

Изготовленные резцовые головки обеспечивали нарезание зубьев колес по 7-й степени точности.

Библиографический список

1. Проектирование зубчатых конических и гипоидных передач: Инструкционные материалы фирмы "Глисон" (США). М.: Машгиз, 1963. 224 с.
2. Зубчатые передачи: Справочник /Под общей ред. Е.Г.Гинзбурга. Л.: Машиностроение, 1980. 416 с.
3. К е д р и н с к и й В.Н., П и с м а н и к К.М., Станки для обработки конических зубчатых колес. М.: Машиностроение, 1967. 584 с.
4. Некоторые особенности расчета и изготовления конических колес с отрицательной кривизной линии кругового зуба /Ястребов В.М., Савинов А.П. и др. Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1983. 8 с. - Деп. в НИИМАШ 23.03.83, № 67 МШ-Д83.

УДК 621.9.047.7

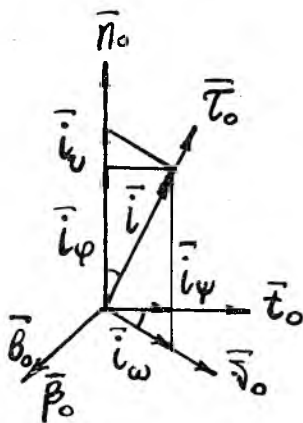
Ю.А.Сираж

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ТОЧНОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Приведены новые данные о строении и математическом описании электрического поля при электрохимической обработке (ЭХО), результаты анализа погрешностей формообразования из-за деформации электрического поля и его нестабильности, рекомендации по повышению точности ЭХО.

Основной причиной недостаточной точности ЭХО деталей ГТД является нестабильность электрического поля в межэлектродном пространстве. При этом силовые линии тока перпендикулярны поверхностям эквипотенциалей и электродов. Угол их наклона изменяется в простран-

ISBN 5-230-16902-8. Методы обработки авиаматериалов. Самара, 1991



Р и с. I. Схема поля плотностей токов при неперпендикулярности силовых линий эквипотенциалов

стве и во времени. Это ставит вопрос о применимости уравнения Лапласа и теоремы Гаусса (электрического аналога уравнения Пуассона), так как последние составлены при соблюдении условия перпендикулярности линий тока эквипотенциалам, что приводит в подавляющем большинстве случаев к мнимым решениям.

В соответствии с экспериментально полученной схемой, представленной на рис. I, вектор плотности тока \vec{i} разлагается на две векторные пары плотностей токов, т.е.

$$\vec{i} = \vec{i}_\psi + \vec{i}_\omega = \vec{i}_\psi + \vec{i}_\omega, \quad (I)$$

где \vec{i}_ψ — вектор плотности тока идеального Лапласова поля с потенциалом ψ ;

\vec{i}_ω — вектор плотности тока деформирующего поля с математическим потенциалом ω ;

\vec{i}_ψ — вектор плотности тока растворяющего (нормального) поля с реальным потенциалом ψ ;

\vec{i}_ω — вектор плотности тока сдвигающего (тангенциального) поля с математическим потенциалом самолокализации ψ .

Составляющие плотности токов \vec{i}_ψ , \vec{i}_ω , \vec{i}_ψ , \vec{i}_ω определяются через градиенты своих потенциалов. Вектор \vec{i} является проекцией \vec{i}_ψ на орт \vec{t}_0 , как показано на рис. I. Векторы \vec{i}_ψ и \vec{i}_ω соответственно представляют собой проекции вектора \vec{i} на орты \vec{n}_0 и \vec{t}_0 . Вектор \vec{i}_ω , кроме того, является проекцией вектора \vec{i}_ω на орт \vec{t}_0 . Вектор \vec{i}_ω направлен по орту $\vec{\nu}_0$ и перпендикулярен эквипотенциалу обращенного поля, совпадающего с эквипотенциалом поля потенциала ω . Орты \vec{v}_0 и \vec{v}_0 лежат на одной оси.

Для эквипотенциалей использована система ортов $\bar{b}_0, \bar{b}_0, \bar{b}_0$, для силовых линий тока — система ортов $\bar{b}_0, \bar{b}_0, \bar{b}_0$.

Все векторы плотностей токов находятся в одной плоскости из-за отсутствия вихревых тангенциальных составляющих поля. Силовая линия вектора плотности тока \vec{i} находится в поверхности эквипотенциала обращенного поля. Обращенное поле можно получить, если непроводящую часть поверхности камеры сделать парой электродов, а деталь и электрод-инструмент выполнить из диэлектрика. Эквипотенциаль обращенного поля при этом можно описать через потенциал ω .

