейфовая скорость насыщения) частота волны пространственного заряда $\omega_2 \approx 3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$, что примерно совпадает с приведенным выше средним значением. Поскольку скорость переднего фронта стримера может быть выше дрейфовой для электронов, то больше будет и величина ω_2 .

Эти результаты подтверждаются данными работы [5], в которой определена частота автоколебаний плотности плазмы и электрического поля на переднем фронте стримера ($\omega \approx 1,6 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$). Сравнение с предыдущим расчетом показывает, что различные оценки длины СВЧ волн с учетом нелинейных процессов приводят к близким результатам и теоретически обосновывают возможность синхронизма рекомбинационного излучения и колебаний микроволнового диапазона при стримерном разряде.

Литература

1. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. Прикладная нелинейная оптика.- М.: Мир, 1976.- 261 с.
2. Грибковский В.П., Прокопья А.Н., Русаков К.И., Парашук В.В. Взаимодействие электрического поля со светом и направленность стри-

мерных разрядов // ЖПС.- 1994.- Т. 60, № 3 - 4, С. 362-368.

3. Streamer Discharges in Semiconductors / V.P. Gribkovskii, A.A. Gladyschuk, V.V. Zubritskii et al. // Phys. Stat. Sol. (a).- 1983.- Vol. 77, № 2.- P. 765-774.

4. Федорченко А.М., Коцаренко Н.Я. Абсолютная и конвективная неустойчивость в плазме и твердых телах.-М.: Наука,1981.-176 с.

5. Владимиров В.В., Горшков В.Н., Константинов О.В., Кускова Н.И. Возбуждение высокочастотных автоколебаний в стримерных полупроводниковых лазерах // Доклады АН СССР.-1989.- Т. 305, № 3, С. 586-588.

ОБУЧЕНИЕ НАЧЕРТАТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ НА БАЗЕ ТРЕХМЕРНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Шабeka Л.С., Сторожилow А.И.

Белорусская государственная политехническая академия

Практическое освоение современных компьютерных технологий проектирования и обучения на основе построения компьютерно-графических моделей (КГМ) способствует как более глубокому пониманию студентами важности изучения традиционных графических дисциплин, так и освоению принципиально новых методов решения проектно-графических задач с применением ЭВМ.

Создание КГМ объектов можно выполнять точно так же как это делается традиционно - путем построения проекций объекта. При этом уже можно воспользоваться рядом преимуществ, предоставляемых современными системами инженерной компьютерной графики (ИКГ) по сравнению с традиционными методами: высокая (заданная) точность выполнения построений и преобразований, высокая эффективность и скорость выполнения чертежей за счет возможностей копирования (размножения) графических объектов, создания зеркальных отображений, использования геометрических расчетов по ходу построений, автоматизации вычерчивания типовых изображений и др.

Другим, на наш взгляд значительно более эффективным и естественным методом построения графической модели объекта, является создание ее трехмерной КГМ, которое основано на более совершенном - пространственном представлении графических объектов с точно определенными геометрическими параметрами формы и положения. Создание трех-

мерной КГМ начинается, как правило, не с построения одной из проекций предмета на соответствующую плоскость проецирования (главный вид), а с построения основания ее пространственного каркаса; базовых ее поверхностей, ограничивающих моделируемый объект; с построения типовых объемных форм, составляющих объект, и последующим использованием операций сложения, вычитания или пересечения объемов таких форм. Различие методов построения модели зависит от того какой тип модели является необходимым и достаточным для описания объекта: каркасный, поверхностный или твердотельный.

Для построения КГМ можно использовать как универсальное базовое программное обеспечение современных систем ИКГ (графический редактор), так и специально разработанные для большего удобства программы, составленные с использованием методов программирования. Однако, поскольку последние версии систем ИКГ содержат вполне достаточный набор средств для обеспечения построений и преобразований моделей, основным для будущих инженеров в изучении ИКГ должно стать не столько освоение методов и средств программирования, сколько глубокое практическое освоение базовых возможностей современных компьютерных систем.

Решение ставших уже классическими задач начертательной геометрии является основой успешного освоения предмета, актуальность которого несколько не снижается в связи с появлением новых компьютерных технологий проектирования, наоборот, новые возможности решения не только проектных, но и других расчетно-графических инженерных задач на основе компьютерного моделирования повышают его роль и значение в профессиональной подготовке студентов ВТУЗов - будущих инженеров.

Проведенные исследования и разработки в области использования современных компьютерных систем проектирования для решения позиционных и метрических задач начертательной геометрии позволяют сделать выводы о возможности и целесообразности создания специализированных программно-методических комплексов, предназначенных для изучения не только систем ИКГ, но и традиционных курсов начертательной геометрии и инженерной графики.

Решение задач возможно на базе как плоских, так и трехмерных КГМ, с использованием как традиционных алгоритмов решения, разработанных для «ручной» технологии, так и принципиально новых компьютерно-графических методов путем выполнения построений и преобразова-

ний КГМ в интерактивном (диалоговом) режиме. К таким методам можно отнести: задание новой системы координат наряду с традиционной заменой плоскостей проекций; изменение направления проецирования модели наряду с вычерчиванием другой проекции; одновременное использование новой системы координат и направления проецирования наряду с использованием вспомогательных линий уровня - горизонталей, фронталей; использование следа секущей плоскости для построения сечений; прямые определения координат, расстояний, углов, площадей, объемов и др. непосредственно по КГМ или с дополнительными построениями используя графические методы вместо аналитических, что значительно удобнее. Следует отметить при этом, что использование традиционных графических методов (алгоритмов) решения позиционных задач, таких как построение точек пересечения прямых, прямой и плоскости, линий пересечения плоскостей и поверхностей на базе трехмерных каркасных КГМ на наш взгляд более естественно, имеет больший обучающий эффект, чем их реализация на традиционных или компьютерных плоских чертежах и даже при использовании трехмерной «твердотельной» КГМ. Вообще, каркасная структура модели при решении геометрических задач представляется наиболее эффективной.

При решении большинства метрических задач на базе КГМ, достаточно только правильно задать вспомогательной системой координат плоскость, в которой определяются натуральные размеры геометрических фигур, отрезков, углов и др.

Для решения задач начертательной геометрии возможно использование программ автоматического решения элементов задач как по конкретным исходным параметрам, так и на основании типовых параметрических моделей. Однако при этом возможна потеря обучающего эффекта, направленного на освоение методов решения задач, т.к. исключается возможность предполагаемого совмещения процессов обучения студентов как практическому решению задач, так и методам компьютерно-графического моделирования и решения тех же задач на новой основе.

Решение позиционных и метрических задач на базе КГМ, в отличие от традиционных методов, имеет ряд бесспорных преимуществ: точность выполнения графических построений; простота и естественность восприятия методов решения большинства задач, особенно связанных с определением натуральных величин расстояний, углов, сечений и т.п.; возможности трансформации трехмерной КГМ в проекционный чертеж, анимации («оживления») и озвучивания процесса построения модели, много-

кратного и с различной степенью детализации использования КГМ на всех стадиях проектирования и обучения. Тем не менее, начинать освоение новых методов нужно с изучения традиционных приемов, т.к. большинство новых методов базируется на ранее используемых.

Общим принципом обучения компьютерно-графическому моделированию должен стать, по нашему мнению, принцип перехода от простого к сложному с использованием элементов автоматизации процедур, ранее освоенных традиционными методами, что будет способствовать интенсификации обучения с одновременным повышением качественного уровня.

На базе используемой системы ИКГ «АВТОКАД» и языка программирования «AutoLISP» на кафедре «Инженерная графика машиностроительного профиля» БГПА разработан лабораторный программно-методический комплекс, предназначенный для обучения построению плоских и трехмерных КГМ и решения на этой основе задач начертательной геометрии и других инженерных задач. Программное обеспечение комплекса состоит из учебных компьютерных программ построения проекций типовых параметризованных форм и конструктивных элементов; программ построения примитивов, отсутствующих в базовом наборе системы ИКГ (параболы, гиперболы, синусоиды, эвольвенты, циклоиды, винтовой линии и др.) и соответствующих трехмерных моделей поверхностей и тел, построенных на их основе, а также программ работы с ними; программ построения разверток поверхностей; программ сложения и вычитания векторов в пространстве; специальных программ редактирования и оформления чертежей по ЕСКД (штриховки без разрыва примитивов, простановки размеров, предельных отклонений, оформления технических требований, форматов и основных надписей и др.); программ контроля знаний. Методические материалы содержат пособия, справочную информацию, задания, порядок проведения лабораторных и практических занятий. Все это является основой для создания в будущем комплекса компьютерных систем обучения студентов ВТУЗов графическим дисциплинам.

Литература

1. Шабека Л.С., Сторожилов А.И. и др. Введение в машинную графику. Лабораторные работы по курсу «Начертательная геометрия. Инженерная графика» -Минск: БГПА, 1993. -55С.

2. Шабека Л.С., Сторожилов А.И. и др. Лабораторная работа «Выполнение сборочных чертежей резьбовых изделий на ПЭВМ по курсу «Начертательная геометрия. Инженерная графика» - Минск: БГПА, 1993 -16С.

3. Шабека Л.С., Сторожилов А.И. и др. Лабораторная работа «Построение чертежей на ПЭВМ на основе типовых изображений методом редактирования» по курсу «Начертательная геометрия. Инженерная графика» - Минск: БГПА, 1993 -18С.

4. Шабека Л.С., Сторожилов А.И. и др. Лабораторная работа «Построение трехмерных графических моделей на ПЭВМ» по дисциплине «Начертательная геометрия. Инженерная графика» - Минск.: БГПА, 1996 -38С.

5. Шабека Л.С., Сторожилов А.И. и др. Лабораторные работы по инженерной компьютерной графике. - Минск.: БГПА, 1997 -55С.

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЦЕЛОСТНОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРА

Шабека Л.С.

Белорусская государственная политехническая академия

Системно-конструктивный подход к содержанию и процессу графической подготовки ставит задачу наиболее полно определить цели и задачи обучения, развития и воспитания, без решения которых достижение целостности графической подготовки невозможно выявить и взаимосвязать применительно к этим целям и задачам всю систему функций содержательных и процессуальных компонентов. Мы исходим из концепции целостного человека, позволяющей самореализоваться, самовыразиться в единстве профессионального и личного, а также из центральной идеи непрерывного образования о непрерывности развития интеллекта человека, его личностных качеств, ориентированных не только на познание, но и на преобразование действительности, когда знания, умения и навыки выступают в качестве средства деятельности.

Проведенный структурный анализ инженерной деятельности и выделение в ней главенствующей роли пространственно-графического компонента [1], позволили определить требования к построению структурно-функциональной модели целостной графической подготовки инженера.

Модель включает пять функционально-соподчиненных компонентов

следующего содержания:

- умение и навыки представления пространственных форм по их проекционным изображениям, знаковому или словесному описанию, проводить логические действия с образами пространства, генерировать различные пространственные формы, а тем самым способствовать развитию пространственного представления и воображения, как основы технического мышления - пространственно-логический (ПРЛ);

- владение проекционными методами отображения трехмерных объектов на плоскости, методами представления информации в виде графиков, диаграмм, схем и т.п. - изобразительный (ИЗО);

- знание законов образования пространственных форм, графических методов решения различных позиционных и метрических задач, связанных с этими формами - геометро-графический (ГГР);

- умение применять ручные и компьютерные графические методы к решению различных технических задач, связанных с проектированием машин и технологических процессов, а также умение декодировать знаковую информацию, содержащуюся в технической документации - конструктивно-графический (КГР);

- качества, развиваемые в процессе графической подготовки: эстетический вкус, образность мышления, зрительная память, координация руки и глаза, а как следствие последнего - аккуратность и точность в работе и др. - личностно-развивающий (ЛР).

Сообразуясь с концептуальным положением о графической подготовке специалиста как развивающемся целом, представляет интерес выделение этапов и уровней графической подготовки в этом непрерывном процессе.

На основании анализа непрерывного процесса накопления графических знаний, умений, навыков и качеств личности можно выделить следующие возрастные этапы и качественные уровни графической подготовки инженера.

Первый уровень характеризуется тем, что воспитанники дошкольных учреждений могут узнавать простейшие плоскостные и пространственные фигуры, изображать их в основном контуром, строить элементарные композиции из них, высказывать определенные суждения о красоте форм, оценивать обобщенно взаимное расположение различных объектов, представлять пользу изображений в жизнедеятельности людей.

Второй уровень позволяет школьникам строить и читать проекционные изображения гранных тел и тел вращения, отдельно и в парном сочетании при наличии, как правило, сквозных отверстий; оценивать метрические характеристики геометрических фигур на базе удобного расположения, относительно плоскостей проецирования, строить простейшие развертки, частично читать знаковую информацию на технических чертежах, оценивать эстетические характеристики объектов на основе понятий о пропорции и симметрии.

Третий уровень достигается на базе межпредметных связей, факультативных занятиях и специальных курсах в старших классах и характеризуется тем, что школьники уже могут строить и читать проекционные изображения деталей, содержащих линии пересечения как на внешних, так и на внутренних формах деталей; частично решать метрические задачи на основе преобразования проекций, более полно декодировать символическую информацию на технических чертежах; достаточно развитым пространственным мышлением, опирающимся на геометрические тела, проявлением признаков композиционного построения, геометрическим осмыслением окружающей среды.

Четвертый уровень характеризуется более развитым пространственным мышлением, умением переходить от конкретного к абстрактному и наоборот, читать и строить изображения деталей в различном пространственном расположении, решать все типовые метрические и позиционные задачи, комплексно применять их в практических приложениях, декодировать всю знаковую информацию, содержащуюся в технической документации; включает умение представлять различную информацию на непроекционных графических моделях, давать эстетическую оценку на базе таких понятий как контраст, нюанс, метр и ритм и т.п., опорой мышления на поверхностные конструктивы.

Пятый уровень, в дополнение к предыдущему, отмечается более развитыми умениями эскизного выполнения графических моделей, отражающих динамику процессов на базе трехмерного моделирования, большим запасом образов технических форм, способностью заимствовать их из живой природы, опорой в мышлении на типовые технические формы, развитыми навыками компьютерного моделирования, владением закономерностей художественного дизайна.

Интегральным критерием, отражающим качественную сторону целостной графической подготовки на наш взгляд может являться способность выпускников высших и средних учебных заведений комплексно

применять графические методы к решению конструктивно-геометрических задач, отражающих характер будущей профессиональной деятельности.

Количественным критерием может служить отношение суммы экспертных оценок каждого компонента к их максимально возможному значению, с учетом удельного веса каждого компонента.

Литература

1. Шабeka Л.С. Структурный анализ инженерной деятельности и задачи подготовки специалистов машиностроения//«Известия Международной академии технического образования»/«Адукацыя і выхаванне». - Мн. 1997 с. 106-114.

К МЕТОДИКЕ ПРОВЕДЕНИЯ ЗАНЯТИЙ ПО ЧЕРЧЕНИЮ ДЛЯ СЛУШАТЕЛЕЙ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОГО ОТДЕЛЕНИЯ

Шумская Л.П., Яромич А.И.

Брестский политехнический институт

При выполнении графической работы по черчению, в которой необходимо по двум заданным видам многогранника (призмы или пирамиды) построить третий вид, внимание слушателей подготовительного отделения обращается на то, что многогранник состоит из отдельных элементов: вершин, ребер, граней. Чтобы построить чертеж любого предмета, необходимо научиться изображать отдельные его элементы: вершины (точки), ребра (отрезки прямых), грани (отсеки плоскостей) и т.д.

На занятиях по черчению возникает необходимость дать самые начальные сведения о чертежах точки, прямой, плоскости в системе двух и трех взаимно перпендикулярных плоскостях проекций, то есть внедрить элементы начертательной геометрии.

Из опыта работы со слушателями подготовительного отделения отмечено, что при таком изложении материала учащиеся более осознанно работают с чертежами по теме «Виды» и на первом курсе обучения в институте не испытывают значительных трудностей при изучении начертательной геометрии и инженерной графики.

Литература

1. Александрович З.И. и др. Черчение. - Мн.: Выш. школа, 1983.- 228 с.

2. Годик Е.И., Хаскин А.М. Справочное руководство по черчению. - М.: Машиностроение, 1974.- 696 с.

К МЕТОДИКЕ ПОДГОТОВКИ АБИТУРИЕНТОВ К ВСТУПИТЕЛЬНЫМ ЭКЗАМЕНАМ ПО ЧЕРЧЕНИЮ

*Шумская Л.П., Яромич А.И.
Брестский политехнический институт*

На вступительных экзаменах по черчению абитуриенты решают две задачи: одну - по геометрическому черчению, вторую – по проекционному черчению.

Во второй задаче задаются несколько пересекающихся простейших геометрических поверхностей: гранных и поверхностей вращения, таких как цилиндр, конус и сфера. Причем грани гранных поверхностей занимают частное положение, то есть параллельны или перпендикулярны одной из плоскостей проекций. Плоскости граней пересекают поверхности вращения по плоским кривым линиям, точки которых принадлежат и поверхности вращения и грани.

При решении таких задач важно знать, какие фигуры сечения могут быть на указанных выше поверхностях вращения при пересечении их различными плоскостями частного положения и каковы проекции этих фигур. При этом нужно помнить, что одна проекция линии пересечения всегда является прямой линией, совпадающей со следом секущей плоскости. Кроме того, абитуриент должен знать, что построение любой проекции кривой необходимо начинать с опорных точек: очерковых, которые лежат на контурной линии поверхности и делят проекцию линии сечения на видимую и невидимую части; высшей и низшей и др. Затем определяются промежуточные точки.

Поскольку все искомые точки принадлежат поверхности, то способ их построения основан на отыскании точек пересечения линий поверхности (образующих, параллелей, меридианов и т.п.) с секущей плоскостью. Все найденные точки соединяются плавной кривой.

В большинстве случаев абитуриенту приходится строить не всю кривую линию сечения (эллипс, параболу, гиперболу и др.), а отдельные ее участки. Но без полного представления этой линии и ее проекций нельзя грамотно решить задачу. А неточности графических построений при этом

могут привести к грубым ошибкам.

Литература

1. Александрович З.И. и др. Черчение.-Мн.: Выш. школа, 1983.- 228 с.
2. Годик Е.И., Хаскин А.М. Справочное руководство по черчению. - М.: Машиностроение, 1974.- 696 с.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЁТА СЛОЖНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Кондратьюк В.Ф., Акимов В.А.

Белорусская государственная политехническая академия

В Белорусской государственной политехнической академии под руководством профессора А.Е. Крушевского разработан пакет прикладных программ под условным названием "КОРПУС", ориентированный, в основном, на расчёт сложных пространственных конструкций типа базовых деталей машин.

Алгоритм расчёта был основан на решении вариационного уравнения Лагранжа с привлечением кинематических и статических связей [1]. Упругие перемещения аппроксимируются стандартными степенными рядами. Преимущества такого метода обнаруживаются при решении не только тестовых, но и реальных инженерных задач в сравнении с численными методами, заключающимися в значительно меньшем числе расчётных уравнений. Это обстоятельство весьма существенно не только в оптимизационных задачах, но даже при обычном расчёте сложных пространственных конструкций. Это явилось решающим в выборе метода.

Кроме силовой, кинематической нагрузки возможна и температурная в виде объёмной или поверхностной. Нами выполнен ряд примеров расчёта геометрически сложных конструкций. В связи с этим, разработанная методика описания геометрии детали, которая может, к примеру, быть использована и в динамических задачах механики, требующих решения небольших частных задач: вычисления центра тяжести, моментов инерции, моментов произвольных степеней.

Существующая база пакета прикладных программ предусматривает подключение и совместное функционирование блоков из различных областей механики деформируемых твёрдых тел. В частности, была осу-

шествлена разработка блока подпрограмм по расчёту динамических задач теории упругости. Опишем более подробно математическую основу содержимого этого блока.

Чтобы ускорить время расчёта динамических явлений в деталях со сложной конфигурацией, предварительно было осуществлено функциональное преобразование системы линейных динамических уравнений теории упругости. Используя операторный подход, после достаточно громоздких аналитических преобразований, удалось решение исходной системы Ламе представить в виде суммы произведения операторов на аналитические функции:

$$\begin{cases} u = \partial_1 * \Phi * f(x, y, t) + \partial_1 * G_{12} * g(x, y, t); \\ v = \partial_2 * \Phi * f(x, y, t) + \partial_2 * G_{12} * g(x, y, t); \\ w = G_{21} * f(x, y, t) + \Delta * \Phi * g(x, y, t). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь Φ , G_{12} , G_{21} - дифференциальные операторы бесконечно высокого порядка, аргументами которых служат произведения поперечной координаты упругой среды на квадратный корень из продольных даламбертианов $Z\sqrt{\Delta_1}$ и $Z\sqrt{\Delta_2}$.

$$\Phi = \frac{\cos Z\sqrt{\Delta_1}}{\cosh\sqrt{\Delta_1}} - \frac{\cos Z\sqrt{\Delta_2}}{\cosh\sqrt{\Delta_2}}; \quad G_{ij} = \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta_i}} \cdot \frac{\sin Z\sqrt{\Delta_i}}{\cosh\sqrt{\Delta_i}} - \sqrt{\Delta_j} \cdot \frac{\sin Z\sqrt{\Delta_j}}{\cosh\sqrt{\Delta_j}};$$

$$\partial_1 = \frac{\partial}{\partial x}; \quad \partial_2 = \frac{\partial}{\partial y}; \quad \Delta = \partial_1^2 + \partial_2^2; \quad \Delta_1 = \Delta - \frac{1}{C_1^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2};$$

$$\Delta_2 = \Delta - \frac{1}{C_2^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2};$$

C_1 и C_2 - скорости продольных и поперечных волн; $f(x, y, t)$ и $g(x, y, t)$ - произвольные аналитические функции продольных координат упругой среды и времени.

Построенное таким образом решение тождественно удовлетворяет динамическим уравнениям Ламе внутри среды при любых функциях $f(x, y, t)$ и $g(x, y, t)$. Если рассматриваемая область (деталь констру-

кции или инженерного сооружения) ограничена сверху и снизу плоскими параллельными плоскостями, то за счёт аналитических свойств операторов можно некоторым видам граничных условий удовлетворять точно.

В общем виде за счёт произвола выбора функций $f(x, y, t)$ и $g(x, y, t)$ задачу можно свести к системе линейных алгебраических уравнений.

Существенным фактором здесь является наличие временной компоненты. Каким образом представить временной параметр, зависит от конкретной постановки задачи, но наиболее важным для практики являются два случая: а) явление удара; б) расчёт собственных частот изделия.

В первом случае после приложения сосредоточенного импульса представляет интерес картина распространения и отражения ударной волны спустя очень малое время. После многократного прохождения ударной волны картина существенно усложняется и не поддаётся дискретному анализу. Здесь можно применять лишь интегральные оценки.

Во втором случае переменные разделяются и аналитические функции, входящие в решение представляются в виде:

$$f(x, y, t) = l^{iu} f_1(x, y), \quad g(x, y, t) = l^{iu} g_1(x, y),$$

где
$$f_1 = \sum_k \sum_m a_{km} x^k y^m;$$

$$g_1 = \sum_k \sum_m b_{km} x^k y^m.$$

Это сводится к вырожденной системе линейных алгебраических уравнений. Приравнявая определитель полученной системы к нулю, будем находить собственные частоты.

Заметим, что представления решений в виде (1) удобна ещё и тем, когда необходимо перейти к цилиндрической системе координат, то достаточно произвести замену:

$$d_1 \rightarrow \frac{d}{dr}, \quad d_2 \rightarrow \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi}, \quad \Delta_{1,2} \rightarrow \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} - \frac{1}{C_{12}^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2},$$

$$f(x, y, t) \rightarrow f(r, \varphi, t), \quad g(x, y, t) \rightarrow g(r, \varphi, t).$$

Задачи динамики для сложных областей ещё плохо изучены, они вызывают большие трудности и требуют тщательной подготовки исходных данных.

Литература

1. Кондратюк В.Ф., Гурский Н.Н. Интегрированная система проектирования конструкций произвольной структуры. Министерство образования РБ, фонд алгоритмов и программ.
2. Акимов В.А. Применение операторного подхода к решению задач теории упругости. //Современные проблемы механики и математической физики. // Воронеж, 1994 г.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Зубрицкий В.В.

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси

Цель настоящего сообщения—ознакомить студентов, как будущих инженеров, исследователей с конкретным примером использования физических свойств кристаллических решеток для улучшения технических характеристик приборов — полупроводниковых излучателей. Для преподавателей соответствующих дисциплин может быть полезно с методической точки зрения.

Практическое использование различных типов твердотельных лазеров непрерывно расширяется. Этот бесспорный факт стимулирует, с одной стороны, необходимость разработки новых лазерных систем и, с другой стороны, совершенствование имеющихся излучателей. Поскольку, как правило, определяющим для инвесторов является соотношение между достигаемым (планируемым) суммарным положительным эффектом и соответствующими затратами, то пристальное внимание уделяется, в первую очередь, основным параметрам излучателей, среди которых коэффициент полезного действия, выходная мощность излучения. Очевидно, что при прочих равных параметрах эти две взаимосвязанные характеристики определяют конкурентоспособность изделия.

Однако будущему инженеру наверняка должно быть известно, что даже с учетом современного развития лазерной техники для увеличения к.п.д., выходной мощности лазера применения только технических решений сегодня уже, как правило, недостаточно. Наиболее эффективный путь при

решении подобной задачи состоит в сочетании конструкторских разработок и фундаментальных физических свойств среды. Первые могут “намекать” на наличие неизученных процессов, в то время как вторые “подсказывают” конкретные способы решения. При прогнозном анализе можно утверждать, что если в лазерном кристалле какие-либо физические процессы изучены недостаточно, то всегда существует отличная от нуля вероятность их использования в качестве ресурса для улучшения заданных технических параметров устройств.

Проследим указанную взаимосвязь *физика—техника* на примере полупроводникового излучателя на кристалле CdS, возбуждаемого электронным пучком через щелевую диафрагму, соблюдая при этом хронологию этапов исследований.

Изучая зависимость мощности суперлюминесценции и лазерной генерации в пластинах сульфида кадмия, вырезанных из слитка вдоль оптической оси, авторы [1] обнаружили зависимость выходной мощности излучателей от расположения щелевой диафрагмы. Выходная мощность примерно вдвое возростала, когда коллинеарную относительно оси c ориентацию полосковой области возбуждения заменяли на ортогональную. Такой эффект был получен как при продольном, так и поперечном способе возбуждения. Поскольку другие условия эксперимента не изменялись, то энергетический выигрыш очевиден.

Очевидно и другое: чтобы полезный эффект использовать на практике не просто механически, а осмысленно, уметь прогнозировать ожидаемые результаты для других кристаллов и т.п. необходимо раскрыть его физическую природу. Такая попытка предпринята в [1]. Однако здесь мы не будем останавливаться на анализе предложенного объяснения. Отметим только, что комбинированная гипотеза [1] сводится к представлению кристаллической пластины в виде квадратной микрофонной мембраны, вибрирующей, вследствие воздействия электронного пучка, около положения равновесия для обеспечения в образце механических напряжений и соответствующего неоднородного уширения полосы усиления. Неадекватность модели эксперименту легко устанавливается и потому естественно, что в количественных оценках [1] “ориентационная” анизотропия мощности суперлюминесценции и генерации отсутствует.

Иная попытка реализована в [2], где для объяснения обсуждаемой анизотропии мощности генерации предложена физическая модель, основанная на фундаментальном свойстве кристаллов, известном как фокусировка фононов [3,4]. Само по себе явление фокусировки фононов обусловле-

но анизотропией упругих свойств кристаллов. В случае пьезоэлектриков, каковым является сульфид кадмия, дополнительный вклад обуславливается анизотропией пьезоэлектрических свойств. На первый взгляд, казалось бы, к лазерной генерации фокусировка фононов отношения не имеет, поскольку суть явления, вкратце, состоит в следующем.

Если кристалл подвергается какому-либо воздействию от, например, точечного источника, то, как отклик на это воздействие, в нем возбуждаются акустические волны. Вследствие наличия пьезоупругой анизотропии соответствующие волновые поверхности не являются сферами, и вектора групповых скоростей акустических волн не коллинеарны волновым векторам. Эта неколлинеарность приводит к тому, что в телесных углах, охватывающих окрестности определенных кристалло-графических направлений, плотность векторов групповых скоростей оказывается больше, чем в соседних направлениях. Указанное превышение характеризуется коэффициентом фокусировки, численное значение которого может на порядки превышать единицу.

Однако, как показано в [2], связь этого физического явления с мощностью генерируемого излучения (суперлюминесценции)—технической характеристикой устройства, —может быть легко установлена, если рассматривать процесс лазерной генерации в общем виде на основе закона сохранения энергии.

Действительно, распространение упругих волн в любой среде связано с переносом энергии [5]. Следовательно, если абстрагироваться от различного рода утечек, имеющих “технический” характер, то потери энергии, запасенной в объеме активной среды в результате накачки, должны быть связаны с распространением акустических волн из активной в пассивную область кристалла. Поскольку же вследствие явления фокусировки распространение акустических волн анизотропно, то и распределение связанных с ними энергетических потерь также анизотропно.

Учет анизотропии энергетических потерь, выполненный в [2] на основе данных по фокусировке фононов в CdS [4] для экспериментальных условий [1], обеспечивает соответствие численных значений параметра анизотропии мощности как генерации, так и суперлюминесценции с экспериментальными для обоих способов возбуждения, а значит и возможность предсказания мощностных характеристик излучателей с полосковой областью возбуждения при различных видах накачки.

Таким образом, рассмотренный пример показывает, что “поведение” технической характеристики может быть прогнозировано путем числен-

ных расчетов анизотропии концентрирования энергии, переносимой акустическими волнами в материале активной среды. Такого рода взаимосвязь между элементами технической и фундаментальной физики, очевидная на современном этапе, и в дальнейшем будет усиливаться. Эта тенденция, как видно из выше изложенного примера, стимулирует необходимость сочетания технической подготовки будущих инженеров, исследователей с подготовкой фундаментальной, свойственной, как правило, университетам. Естественный выход в реализации подобного рода задач лежит на пути создания технических университетов—симбиозов технических и фундаментальных знаний. Можно полагать, что и проводимая конференция вносит определенный вклад в решение этой проблемы.

Литература

1. М.М.Зверев, А.В.Кутковой, В.К.Якушин. Квантовая электроника, 1996, т. 23, N 4, с. 295-298.
2. В.В.Зубрицкий. В кн.: Труды III конф. по лазерной физике и спектроскопии. - Минск: ИФ НАНБ, 1997. -с. 267-269.
3. В.Taylor, H.J.Maris, C.Elbaum. Phys. Rev. B, 1971, vol. 3, no. 4, p. 1462-1472, J.P.Wolfe. Physics Today, 1995, vol. 48, no. 9, p. 34-40.
4. В.В.Зубрицкий. ФТГ, 1996, т. 38, N 1, с. 56-62.
5. Ф.И.Федоров. Теория упругих волн в кристаллах.-М.: Наука, 1965. —387 с.

УЧЕТ ПОПРАВКИ НА СДВИГ ПРИ РАСЧЕТЕ ЧАСТОТ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Холодарь Б.Г.

Брестский политехнический институт

Расчет собственных частот поперечных колебаний валов, критических частот вращения роторов турбин с расположенными на них дисками является одним из наиболее ответственных моментов их проектирования.

Эти расчеты базируются на технической теории изгиба стержней, которая для участка стержня одинакового сечения дает уравнение [1]:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho F \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

где E - модуль упругости материала стержня, ρ - его плотность, J, F - момент инерции и площадь поперечного сечения, y - прогиб стержня, x - продольная координата сечения стержня, t - время.

Уточнение расчетов может быть произведено путем учета влияния деформаций сдвига и инерции вращения сечений стержня, что приводит к более сложному уравнению (уравнение С.П.Тимошенко) [1,2]:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - \rho J \left(1 + \frac{E}{\kappa G}\right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \rho F \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\rho^2 J}{\kappa G} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0$$

где G - модуль сдвига, κ - коэффициент формы сечения, зависящий от характера распределения сдвигов по сечению и способа определения среднего значения для угла сдвига. Далее κ определено по формуле

$$1/\kappa = \frac{F}{J^2} \int \left(\frac{S}{b}\right)^2 dF,$$

где $S = S(z)$ и $b = b(z)$ - соответственно статический момент и ширина сечения на высоте z над нейтральной линией.

Частота поперечных колебаний, даваемая уточненной теорией, приближенно может быть представлена как [2]

$$p_m = p_{0m} \left(1 - 0.5 \frac{\pi r^2}{\lambda_m^2} \left(1 + \frac{E}{\kappa G}\right)\right) \quad m=1,2,3,\dots$$

где p_0 - частота, найденная по технической теории, $r^2 = J/F$ - радиус инерции сечения, $\lambda_m = l/m$ - длина полуволны. Из формулы видно, что поправка к расчету по технической теории на первых частотах невелика, но быстро нарастает с уменьшением длины волны, поэтому для валов роторов, где междисковые промежутки по длине вала невелики, ее учет становится необходимым. В большей степени это сказывается на полых валах, где роль касательных напряжений в деформированном состоянии материала более значительна. Роль поправки возрастает также для многоопорных валов.

На рис.1 показана разность логарифмов частот, определенных для шарнирно-опертого и консольного стержней по технической теории и по уточненной теории при $\kappa = 0.9$ (сплошной вал) и $\kappa = 0.67$ (для вала с от-

ношением диаметров $u = d_{\text{внутр}} / d_{\text{наруж}} = 0.9$. Для шарнирного крепления построенные кривые относятся к стержням любой длины, для консольных разной длины точки не ложатся на общую кривую (здесь построение относится к стержню длиной 1000 мм с наружным диаметром 100 мм и внутренним 90 мм).

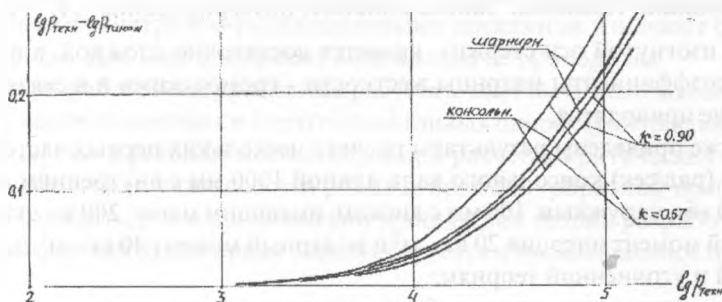


Рис. 1

Особый интерес представляет рассмотрение вопроса для валов, несущих диски, так как здесь картина поперечных колебаний осложняется наличием гироскопических эффектов дисков.

Расчет частот колебаний валов переменного сечения при наличии нескольких опор выполняется обычно методом начальных параметров, который сводит задачу к перемножению матриц и определению корней характеристического многочлена. На каждом участке вала матрицы записываются в виде произведения матрицы конечных сосредоточенных нагрузок M и матрицы жесткости C , имеющих размеры 4×4 .

Матрица M учитывает массово-инерционные характеристики дисков и жесткости податливых опор на конце участка. Если вал рассматривать как невесомый, учитывая его вес в весе дисков, то отличие от задачи, построенной на использовании технической теории, сводится к изменению коэффициентов C_{14} и C_{24} матрицы жесткости C . В случае же, когда вес вала принимается распределенным по длине стержня, изменяются все коэффициенты матрицы C . При этом задача существенно усложняется, так как в отличие от технической теории, где все члены матрицы C выражаются через функции Крылова, в данном случае характеристическое урав-

нение для участка стержня имеет два корня (α и β), и поэтому форма прогиба описывается двухчастотной функцией вида

$$y = A_1 ch(\alpha x) + A_2 sh(\alpha x) + A_3 \cos(\beta x) + A_4 \sin(\beta x),$$

которая уже не обладают теми свойствами, что составляют достоинства функций Крылова. Запись констант интегрирования $A_1 - A_4$ уравнения изогнутой оси стержня является достаточно сложной, а получаемые коэффициенты матрицы жесткости - громоздкими и в связи с этим здесь не приводятся.

Ниже приведены результаты расчета нескольких первых частот колебаний (рад/сек) консольного вала длиной 1000 мм с внутренним диаметром 90 мм, наружным 100 мм с диском, имеющим массу 200 кг, экваториальный момент инерции $20 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и полярный момент $40 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ по технической и уточненной теориям:

Здесь первых две строки таблицы соответствуют частотам невесомого

| Собственные частоты | Критические частоты | | | |
|----------------------------------|---------------------|----------|----------------------|----------|
| | (прямая прецессия) | | (обратная прецессия) | |
| 63.92 / 289.30 / | 79.84 / --- | | 53.44 / 199.77 / | |
| 63.58 / 63.60 289.95 / 286.90 | 79.15 / | 79.18 | 53.26 / | 53.27 |
| 3838.15 / 3740.94 | --- | | 198.14 / | 98.15 |
| 10526.57 / 9642.87 | 3820.57 / | 3723.35 | 3832.27 / | 735.05 |
| 20612.73 / 17437.75 | 10520.16 / | 9636.42 | 10524.42 / | 9640.72 |
| 34059.33 / 26381.80 | 20609.46 / | 17434.40 | 20611.64 / | 17436.64 |
| 50868.21 / 36015.23 | 34057.35 / | 26379.71 | 34058.67 / | 26381.10 |
| | 50866.89 / | 36013.78 | 50867.77 / | 36014.74 |

вала, найденные по технической теории. На следующих строках приведены данные для вала с плотностью 7800 кг/м^3 , причем первым числом идет полученное по технической теории, а через знак разделителя - по уточненной.

По результатам расчета можно сделать следующие выводы:

- 1) В критических режимах как техническая, так и уточненная теории

всегда дают частоты, соответствующие формам колебаний стержня, ниже, чем соответствующие собственные;

2) Уточненная теория во всех рассмотренных режимах по сравнению с технической теорией понижает частоты, соответствующие стержневым формам колебаний (причем это понижение следует графикам на рис. 1) и практически не изменяет дисковые частоты, несколько их повышая.

Расчеты и анализ, проведенные для шарнирно-опертого вала с двумя и четырьмя симметрично-расположенными дисками не изменяют сделанные выводы. Для многоопорного вала анализ не проводился.

Сама разработанная программа расчета может быть использована для расчета валов на жестких и упруго-податливых опорах (учитываются как линейные, так и угловые жесткости), а при расчетах критических частот вращения роторов учитываются режимы прямой и обратной прецессии. Можно отметить, что в приближении технической теории разработанная программа в настоящее время эксплуатируется в промышленности.

Литература

1. Вибрации в технике. Справочник в 6-и томах. Т.1. Колебания линейных систем. Под ред. В.В.Болотина. М.: Машиностроение, 1978, -352с.
2. С.П.Тимошенко. Колебания в инженерном деле. М.: Наука, 1967, -444с.

РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

*Крушевский А.Е., Кондратюк В.Ф., Севенюк А.З.
Брестский политехнический институт*

В статье на основе методов аналитической механики строится решение задачи о равновесии упругого прямоугольника, упругого конечного цилиндра при заданных на контуре и поверхности напряжениях.

Краевые условия рассматриваются как уравнения связей, решаемых совместно с вариационными уравнениями, согласно принципа Лагранжа.

В качестве примеров в точной постановке рассмотрены: 1) сжатие упругого квадрата двумя сосредоточенными силами; 2) сжатие упругого конечного цилиндра двумя сосредоточенными силами, действующего вдоль оси цилиндра; 3) вращение упругого конечного цилиндра с посто-

янной угловой скоростью.

Известное решение примера для цилиндра получается при $\frac{R}{h} \rightarrow 0$.

Получаемые при решении функциональные уравнения на основе рядов Фурье-Бесселя решались методом последовательных приближений.

Применение стандартных степеней рядов позволило получить решение целого ряда других практической задач, важных в машиностроении.

Применение стандартных степеней рядов позволило получить решение ряда практических задач корпусных деталей прессов, несущих конструкций крупногабаритных приборов и т.д.

Отличительная особенность подхода определена, во-первых, использованием принципов классической механики. Предпочтительнее использовать принцип Лагранжа — основу метода перемещений, так как упро-

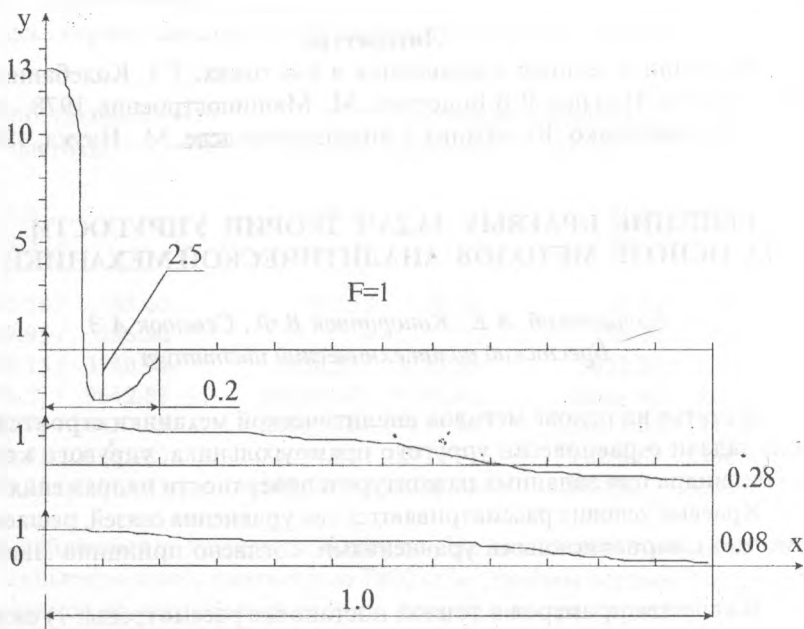


Рис. 1. Эпюры напряжений σ_x при практически точном выполнении граничных условий

щается процедура выбора аппроксимирующих функций. Во-вторых, привлечение связей не требует от самих координатных функций выполнения внутренних и поверхностных условий. Разбиение конструкции на отдельные элементы связано только с условием задачи (выделение особенностей задачи и т.д.), но не является необходимым.

В качестве примера рассмотрим растяжение квадрата двумя сосредоточенными силами (плоская деформация). Для выделения особенности в окрестности приложения силы (с учетом симметрии задачи) фигуру представляем в виде двух квадратов: 1×1 и $0,2 \times 0,2$ (с вырезом).

Привлекая поверхностные статические связи, гарантируем точное выполнение граничных условий, за исключением локальной области вблизи приложения силы (рис. 1).

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМОТРОНОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА С МЭВ В ПРОЦЕССАХ ОСАЖДЕНИЯ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК

*Каролинский В.Г., Сазонов М.И.
Брестский политехнический институт*

Потенциальные возможности использования алмазных пленок в различных областях науки и техники базируются на уникальных свойствах алмаза: высокая теплопроводность (~ 20 Вт/см·К), высокое напряжение пробоя ($\sim 10^7$ В/см), высокая твердость по сравнению с известными материалами ($10000-12000$ кг/мм² по Виккерсу), низкий коэффициент трения (~ 0.02) и т.д.

В силу уникальных свойств алмазных (углеродных) пленок они стали широко применяться в таких областях науки и техники, как микроэлектроника и машиностроение, оптоэлектроника и аэрокосмическая промышленность.

В машиностроении алмазные пленки в основном используются для увеличения износостойкости различного инструмента и пар трения.

Поскольку алмазные пленки имеют большую теплопроводность, они могут с успехом применяться для поглощения и отвода тепла с большой площади. По причине относительно большой ширины запрещенной зоны, высокой теплопроводности и химической инертности алмазные пленки можно использовать в производстве полупроводниковых приборов, их компонентов и т.д.

Согласно выводам, сделанным в работе [1], алмазные пленки найдут широкое применение в микроэлектронике и оптике, если технология их получения из газовой фазы (CVD-метод) может обеспечить следующие условия осаждения: 1) скорость роста покрытия >100 мкм/ч, 2) температура подложки $<500^\circ\text{C}$, 3) площадь подложки, на которой равномерно осаждается пленка, должна быть >10 см², 4) пленки не должны иметь загрязнения материалами стенок реактора, электродов и т.д.

Существует целый ряд CVD-технологий, позволяющих получать алмазные пленки на различных подложках, например, метод накаливаемых нитей, разряд постоянного тока, химическое осаждение из паровой фазы с использованием плазмы высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) разрядов, метод интенсификации СВЧ-разряда электронноциклотронным резонансом.

Наиболее производительным и адаптируемым к вышеперечисленным требованиям из перечисленных CVD-методов являются ВЧ и СВЧ-разряды. Однако, эти методы обладают, на наш взгляд, существенным недостатком: высокой стоимостью установки и ограниченной мощностью. Последнее не позволяет достичь высокой скорости покрытия подложек при площади их поверхности ~ 10 см².

Для реализации требований, сформулированных в работе [1], мы предлагаем вакуумную установку (см. рис. 1) с высокоэнтальпийным плазмотроном постоянного тока, позволяющую осаждать алмазные пленки при давлении в реакторе $(2\div 8)\cdot 10^3$ Па.

Одним из основных элементов установки является плазмотрон постоянного тока с межэлектродной вставкой (МЭВ), позволяющий генерировать сверхзвуковую плазменную струю, в которую вводятся различные химические реагенты (H_2 , CH_4 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, CH_3OH и т.д.). Ввод химических реагентов можно производить как посредством кольца 4 с отверстиями, которое охватывает плазменную струю, так и непосредственно в канал плазмотрона через штуцер 3. Данный плазмотрон позволяет получить высокоэнтальпийную струю мощностью 5-30 кВт. В конструкции плазмотрона предусмотрена возможность оперативной замены электродов, изготавливаемых из различных материалов (вольфрам, хром, плагина, графит и т.д.). Установка позволяет варьировать давление газа в реакторе в диапазоне $2\cdot 10^3\div 8\cdot 10^3$ Па, что оказывает существенное влияние на регулирование скорости роста пленок.

Изменяя конструкцию анода, диаметр разрядной камеры плазмотро-

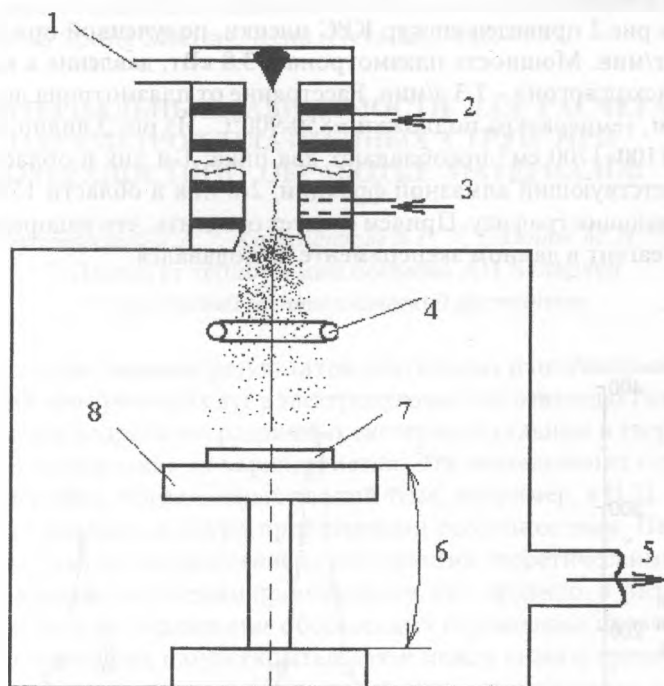


Рис. 1. Принципиальная схема плазменной установки пониженного давления с плазмотроном с МЭВ для осаждения углеродных пленок:

1 – подача рабочего газа в плазмотрон, 2 – подача газа между секциями

МЭВ для защиты, 3 – подача химических реагентов, 4 – кольцо,

5 – насос, 6 – регулируемое расстояние, 7 – подложка,

8 – подложкодержатель.

на и давление газа в реакторе, можно регулировать площадь зоны осаждения пленок.

На рис.2 приведен спектр КРС пленки, полученной при расходе CH_4 0.107 г/мин. Мощность плазмотрона – 3.8 кВт, давление в камере - $6 \cdot 10^3$ Па, расход аргона – 7.3 л/мин. Расстояние от плазмотрона до подложки – 160 мм, температура подложки ~850-900°C. Из рис.2 видно, что в диапазоне $1100 \div 1700 \text{ см}^{-1}$ преобладают два пика, 1-й пик в области 1332 см^{-1} , соответствующий алмазной фракции, 2-й пик в области 1580 см^{-1} , соответствующий графиту. Причем следует отметить, что водород как отдельный реагент в данном эксперименте не подавался.

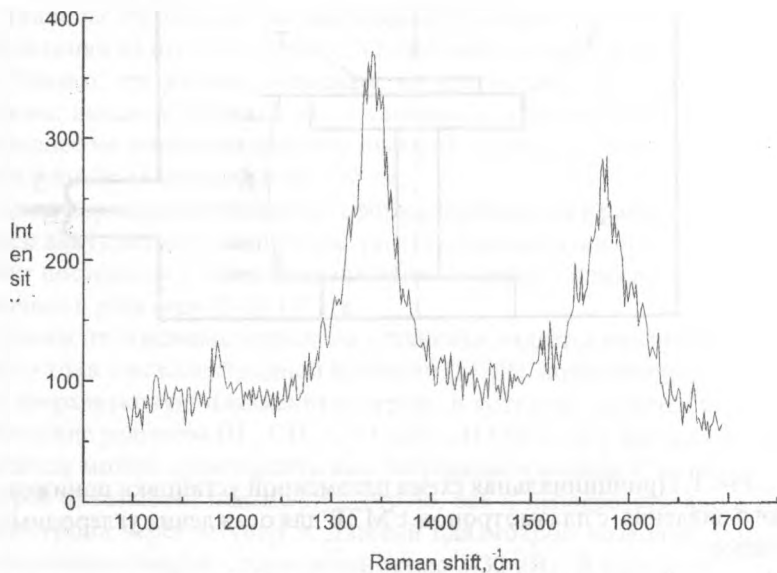


Рис.2. Спектр КРС пленки.

В настоящее время проводятся исследования по осаждению пленок и изучению их свойств в зависимости от параметров работы установки.

Литература

1. Bachmann P. et al. // Ext. Abstracts-Diamond and Diamond like Materials Synthesis. MRS Spring Meeting, Reno (Nevada), 1988. P. 99.

**КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА
ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ ПРИ
ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ**

Бублиевский Д.А.^{)}, Каролинский В.Г.^{**)}, Сазонов М.И.^{**)}*

^{)} Институт тепло- и массообмена АН Беларуси*

*^{**) Брестский политехнический институт}*

Одним из существенных результатов длительных и целенаправленных исследований электрических дуг в электродуговых нагревателях газа (плазмотронах) стала разработка различных экспериментальных и теоретических методов определения их характеристик. Эти исследования отражены в ряде монографий, посвященных данной теме, например, в [1,2]. Подобные работы отличаются двумя проблемными особенностями. Первая из них связана с тем, что определение характеристик теоретическими, в частности, численными методами производится, как правило, в физических переменных, хотя использование обобщенных переменных позволяет сократить их количество, найти скрытые связи между ними и привести расчеты в определенную систему. Существует лишь эмпирическое решение этого вопроса, требующее большого числа экспериментальных данных. Вторая особенность заключается в отсутствии комплексного подхода, направленного на установление взаимосвязи между параметрами плазменных струй и потоков, с одной стороны, и характеристиками дуги, с другой.

Некоторые предложения по решению затронутой проблемы в случае сильноточных малорасходных электрических дуг рассмотрены ниже.

В работе [3] разработана так называемая анизотропная модель электрической дуги в канале, позволившая аналитическим путем получить критериальные выражения для расчета ее характеристик. Она основана на использовании степенной аппроксимации зависимости электропроводности σ от приращения "потенциала" теплопроводности ΔS с различными показателями степеней для продольной и поперечной составляющих этого приращения, появляющихся при разделении переменных. Допускается $C_p/\lambda = \text{const}$, $\rho V_z = \text{const}$.

Поле "потенциала" теплопроводности в электропроводной зоне согласно [3] описывается критериальным выражением

$$\Delta \bar{S}_1(\bar{r}, \bar{z}) = \left\{ \frac{Po}{10,6k_0 \bar{r}_*^2 (1 + 0,17K_0 \bar{r}_*^2)} \times \left[1 - \exp \left(- \frac{5,78(n_0 + 1)(1 + 0,17K_0 \bar{r}_*^2)}{Pe \bar{r}_*^2} \bar{z} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{n_0 + 1}} J_0 \left(\mu_1 \frac{\bar{r}}{\bar{r}_*} \right) \quad (1)$$

Радиус электропроводной зоны определяется из неявного трансцендентного уравнения.

Частные случаи $\bar{z}/Pe \bar{r}_*^2 \rightarrow \infty$, $\alpha_*^2 \bar{z}/Pe \rightarrow \infty$ (асимптотическая область) и $\bar{z}/Pe \bar{r}_*^2 \ll 1$, $\alpha_*^2 \bar{z}/Pe \ll 1$ (начальная область) рассмотрены в [4-6]. В предельном случае $\bar{z}/Pe \bar{r}_*^2 \rightarrow \infty$, $\alpha_*^2 \bar{z}/Pe \rightarrow \infty$ радиус электропроводной зоны определяется по формуле [4]

$$\bar{r}_* = \exp \left[-0,8K_0 \left(\frac{Po}{10,6k_0 \bar{r}_*^2 (1 + 0,17K_0 \bar{r}_*^2)} \right)^{\frac{1}{n_0 + 1}} \right] \quad (2)$$

Рассмотрим подробнее переходную область. Полученные в [3] общие расчетные зависимости применительно к данной области можно упростить. Для этого принимаем, что радиус электропроводной зоны здесь не зависит от \bar{z} и равен радиусу дуги в асимптотической области согласно (2). Еще более простая ситуация возникает, если этот радиус в нулевом приближении принять равным единице, что имеет место при больших значениях Po . На выходе из канала дуга занимает практически все сечение и осредненный "потенциал" можно определять, к примеру, по несколько видоизмененной формуле (1), не учитывая вклад неэлектропроводной зоны.

При решении задач в области струйного течения принимаются те же упрощения и допущения, которые использовались в дуговой области. Кроме того, в отличие от предыдущего, пренебрегается излучением и рассматривается плоская струя. Естественно, отсутствует источник джоулевого тепловыделения. Тогда уравнение энергии для струи будет иметь достаточно простой вид

$$\frac{\partial \Delta \bar{S}}{\partial \bar{z}} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial \Delta \bar{S}}{\partial \bar{x}^2} \quad (3)$$

Оно аналогично рассматриваемым в [5] уравнениям теплопроводности при решении задач для полубесконечных твердых тел. Подобная аналогия используется в [7] при расчете газовых факелов методом эквивалентной задачи теплопроводности.

Решение (3) при условиях

$$\overline{\Delta S}(0, \bar{x}) = \begin{cases} \overline{\Delta S}_L = \text{const} & \text{при } 0 \leq \bar{x} \leq 1, \\ 0 & \text{при } 1 \leq \bar{x} \leq \infty \end{cases} \quad (4)$$

можно записать в форме [7,8]

$$\overline{\Delta S} = \frac{\overline{\Delta S}_L}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{\bar{x}+1}{2\sqrt{\frac{z}{\text{Pe}}}} - \operatorname{erf} \frac{\bar{x}-1}{2\sqrt{\frac{z}{\text{Pe}}}} \right) \quad (5)$$

При $\bar{x} = 0$ получим закон изменения $\overline{\Delta S}$ на оси

$$\overline{\Delta S}_{00} = \overline{\Delta S}_L \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{\frac{z}{\text{Pe}}}} \right) \quad (6)$$

Определив $\overline{\Delta S}_L$ из (1), используя то обстоятельство, что при $\bar{r}_* \approx 1$ бесселевым профиле осредненное по радиусу значение $\overline{\Delta S}$ в 2,32 раза меньше $\overline{\Delta S}$ на оси, и подставив его в (6), окончательно получим

$$\overline{\Delta S}_{00} = \frac{1}{2,32} \left\{ \frac{\text{Po}}{10,6k_{\sigma}(1+0,17K_{\sigma})} \times \right. \\ \left. \times \left[1 - \exp \left(- \frac{5,78(n_{\sigma}+1)(1+0,17K_{\sigma})}{\text{Pe}} \bar{L} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{n_{\sigma}+1}} \operatorname{erf} \left(\frac{1}{2\sqrt{\frac{z}{\text{Pe}}}} \right) \quad (7)$$

Такую же подстановку можно сделать и в (5).

Таким образом, в результате данного исследования предложена аналитическая методика расчета полей температуры плазменных струй, используемых в технологиях поверхностной обработки материалов. Методика основана на модельных представлениях, позволяющих связать параметры струи с характеристиками сильноточных малорасходных электрических дуг в плазматронах. Расчетные зависимости получены в критериальном виде.

Обозначения

C_p - изобарная теплоемкость; σ - электропроводность; λ - теплопроводность; γ - плотность; V - скорость; G - расход газа; T - температура; E - напряженность электрического поля; I - сила тока; r, z, x - радиальная, продольная и поперечная координаты; R - радиус канала; Q - плотность объемного излучения;

$S = \int_0^r \lambda dT$ - "потенциал" теплопроводности; $\bar{r} = r/R$; $\bar{z} = z/R$; $\bar{x} = x/R$; $\bar{L} = L/R$;

$\Delta S = S - S_*$; $\overline{\Delta S} = \Delta S / \Delta S_0$; J_0 - функция Бесселя; $Pe = P/R^2 s_0 \Delta S_0$ - критерий Помранцева; $Pe = GC_{p0} / \pi R \lambda_0$ - модифицированный критерий Пекле; $K_Q = Q_0 R^2 / \Delta S_0$ - критерий излучения; $K_S = -\Delta S I / \Delta S_0$ - параметрический критерий; ns, ks - постоянные; μ_1, α_n - корни характеристических уравнений. Индексы: * - граница электропроводной зоны; 0 - определяющее значение; 00 - осевое значение; I - электропроводная зона, z - осевая составляющая; L - относится к выходному сечению электрода.

Литература

1. Жуков М.Ф., Смоляков В.Я., Урюков Б.А. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны). - М.: Наука, 1973. - 232 с.
2. Теория термической электродуговой плазмы. Ч.1. Методы математического исследования плазмы / Жуков М.Ф., Урюков Б.А., Энгельшт В.С. и др. - Новосибирск: Наука, 1987. - 288 с.
3. Бублиевский А.Ф. Анизотропная модель излучающей электрической дуги // ИФЖ. - 1995. - Т.68, №5. - С. 820-826.

ОПЕРАТОРНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛН В СТЕРЖНЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ В ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Акимов В.А., Прусова А.В.

Белорусская государственная политехническая академия

Наличие граничных поверхностей даже одного семейства (упругий слой) оказывает значительное влияние на структуру волнового поля. Если граничные поверхности принадлежат разным семействам, то картина распространения волн существенно усложняется. Простейшим примером та-

кого вида областей является бесконечно длинный прямоугольный параллелепипед $|x| < \infty$, $|y| \leq b$, $|z| \leq h$.

В [1] изложен и систематизирован операторный подход к изучению особенностей распространения волн в упругом изотропном слое $|x| < \infty$, $|y| < \infty$, $|z| \leq h$.

Применяя принцип суперпозиций Ламе обобщим решение для слоя на случай бесконечной прямоугольной призмы. Введем соответствующие [1] операторы для первой основной задачи теории упругости:

$$\Phi_{ij}(\mu, \lambda) = \frac{\Delta_{\mu} + \Delta_{2\mu} \cos \mu \sqrt{\Delta_{i\mu}}}{\sqrt{\Delta_{i\mu}} \sin \lambda \sqrt{\Delta_{i\mu}}} - 2\sqrt{\Delta_{j\mu}} \frac{\cos \mu \sqrt{\Delta_{j\mu}}}{\sin \lambda \sqrt{\Delta_{j\mu}}}$$

$$G_{ij}(\mu, \lambda) = 2\Delta_{\mu} \frac{\sin \mu \sqrt{\Delta_{i\mu}}}{\sin \lambda \sqrt{\Delta_{i\mu}}} - (\Delta_{\mu} + \Delta_{2\mu}) \frac{\sin \mu \sqrt{\Delta_{j\mu}}}{\sin \lambda \sqrt{\Delta_{j\mu}}}$$

где в декартовой системе координат

$$\Delta_{\mu} = \partial_x^2 + \partial_y^2 + \partial_z^2 - \partial_{\mu}^2, \quad \partial_x = \frac{\partial}{\partial x}, \quad \partial_y = \frac{\partial}{\partial y}, \quad \partial_z = \frac{\partial}{\partial z}, \quad \Delta_{i\mu} = \Delta_{\mu} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$$

$$\Delta_{2\mu} = \Delta_{\mu} - \frac{1}{C_2^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}, \quad C_1 \text{ и } C_2 - \text{ скорости продольных и поперечных волн}$$

соответственно; $i, j=1, 2$; $\mu = y, z$. В результате получим:

$$\begin{aligned} U &= \partial_z [\Phi_{12}(z, h) \cdot f_1(x, y, t) + G_{12}(z, h) \cdot g_1(x, y, t) + \Phi_{12}(y, b) \cdot f_2(x, z, t) + G_{12}(y, b) \cdot g_2(x, z, t)] \\ V &= \partial_y [\Phi_{12}(z, h) \cdot f_1(x, y, t) + G_{12}(z, h) \cdot g_1(x, y, t) + \Phi_{12}(y, b) \cdot f_2(x, z, t) + G_{12}(y, b) \cdot g_2(x, z, t)] \\ W &= G_{21}(z, h) \cdot f_1(x, y, t) - \Delta_{\mu} \cdot \Phi_{21}(z, h) \cdot g_1(x, y, t) + G_{21}(y, b) \cdot f_2(x, z, t) - \Delta_{\mu} \cdot \Phi_{21}(y, b) \cdot g_2(x, y, t) \end{aligned}$$

Построенное таким образом решение тождественно удовлетворяет динамическим уравнениям внутри призмы. Граничные условия на поверхностях $y = \pm b$, $z = \pm h$ удовлетворяются за счет выбора операторных коэффициентов в $\Phi_{ij}(\mu, \lambda)$, $G_{ij}(\mu, \lambda)$ и четырех произвольных аналитических функций от двух поперечных координат параллелепипеда и времени. Характерной особенностью полученного таким образом решения является

наличие операторов бесконечно высокого порядка, содержащих в качестве аргументов произведения поперечных координат на квадратные корни из продольных операторов Да-ламбера.

Литература

1. Акимов В. А. Операторный метод решения задач теории упругости: Дис. канд. физ.-мат. наук. -Минск, 1992, 137с.

ЗАДАЧА О СМАЗКЕ ДЛИННОГО РАДИАЛЬНОГО ПОРИСТОГО ПОДШИПНИКА ПЕРЕМЕННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Грекова А. В., Чигарев А. В.

Белорусская государственная политехническая академия Минск

Пористый подшипник аналогичен обычному подшипнику скольжения за исключением дополнительного количества смазки, которое компенсирует потерю из смазочного слоя при эксплуатации. Давление, возникающее в пленке смазки, уравнивает нагрузку на подшипник. Правда, надежная работа возможна лишь при легких режимах нагружения. Подача жидкости в зазор через пористый материал происходит под давлением.

Пористые подшипники исследовались многими авторами, большинство из них описывали движение жидкости в пленке смазки уравнением

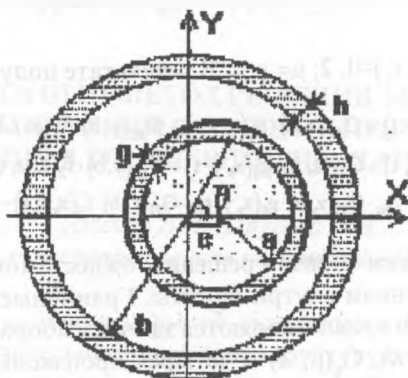


Рис.1 Схема сечения подшипника

Рейнольдса. Но было предложено также исходить непосредственно из уравнений Стокса и уравнения неразрывности.

В данной работе рассматривается эксцентричный неподвижный длинный пористый радиальный подшипник и вал с пористым внешним слоем, вращающийся вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью ω . Оси подшипника и вала параллельны. Смазка - вязкая несжимаемая жидкость - полностью заполняет пространство между подшипником и валом.

Проницаемость пористого материала подшипника - функция полярного радиуса. Пористый слой вала имеет постоянную проницаемость.

Введем безразмерные переменные (\sim):

$$\tilde{r} = \frac{r}{b}, \quad \tilde{V} = \frac{V}{a\omega}, \quad \gamma = \frac{g}{b}, \quad \alpha = \frac{a}{b}, \quad \beta = \frac{h}{b} + 1$$

$$\tilde{P} = \frac{p(b-a)^2}{\mu\omega ab} \quad \text{- давление в смазочном слое}$$

$$\tilde{P}_1 = \frac{p_1(b-a)^2}{\mu\omega ab} \quad \text{- давление в пористом подшипнике}$$

$$\tilde{P}_2 = \frac{p_2(b-a)^2}{\mu\omega ab} \quad \text{- давление в пористом слое вала.}$$

$$k_1 = \frac{k(r)b}{(b-a)^3}, \quad k(r) = k_{10} r^n \quad \text{- проницаемость подшипника.}$$

$$k_2 = \frac{k_{20}b}{(b-a)^3} \quad k_{20} \text{ - проницаемость пористого слоя вала}$$

$$\varepsilon = \frac{e}{a} \quad \text{e - эксцентриситет подшипника.}$$

В дальнейшем ~ будем опускать.

Задача решается при следующих допущениях:

-давление на внешней поверхности подшипника определяется законом подачи смазки;

-на границах сред функция давления непрерывна;

-жидкость не скользит по пористым поверхностям, нориальные компоненты скорости жидкости определяются законом Д'Арси;

-на поверхности твердой части вала выполняется условие непроницаемости;

-течение жидкости в пористых слоях определяется законом Д'Арси.

Для описания движения жидкости в смазочном слое используем уравнения Стокса (для упрощения задачи пренебрегаем некоторыми членами) и уравнение неразрывности в полярных координатах (задача двумерная):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{u}{r^2} = \frac{1}{(1-\alpha)^2} \frac{\partial p}{\partial r}$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v}{r^2} = \frac{1}{(1-\alpha)^2} \frac{\partial p}{\partial \theta} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r} = 0$$

$$u = V_r, \quad v = V_\theta$$

Давление в пористых слоях:

$$\frac{\partial(k_1(r)r \frac{\partial p_1}{\partial r})}{\partial r} + \frac{k_1(r)}{r} \frac{\partial^2 p_1}{\partial \theta^2} = 0, \quad \nabla^2 p_2 = 0 \quad (2)$$

Задача сводится к совместном решению (1) и (2) при следующих граничных условиях:

1. На поверхности твердой части шипа

$$\frac{\partial p_2}{\partial r} = 0, \quad r = \alpha(\epsilon \cos \theta + \sqrt{1 - \epsilon^2 \sin^2 \theta}) \quad (3.1)$$

2. На границе пористого подшипника и смазочного слоя

$$u = -\kappa_1(1-\alpha) \frac{\partial P_1}{\partial r}, \quad v = 0, \quad p = P_1, \quad r = 1 \quad (3.2)$$

3. На границе пористой части вала и смазочного слоя

$$u = -\kappa_2(1-\alpha) \frac{\partial P_2}{\partial r}, \quad v = \frac{\alpha + \gamma}{\alpha} \sqrt{1 - \varepsilon^2 \sin^2 \theta}, \quad p = P_2,$$

$$r = (\alpha + \gamma) \left(\varepsilon \cos \theta + \sqrt{1 - \varepsilon^2 \sin^2 \theta} \right) \quad (3.3)$$

4. На внешней поверхности подшипника

$$P_i = P_0 \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \right) \quad r = \beta \quad (3.4)$$

ε - малый параметр. Решение ищем в виде рядов по степеням малого параметра,

$$P_i = P_{i0}(r) + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n P_{in}(r, \theta), \quad i = 1, 2 \quad p = p_0(r) + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n p_n(r, \theta),$$

$$u = u_0(r) + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n u_n(r, \theta) \quad v = v_0(r) + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n v_n(r, \theta)$$

В нулевом приближении получаем:

$$P_0 = P_{10} = P_{20} = P_0 \quad u_0 = 0 \quad v_0 = \frac{(\alpha + \gamma)^2 (1 - r^2)}{\alpha r (1 - (\alpha + \gamma)^2)}$$

Решением системы, полученной для первого приближения, являются

функции:

$$u_1(r, \theta) = \left(\frac{s_1}{r^2} + s_2 \ln r + s_3 r^2 + s_4 \right) \cos(\theta) + \left(\frac{r_1}{r^2} + r_2 \ln r + r_3 r^2 + r_4 \right) \sin(\theta)$$

$$v_1(r, \theta) = \left(-\frac{r_1}{r^2} + r_2 (\ln r + 1) + 3r_3 r^2 + r_4 \right) \cos(\theta) + \left(\frac{s_1}{r^2} - s_2 (\ln r + 1) - 3s_3 r^2 - s_4 \right) \sin(\theta)$$

$$p(r, \theta) = \left(-2(1-\alpha)^2 s_2 \frac{1}{r} + 8(1-\alpha)^2 s_3 r \right) \cos(\theta) + \left(-2(1-\alpha)^2 r_2 \frac{1}{r} + 8(1-\alpha)^2 r_3 r \right) \sin(\theta)$$

$$P_{11}(r, \theta) = \left(c_1 r^{2/(n-\sqrt{n^2+4})} + c_2 r^{(-n+\sqrt{n^2+4})/2} \right) \cos \theta + \\ + \left(c_3 r^{2/(n-\sqrt{n^2+4})} + c_4 r^{(-n+\sqrt{n^2+4})/2} \right) \sin \theta$$

$$P_{21}(r, \theta) = \left(d_1 r + d_2 \frac{1}{r} \right) \cos \theta + \left(d_3 r + d_4 \frac{1}{r} \right) \sin \theta$$

$c_{1,2,3,4}, d_{1,2,3,4}, s_{1,2,3,4}, r_{1,2,3,4}$ определяется из граничных условий для первого приближения.

Получены также основные характеристики подшипника: вектор нагрузки, главный момент, коэффициент трения. Определены их зависимости от геометрических характеристик подшипника и вала, а также от пористости пористых тел.

Литература

1. А.К. Никитин и др. Гидродинамическая теория смазки и расчет подшипников скольжения, работающих в стационарном режиме. М.: Наука, 1981

ОБОБЩЕНИЕ МЕТОДИК ПРЕПОДАВАНИЯ КУРСА НАЧЕРТАТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

З.Н. Уласевич

Брестский политехнический институт

В период стремительного роста различной многосторонней информации очевидной становится значимость совершенствования и разработки новых подходов и методов преподавания, что созвучно с современными представлениями об информационных технологиях. В связи с этим представляется схема обобщения методик преподавания важнейших разделов

курса начертательной геометрии.

1. Обратимость чертежа - основная цель и задача курса начертательной геометрии. Изучая курс начертательной геометрии важным является довести до сведения понятие обратимости чертежа, что означает - уметь решать прямую и обратную задачу.

Прямая задача - представить геометрический образ(ГО) в пространстве и по нему на основании известных методов проецирования выполнить чертеж на соответствующих плоскостях проекций.

Обратная задача - по выполненному чертежу воспроизвести заданный геометрический образ в пространстве.

В ортогональных проекциях проецирование осуществляется на две, а при необходимости и на три взаимно перпендикулярные плоскости проекций. Решение прямой и обратной задачи с учетом всех известных геометрических закономерностей возможно применяя и одну плоскость. В проекциях с числовыми отметками, где проецирование осуществляется на одну плоскость нулевого уровня обратимость чертежа достигается при наличии проекции ГО на плоскости нулевого уровня и ее высотной отметки. В аксонометрических проекциях- построением первичной и вторичной проекции ГО. В перспективном изображении положение точки в пространстве либо обратимость чертежа достигается за счет перспективы точки и ее основания.

2. Геометрические образы и их определители. При изучении курса рассматриваются следующие геометрические образы: точка, линия (прямая и кривая), плоскость, поверхность. При этом всегда нужно делать акцент что плоскость, это частный случай поверхности. В изучении и представлении каждого геометрического образа необходимо конкретизировать определитель и параметры. К примеру - точка, абстрактный геометрический образ не имеет параметра формы. Линия - определителем являются две точки, а параметр формы один - длина, т.е. линия относится к однопараметрическому геометрическому образу. Определителем плоскости являются три точки не лежащие на одной прямой и имеет два параметра формы - длину и ширину т.е. относится к двухпараметрическому геометрическому образу. Поверхности - определитель представляет собой совокупность геометрических элементов, что позволяет реализовать закон каркаса поверхности, как в пространстве так и на чертеже. Так как одна и та же поверхность несет на себе сколько угодно непрерывных каркасов (а в проекциях с числовыми отметками, сколько угодно дискретных каркасов), то соответственно и определителей каждая поверхность может иметь

несколько. Однако в практике решения задач, связанных с поверхностями, обычно выбираются каркасы простейших линий и соответствующие их определители. Таким образом, чтобы задать поверхность на чертеже, достаточно сформулировать закон какого-либо непрерывного либо дискретного каркаса этой поверхности и задать на чертеже соответствующий определитель. При конструировании поверхности всегда учитываются требования, которые предъявляются к будущей поверхности, т.е. при этом необходимо знать наперед заданные условия и эти наперед заданные условия являются основой для создания закона каркаса. В инженерной практике к конструируемой поверхности предъявляются некоторые наперед заданные требования, продиктованные соображениями конструктивного, технологического, расчетного, эстетического либо какого-либо другого характера [1]. Итак, поскольку поверхности относятся к многопараметрическим геометрическим образам с определенными наперед заданными требованиями, то эти требования в свою очередь могут быть интерпретированы геометрически, т.е. как позиционные и метрические условия.

3. Расположение геометрических образов между собой и относительно плоскостей проекций. Чтобы подойти и быть готовым к построению алгоритмов решения задач на основании существующих методов начертательной геометрии, на основании разработанных и рекомендованных преподавателем методик, важным моментом в этом является классификация геометрических образов на образы общего и частного положения.

При наличии геометрического образа частного положения значительно упрощается решение задачи. В случае необходимости достижения этой цели имеется очень мощный аппарат - методы преобразования комплексного чертежа. С помощью этого аппарата возможно решение четырех основных задач по преобразованию комплексного чертежа так, чтобы:

- прямая общего положения стала прямой уровня;
- прямая уровня - проецирующей;
- плоскость общего положения стала проецирующей плоскостью;
- проецирующая плоскость - плоскостью уровня.

При формировании алгоритмов решения задач целесообразно разделить их на позиционные и метрические.

4. Группа основных позиционных задач. Группу основных позиционных задач составляют задачи:

- на взаимную принадлежность ГО;
- на взаимное пересечение ГО.

Задачи на взаимную принадлежность геометрических образов, подробно рассматриваются в разделе конструирования и задания поверхностей на комплексном чертеже, так как задача на принадлежность точки той или иной фигуре является задачей-критерием заданности этой поверхности. Поэтому, если необходимо каким либо способом задать поверхность, то это значит что при этом способе задания должен решаться вопрос о принадлежности точки поверхности в прямой и обратной постановке. При этом можно исходить из следующего общеизвестного положения- точка принадлежит поверхности, если она принадлежит некоторой линии этой поверхности.

Задачи на взаимное пересечение геометрических образов:

- задача на пересечение двух линий;
- задача на пересечение линии и поверхности;
- задача на пересечение двух поверхностей. (Здесь необходимо помнить, что под линией понимается прямая и кривая линия, а также что плоскость - частный случай поверхности).

Первая из этих трех задач сводится к следующей - заданы две линии и требуется определить, пересекаются они или нет, Решение задачи основывается на одном из инвариантов операции проецирования, когда точка принадлежащая линии проецируемая в точку, принадлежащую проекции этой линии. Следовательно, две линии пересекаются, если точки пересечения одноименных проекций линий лежат на одной линии связи.

Итак, из трех вышеперечисленных позиционных задач остались две, называемые главными позиционными задачами:

- задача на пересечение линии и поверхности;
- задача на пересечение двух поверхностей.

Методика их решения основывается на трех алгоритмах, соответствующих трем случаям расположения пересекающихся геометрических образов относительно плоскостей проекций.

1-й случай - оба геометрических образа являются проецирующими относительно одной и той же плоскости проекций, или относительно разных плоскостей проекций;

2-й случай - один геометрический образ является проецирующим, а второй не проецирующим;

3-й случай - оба геометрических образа являются непроецирующими.

Решение Главной позиционной задачи (ГПЗ) в первом случае сводится к следующему.

Если на комплексном чертеже задан проецирующий геометрический

образ, то на одной из плоскостей проекций изображена его основная проекция. Основная проекция, как известно, обладает собирательным свойством.

Оба геометрических образа являются проецирующими. В этом случае на комплексном чертеже даны их две основные проекции, которым принадлежат проекции их общих элементов - точек или линий пересечения.

Исходя из всего сказанного, можно сформулировать алгоритм решения (ГПЗ) для первого случая:

- искомый общий элемент уже непосредственно задан на чертеже;
- его проекция принадлежит основным проекциям пересекающегося геометрического образа (ГО);

· после проведения пространственного анализа задачи решение ее на чертеже сводится к простановке соответствующих обозначений проекций.

Решение ГПЗ во втором случае расположения ГО относительно плоскостей проекций. В этом случае один ГО является проецирующим и на чертеже изображена одна основная проекция, которой принадлежит проекция искомого общего элемента. Имея одну проекцию искомого общего элемента можно найти вторую, решив при этом задачу на принадлежность этого элемента непроецирующему ГО.

Исходя из сказанного можно сформулировать алгоритм решения ГПЗ для второго случая:

- одна проекция искомого общего элемента уже непосредственно задана на чертеже. Она принадлежит основной проекции проецирующего ГО;
- вторую проекцию следует определить по принципу принадлежности искомого элемента непроецирующему ГО.

Решение ГПЗ в третьем случае расположения ГО относительно плоскостей проекций. В этом случае нет проецирующих поверхностей, нет на чертеже основных проекций. Ни одна из проекций искомого общего элемента не задана. Основным способом решения задач третьего случая является способ вспомогательных секущих поверхностей (плоскостей).

5. Группа основных метрических задач. К этой группе можно отнести следующие две задачи:

- задачи на перпендикулярность прямой линии к плоскости;
- задачи на определение расстояния между двумя точками или натуральной величины отрезка прямой.

Эти две задачи называются основными потому, что на основании их можно решить любую другую метрическую задачу, т.е. решение любой

метрической задачи можно свести к решению основных метрических задач. Конечно, при этом необходимо уметь решать ранее пройденные позиционные задачи.

Первая основная метрическая задача может выступить в двух конкретных формулировках:

· через данную точку провести прямую, перпендикулярную данной плоскости;

· через данную точку провести плоскость, перпендикулярную данной прямой.

Вторая основная метрическая задача - определение натуральной величины отрезка методом прямоугольного треугольника

Как сказано выше, решение любой метрической задачи (определение углов, площадей, расстояний) выполняется с использованием первых двух и первой позиционной.

На данном этапе при решении целого ряда метрических задач с помощью двух основных учеными сделана попытка объединения некоторых задач в группы с общим алгоритмом решения. Эта проблема далеко не решена, однако удалось объединить разные по условию задачи в группы, имеющие единый порядок решения.

Начертательная геометрия всегда представлялась сложным предметом для первокурсника. Разработка и совершенствование методики преподавателями оправдана, поскольку как показала практика и опыт работы на завершающей стадии изучения предмета при таком подходе возможен комплексный подход к решению задач на основании методов, анализа и логики.

Литература

1. Уласевич З.Н., Уласевич В.П. К параметризации геометрического образа математической модели конструкции //Тезисы докладов юбилейной научно-практ. конф.,посв. 25-летию БрПИ. Ч. II. -Брест, 1991.

СОДЕРЖАНИЕ

1 НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

| | |
|--|----|
| ГОЛУБ М.В., ГОЛУБ В.М., ВИТАЛИС ПУЧИНСКИЙ Изготовление контактных колец пар трения торцовых уплотнений с износостойкой рабочей поверхностью | 3 |
| АКУЛИЧ А.П., ДЕМИДЕНКО Е.Н., ПРИБЫЛЬСКИЙ В.И. Выбор рациональных параметров магнитной системы станка для магнитно-абразивной обработки | 9 |
| ГОРБУНОВ В.П., ГРИГОРЬЕВ В.Ф. Исследование влияния теплового режима на точность многоцелевого станка с ЧПУ | 12 |
| АКУЛИЧ А.П., АКУЛИЧ Л.И. Упрочнение проволоки из низкоуглеродистых сталей | 18 |
| БАСИНЮК Я.В. Создание программного обеспечения для испытаний приводных систем с использованием микропроцессорных средств контроля | 20 |
| БАСИНЮК В.Л., БЕРЕСТНЕВ Я.О. Оценка надежности передач зацеплением на ограниченном числе образцов | 22 |
| БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ М.А., ЧЕРЕПКО А.Е. Новые технологии активированного нанесения покрытий и абразивной обработки | 23 |
| МЕДВЕДЕВ О.А., КОЧЕМАРОВ Д.В. Расчёт прочности валов дисковых биофильтров-отстойников (ДБФО) | 26 |
| ЖУК И. В., МОНТИК С.В., ШУРИН А.Б., МИРОШНИЧЕНКО И.А., ДРАГАН А. В. Диагностика зубчатых механических приводов с использованием современных аппаратных средств | 27 |
| ГОЛУБ М.В., ХОРОНЖЕВСКИЙ Ю.А. Разработка конструкции торцового сальникового уплотнения для валов насосов | 31 |
| КОЧЕРГИН А.И., БЕЛЯЕВА Г.И., ДЫНОВСКИЙ А.С., ДЫНОВСКИЙ Н.С. Анализ влияния термической обработки и полученных при этом некоторых физико-механических свойств на шероховатость поверхности при точении | 33 |
| ЯЛКОВСКИЙ Н.С. Гидроабразивная износостойкость плазменных покрытий из керамических материалов. | 36 |
| КУДРИЦКИЙ Я.В. Исследование триботехнических характеристик композиционного материала КМ-1 | 39 |

| | |
|--|----|
| КРАЙКО С.Э. Влияние поглощающих покрытий на микротвердость стали при лазерной термообработке | 41 |
| ЕРМОЛАЕВ М.А., СЕНДЗИМИР АЛЕКСАНДР. Технологические проблемы изготовления формообразующей оснастки литейного оборудования методом газо-термического напыления | 44 |
| ГОЛУБ М. В., ГОЛУБ В. М., ШАПОВАЛ Ф. И. Методика оценки влияния температур уплотняемой среды на триботехнические характеристики. | 48 |
| КУЛЫ ЕЙКО М.П., ЛЕПШИЙ А.П. О процессе контактного взаимодействия при магнитно-абразивной обработке и его аналогах . | 51 |
| ДМИТРИЧЕНКО Э.И., КУЛЬГЕЙКО М.П., ДМИТРИЧЕНКО Е.Э. К вопросу о механизме разрушения брабатываемой поверхности при магнитно-электрическом шлифовании | 54 |
| ГОГОЛИНСКИЙ В.Ф., АФАНАСЬЕВ А.А., ПИСАРИК В.В. Совершенствование средств автоматического размерного контроля в машиностроении | 57 |
| ЧЕМИСОВ Б.П. ЗАВИСТОВСКИЙ С.Э. КРУПСКИЙ В.А. Основные направления совершенствования технологии электростатического нанесения покрытий | 60 |
| ЗЕВЕЛЕВА Е.З., ХЕЙФЕЦ М.Л., ЧЕМИСОВ Б.П. Структурный синтез технологических комплексов термомеханической и электромагнитной обработки | 61 |
| РАКОВИЧ Е.В. Получение мелкодисперсных порошков никель-бор методом химического восстановления | 64 |
| ЦЫБУЛЬСКАЯ Л.С., НОВОТОРЦЕВА И.Г., ГАЕВСКАЯ Т.В. Использование электрохимически осажденных никель-бор покрытий - путь к экономии драгметаллов | 67 |
| БЕЛОКОНЬ В.М., СТАРОХОЗЯЕВ А.С. Движение капли электродного металла при дуговой сварке | 70 |
| ЦЫРЛИН М. И., РОДЧЕНКО Д.А. Концепция комплексного моделирования процесса плазменного напыления покрытий на основе порошковых полимерных материалов | 73 |
| ЦЫРЛИН М. И. Защитные свойства эпоксидных покрытий, формируемых методом плазменного напыления | 76 |
| КОНДРАТЮК В.Ф. Об одном алгоритме расчёта деталей машин | 78 |
| АКУЛИЧ Я.А., ГЛАДЫЩУК В.Б., КУЗАВКО Ю.А., СКЛИПУС Б.Н. Ультразвуковая томографическая визуализация объектов трения | 81 |

| | |
|---|-----|
| МАШИНСКИЙ В.В., МАРТИНОВСКАЯ О.В., Порошковые конструкционные стали | 84 |
| РАНСКИЙ В.А., ЕСАВКИН В.И. Определение технологических параметров вибротранспортирующего устройства с дифференциальным движением трубчатого рабочего органа | 87 |
| РАНСКИЙ В.А., ЕСАВКИН В.И. Определение потребной мощности, необходимой для транспортирования материала вибротранспортирующим устройством с дифференциальным движением трубчатого рабочего органа | 89 |
| ЕСАВКИН В.И., РАНСКИЙ В.А. Устройство контроля перегрузки шнековых конвейеров | 91 |
| ЕСАВКИН В.И., РАНСКИЙ В.А. Ограничитель перегрузки шнековых конвейеров | 93 |
| ГРИГОРЬЕВ В. Ф., ГОРБУНОВ В. П. Исследование точности позиционирования многооперационного станка | 95 |
| БОРИСЕНКО Л.А., АЛЕКСЕЕВА О.В., МАШАРОВ А.А. Совершенствование манипуляционных систем промышленных роботов на основе использования передач с гибкой связью | 97 |
| МОНТИК С.В. Анализ напряженного состояния комбинированных зубков породоразрушающего инструмента | 100 |
| КЛИМОВ Ю.В. Оптимизация параметров системы ремонта автотранспортного предприятия | 103 |
| ПОПОК Н.Н., МАРТИНЧИК С.Н. Комплексная оптимизация механической обработки деталей с учетом организационных, технологических и физических аспектов машиностроительного производства | 105 |
| ПЕТРОВ В.А., КОСТЮЧЕНОК А.В. Исследование резания инструментом с подвижным лезвием | 108 |
| МИХАЙЛОВ М.И. Математическая модель точности сборного инструмента | 112 |
| БЕЛЬСКИЙ А.Т. О выборе законов трения при формировании покрытия в процессе волочения | 116 |
| ВЕРЕЩАГИН М.Н., ЦЕЛУЕВ М.Ю., СТАСЕНКО Д.Л., КИРИЛЮК С.И. Структурные исследования сплавов на основе железа после быстрой закалки расплава | 118 |
| ГОЛУБ М.В., ПЛЮЩЕВ Ю.И., КОСЬЯНЧУК В.В., КУДРИЦКИЙ Я.В. Торцовые уплотнения консольных насосов | 120 |

| | |
|---|-----|
| КУДРИЦКИЙ Я.В., ГОЛУБ В.М. Подготовка шихты для получения износостойкого антифрикционного композита | 123 |
| БАСИНЮК Я.В., ИШИН Н.Н. Интеллектуальные системы контроля многопараметрических процессов с динамически изменяющимися параметрами | 125 |
| СТЕПАНОВА Л.И., ВОРОБЬЕВА Т.Н., БОДРЫХ Т.И., ПУРОВСКАЯ О.Г., РЕВА О.В. Функциональная и декоративная химико-гальваническая металлизация диэлектриков | 128 |
| БОБРОВСКАЯ В.П., ВОРОБЬЕВА Т.Н., РЕВА О.В. Состав и свойства электрохимически осажденных сплавов медь-олово и никель-олово | 131 |
| БУБЛИЕВСКИЙ Д.А., КАРОЛИНСКИЙ В.Г., КУЗЬМИЧ В.А., ПЕКУН А.И., САЗОНОВ М.И., ХВИСЕВИЧ В.М. Исследование вольт-амперных характеристик дуги, горящей в плазмотроне постоянного тока с МЭВ | 134 |
| КЕНЬКО В.М., СТЕПАНКИН И.Н., СТОЛЯРОВ А.И. Исследование зависимости напряженно-деформированного состояния холодно-высадочных матриц от их геометрической формы | 139 |
| ЛЫСОВ А. А., АРШИКОВ А. С., КУКСИНСКИЙ И. Н. Моделирование процесса финишной обработки поверхностей, упрочненных твердым сплавом | 141 |
| КУРГУЗИКОВ А.М. Экспериментальные исследования износа рабочих органов пружинных мельниц | 143 |
| БЛАГОДАРНЫЙ В. М. Прогнозирование надежности механических систем на этапе проектирования | 146 |
| БОЖКОВА О. В. Технология магнитно-абразивной обработки игл | 150 |
| КУРГУЗИКОВ А.М., ПАРТНОВ С.Б. Влияние износа на общую наработку до отказа пружинного рабочего органа | 154 |

2 ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА

| | |
|--|-----|
| ХОЛОДАРИ Б.Г., НАЙЧУК А.Я. К вопросу о выборе аппроксимирующих функций для нелинейных конечных элементов в плоской задаче | 160 |
| МАЗЫРКА М.В., САВЧЕНКО В.А. Расчёт брусьев на сжатие и валов на кручение методом продолжения | 164 |

| | |
|--|-----|
| ХВИСЕВИЧ В.М. К решению нестационарных осесимметричных краевых задач теплопроводности | 168 |
| БРИКСА В.П. Предпосылки динамического расчета тонких оболочек на произвольном контуре | 173 |
| СТАВРОВ В.П., КРАВЧЕНКО О.А., ТКАЧЕВ В.М., СТОЛЯРОВ А.И. Моделирование волокнистой структуры и течения нелинейно-вязкой жидкости через нее | 177 |
| КРАВЧУК А.С. О напряженной посадке деталей с цилиндрическими поверхностями | 182 |
| ЛУЦЕНКО Е.В., ГЛАДЫЩУК А.А., МАРКО И.П., ГУРСКИЙ А.Л., ЯБЛОНСКИЙ Г.П., HEUKEN M., KALISCH H., HEIME K. Полупроводниковые лазеры с оптической накачкой на основе гетероструктур ZnSe/ZnMgSSe/GaAs с квантовыми ямами | 185 |
| РУСАКОВ К.И., ПАРАЩУК В.В. Особенности взаимодействия волн в сильном электрическом поле в сульфиде кадмия | 189 |
| ШАБЕКА Л.С., СТОРОЖИЛОВ А.И. Обучение начертательной геометрии на базе трехмерных компьютерных моделей | 192 |
| ШАБЕКА Л.С. Структурно-функциональная модель целостной графической подготовки инженера | 196 |
| ШУМСКАЯ Л.П., ЯРОМИЧ А.И. К методике проведения занятий по черчению для слушателей подготовительного отделения | 199 |
| ШУМСКАЯ Л.П., ЯРОМИЧ А.И. К методике подготовки абитуриентов к вступительным экзаменам по черчению | 200 |
| КОНДРАТЮК В.Ф., АКИМОВ В.А. Программный комплекс для расчёта сложных пространственных конструкций | 201 |
| ЗУБРИЦКИЙ В.В., Б.И. СТЕПАНОВА Пример использования фундаментальных свойств кристаллов для повышения выходной мощности генерации полупроводниковых лазеров | 204 |
| ХОЛОДАРЬ Б.Г. Учет поправки на сдвиг при расчете частот изгибных колебаний | 207 |
| КРУШЕВСКИЙ А.Е., КОНДРАТЮК В.Ф., СЕВЕНЮК А.З. Решение краевых задач теории упругости НАна основе методов аналитической механики | 211 |
| КАРОЛИНСКИЙ В.Г., САЗОНОВ М.И. Применение плазмотронов постоянного тока с МЭВ в процессах осаждения алмазных пленок. | 213 |
| БУБЛИЕВСКИЙ Д.А., КАРОЛИНСКИЙ В.Г., САЗОНОВ М.И. Критериальные зависимости для расчета параметров плазменных струй | |

| | |
|---|-----|
| при поверхностной обработке материалов | 217 |
| АКИМОВ В.А., ПРУСОВА А.В. Операторный метод решения задачи о распространении волн в стержне прямоугольного сечения в трехмерной постановке | 220 |
| ГРЕКОВА А. В, ЧИГАРЕВ А.В. Задача о смазке длинного радиального пористого подшипника переменной проницаемости | 222 |
| УЛАСЕВИЧ З.Н. Обобщение методик преподавания курса начертательной геометрии | 226 |
| СОДЕРЖАНИЕ | 232 |

Научное издание

Труды X научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов
(31 марта - 1 апреля 1998 года)
Часть 1

| | |
|---|------------------|
| Ответственный за выпуск и научный редактор | М.В.Голуб |
| Редактор | Т.В.Строкач |
| Художественный редактор | Я.А.Акулич |
| Технический редактор | О.В.Мartiновская |
| Компьютерный дизайн и верстка | И.А.Сидорейко |

Подписано в печать 25.03.98. Формат 60x84_{1/16}. Бумага CopyRex.
Гарнитура Times New Roman Cyr. Усл.печ.л.13,8. Уч.-изд.л. 14,9.
Зак № 186. Тираж 100 экз. Отпечатано на ризографе Брестского
политехнического института. 224017, г.Брест, Московская, 267.