Исходя из равенств (I) и схемы рис. I, уточненное уравнение Лапласа представляют для деформированного поля двояким образом, т.е.

$$\nabla^2 v + \nabla^2 \omega = 0, \quad (2)$$

$$\nabla^2 \varphi + \nabla^2 \psi = 0. \quad (3)$$

Аналогично изменяется левая часть в теореме Гаусса и уравнении Пуассона. Отсюда следует, что поверхности электродов и эквипотенциалей v и φ описываются в пространстве для прямого и обращенного полей любыми уравнениями поверхностей в действительной области чисел, т.е.

$$v = v_0 f_v(x, y, z),$$

$$\varphi = \varphi_0 f_\varphi(x, y, z),$$

где v_0, φ_0 — физические постоянные, характеризующие природу поля и размерность потенциалов;

f_v, f_φ — функции, характеризующие геометрию пространства, в котором реализованы поля потенциалов v и φ .

Поскольку силовая линия тока располагается в эквипотенциали обращенного поля, то она также описывается любыми действительными уравнениями (в параметрической форме $x = x(\alpha)$ и $y = y(\alpha)$) при задании в пространстве.

Уравнение (2) известно в матанализе из теории градиента скалярного поля при перпендикулярности силовых линий тока эквипо-

тенциалам. Но оно не получило распространения из-за физической недоказанности.

При суммировании реального φ и математического ψ полей получается суммарное математическое поле потенциала ε плотности тока i , для которого применимы законы кривизны Дж. Шпильрайна.

Скалярное поле потенциала φ измеряется с помощью вольтметра. Остальные же потенциалы — идеальный V , математические ω и ψ — появились из-за введения понятий градиента (условие перпендикулярности) и производной по направлению (условие неперпендикулярности). Эти потенциалы определяются расчетным путем и прибором не измеряются, поэтому они и названы математическими. Однако в расчетах с ними можно оперировать как с реальными потенциалами.

Связь между потенциалами V и φ находится из равенства

$$g \operatorname{grad} \varphi = \tau_{0n}^2 g \operatorname{grad} V, \quad (4)$$

где τ_{0n} — направляющий косинус угла между осями \bar{n}_0 и $\bar{\tau}_0$.

В частных случаях, когда линии тока перпендикулярны эквипотенциалам, тогда V и φ равны между собой.

В равенствах (2) и (3) Лапласианы математических потенциалов ω и ψ описываются через потенциалы V и φ следующими формулами:

$$\nabla^2 \omega = |g \operatorname{grad} V| \frac{\partial \ln [\sigma (\tau_{0n}^2 + \tau_{0n} \sqrt{1 - \tau_{0n}^2})]}{\partial n}, \quad (5)$$

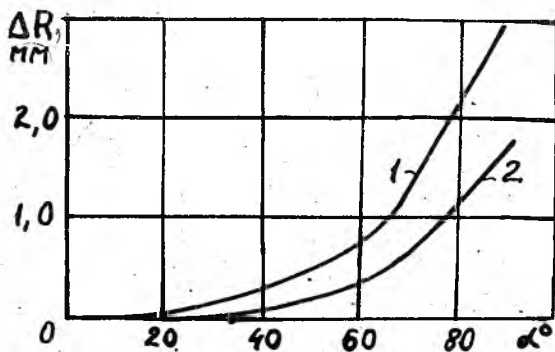
$$\nabla^2 \psi = |g \operatorname{grad} \varphi| \frac{\partial \ln \left[\sigma \left(1 + \frac{\sqrt{1 - \tau_{0n}^2}}{\tau_{0n}} \right) \right]}{\partial n}, \quad (6)$$

где σ — удельная электропроводность раствора электролита.

Формулы (4), (5) и (6) подтверждают физическую фиктивность математических потенциалов ω и ψ и их производность от реального потенциала φ . Отсюда же установлено влияние переменности удельной проводимости электролита σ и направляющего косинуса τ_{0n} на строение поля в межэлектродном промежутке, а следовательно, на точность ЭХО. Переменность этих двух параметров в трубках тока в процессе ЭХО объясняется нестабильностью гидравлического и электри-

ческого полей. Эта нестабильность полей вызывается особенностями процесса растворения металла и выделения газа, колебаниями физических и химических параметров раствора электролита в пространстве, свойствами приэлектродных слоев электролита.

Поскольку деформируемость поля возрастает к периферии зоны обработки, т.е. τ_{011} убывает, то скорость растворения металла уменьшается, копирование электрода-инструмента в детали и точность формообразования повышаются. Этим также объясняется погрешность расчетов формообразования ЭХО при идеальной постановке задачи по Лапласу. Расчетная погрешность всегда больше, чем измеренная, как показано на рис. 2. Эти утверждения достоверны, если скорость электролита и под давлением на выходе из камеры обеспечивают очистку межэлектродного пространства от отходов обработки и неразрывность потока электролита.



Р и с. 2. Погрешности формообразования цилиндрических поверхностей деталей в зависимости от полярного угла: 1 - расчетные с соблюдением условий Лапласа; 2 - экспериментальные

Погрешность расчетов отмечается также из-за деформации трубки тока переменного сечения в силовую линию тока, которая эту переменность сечения утрачивает. Для оценки этой погрешности используются преобразованные условия определения уравнений силовых линий тока в пространстве в виде системы

$$\left\{ \begin{aligned} z''' [1+(z')^2] &= 2z'(z'')^2 - M_{zx} [1+(z')^2]^2, \\ y''' [1+(y')^2] &= 2y'(y'')^2 - M_{yx} [1+(y')^2]^2, \\ M_{zy} &= 0, \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где $y', y'', y''', z', z'', z'''$ — первые, вторые и третьи производные от функций $y = y(x)$ и $z = z(x)$, описывающих в пространстве силовые линии тока;

M_{zx}, M_{yx}, M_{zy} — функции, характеризующие деформацию трубок тока при проектировании их на грани неподвижной системы координат zyx .

Функции M_{zx}, M_{yx}, M_{zy} в общем случае учитывают деформацию реальной трубки тока в идеальную силовую линию, а также геометрические характеристики деформации поверхности равного уровня Π потенциальной составляющей поля и N вихревой составляющей поля, определяемые как

$$\Pi = \frac{\text{div } \bar{i}}{i},$$

$$N = \frac{|\text{rot } \bar{i}|}{i}.$$

При расчетах $\text{div } \bar{i}$ и $\text{rot } \bar{i}$ необходимо всегда использовать неподвижную систему координат. В подвижных системах функционирует только градиент логарифма расширения (сужения) поля и поэтому утрачивается инвариантность дивергенции и ротора тока.

Для полей постоянного тока характеристики Π и N равны нулю, поэтому функции M_{zx}, M_{yx}, M_{zy} становятся только мерой деформации реальной трубки тока в идеальную силовую линию, утратившую переменность сечения. Для большинства кривых все эти функции M равны нулю. В остальных случаях появляется дополнительный математический потенциал и применимость уравнений не исключается.

Такая постановка вопроса соответствует следствиям из закона кривизны Дж.Шпильрайна, показывающим, что для описания поля в пространстве могут быть использованы любые действительные уравнения силовых линий тока и эквипотенциалей без ограничений на коэффициенты при переменных x, y, z или при их произведениях.

Исходя из описанных выше особенностей электрического поля постоянного тока при ЭХО можно рекомендовать направление работы в подборе электролитов повышенной избирательности и энергосбережения для изготовления деталей из заготовок с малыми припусками. Таким направлением является исследование слабых электролитов, увеличивающих свою электропроводность под действием импульсного тока в малых межэлектродных зазорах между электродом-инструментом и деталью и проявляющих свойства жидкого диэлектрика на больших электрических зазорах. Подобные явления наблюдались на практике при введении в раствор пассиваторов на кислородной основе и образовании смесей с нерастворимыми, масляными, жидкими диэлектриками.

В ы ы о ы. 1. Нестабильность поля ухудшает точность ЭХО. 2. Наличие переменного потенциала самолокализации ψ повышает точность формообразования.

УДК 621.9.047

М.В.Демин, О.А.Сенина, В.Ф.Герасимов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ
РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ГТЛ
ИЗ СПЛАВА ЭП718ВД

Приведены результаты исследований по совершенствованию технологического процесса вибро-ЭХО лопаток с длиной пера до 100 мм путем оптимизации состава электролита. В разработанном технологическом процессе используется электролит на основе перхлората натрия, что позволило повысить точность и качество поверхностного слоя.

ISBN 5-230-16902-8. Методы обработки авиаматериалов. Самара, 1991
