

СИСТЕМА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Описано использование системы математического моделирования (которая включает математическое моделирование, разработку конструктивно-технологических предложений, оптимизацию параметров) при исследовании механического разделения неоднородных конструкций на примере электрических аккумуляторов

Утилизация выработавших ресурс электрических аккумуляторов является актуальной хозяйственной и экологической проблемой [1]. Известен способ [2] утилизации электрических аккумуляторов, которые имеют неоднородные конструкции, основанный на механическом разделении их конструкции.

Для исследования возможностей механического разделения неоднородных конструкций электрических аккумуляторов целесообразно применить систему математического моделирования [3], которая включает

- математическое моделирование (целеполагание, идеализация, формализация, идентификация, проверка адекватности);
- разработку конструктивно-технологических предложений;
- оптимизацию параметров конструктивно-технологических предложений.

Рассмотрим решение такой задачи на примере конкретных видов электрических аккумуляторов.

Математическое моделирование. Целеполагание

Создать математические модели (ММ), учитывающие основные физико-механические и геометрические особенности неоднородных конструкций электрических аккумуляторов, для определения оптимальных параметров процесса их механического разделения. Погрешность моделирования не более 5%. Стоимость моделирования не должна превышать 5% стоимости аккумуляторов определенного вида.

Идеализация

Аккумулятор, освобожденный от жидких компонентов, как объект для разделения представляет собой композицию нескольких разнородных материалов (металлов и неметаллов), имеющих различные физико-механические свойства и обрабатываемость резанием. Например, составляющие железоникелевых аккумуляторов имеют физико-механические характеристики, представленные в таблице 1, а свинцовых – в таблице 2.

Таблица 1

Механические свойства элементов железоникелевых аккумуляторов

Материал	Плотность, кг/м ³	Предел прочности, МПа	Твердость по Бринеллю, МПа	Относительное удлинение, %
Железо	7870	180-320	350-450	30-50
Никель	8900	360-430	730-800	35-50
Эбонит	1150 - 1680	52 - 67		

Таблица 2

Механические свойства элементов свинцовых аккумуляторов

Материал	Плотность, кг/м ³	Предел прочности, МПа	Твердость по Бринеллю, МПа	Относительное удлинение, %
Свинец	11340	15 - 25	40	30 - 50
Полиэтилен	918 - 930	10 - 17	14 - 25	500 - 600

Геометрические параметры аккумулятора и разделяемых элементов приведены на (рис. 1).

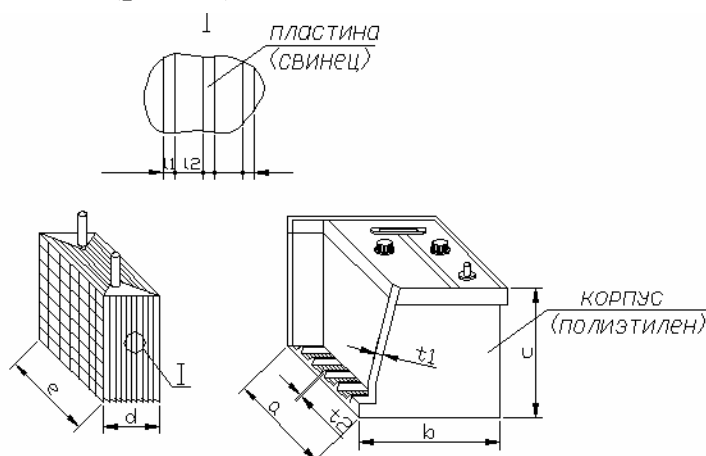


Рисунок 1 - Геометрические параметры аккумулятора и разделяемых элементов на примере свинцового аккумулятора

Разделение производится (с учетом известного опыта разделения труб [4-8]) на специальном отрезном станке с помощью дисковой фрезы, которая имеет ширину реза (толщину) равную ширине участка (рис. 1 и таблица 5) разделения.

Для использования математической модели при исследовании разделения многокомпонентной среды, каковой является аккумулятор, необходимо установить правило учета неоднородности свойств составляющих. Пусть свойства многокомпонентной среды определяются как средние по значениям свойств составляющих. Основным фактором, который определяет различия условий разделения, является прочность обрабатываемого материала. Влияние этого фактора, учитывается поправочными коэффициентами в формулах для скорости резания и силы резания. В свою очередь величины этих поправочных коэффициентов зависят величин приведенных пределов прочности многокомпонентного материала. Например, приведенный предел прочности многокомпонентной среды (из k составляющих, каждая из которых имеет предел прочности $\sigma_{\sigma i}$) можно определить по формуле:

$$\sigma_{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_{\sigma i}}{k}.$$

Формализация

Основными выходными переменными процесса разделения являются:

- длительность разделения;
- скорость резания;
- стойкость инструмента;
- сила и мощность резания.

Основными входными переменными процесса разделения являются кинематические параметры режима резания (глубина резания, подача и скорость резания). Эти же переменные следует выбрать в качестве входных и выходных переменных математической модели процесса разделения.

Условия обработки характеризуются также физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов и режущей части дисковой пилы, а также геометрическими параметрами режущей части дисковой пилы.

Длительность разделения можно оценить величиной основного времени [4 - 8] при резании T_o :

$$T_o = \frac{L}{n \cdot s_z \cdot z} \cdot \frac{Z}{t}, \quad (1)$$

где L – длина резания;

n – частота вращения дисковой пилы;

s_z – подача на один зуб фрезы;

z – число зубьев фрезы;

Z – величина припуска;

t – глубина резания.

Скорость резания (окружная скорость фрезы) v можно рассчитать по эмпирической формуле [7]:

$$v = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \cdot K_v, \quad (2)$$

где C_v , q , m , x , y , u , p , K_v – справочные коэффициенты и показатели степени, учитывающие условия резания;

D – диаметр фрезы;

B – ширина фрезерования;

T – стойкость фрезы.

Общий поправочный коэффициент K_v определяется в зависимости от условий обработки [7]:

$$K = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv}, \quad (3)$$

где K_{mv} – учитывает вид обрабатываемого материала;

K_{nv} – учитывает состояние поверхности заготовки;

K_{uv} – учитывает материал инструмента.

При этом коэффициент K_{mv} , учитывающий вид обрабатываемого материала, определяется расчетным путем [4 - 8]:

$$K_{mv} = K_z \cdot \left(\frac{750}{\sigma_\epsilon} \right)^{n_v}, \quad (4)$$

где K_z и n_v – справочный коэффициент и показатель степени, учитывающие условия резания;

σ_ϵ – прочность обрабатываемого материала.

Величина стойкости инструмента (дисковой фрезы) T может быть определена [4 - 8] с помощью выражения (5), полученного преобразо-

ванием формулы (2) для скорости резания:

$$T = \frac{A}{v^{1/m}}, \quad (5)$$

где A – коэффициент, учитывающий условия резания;

m – показатель относительной стойкости.

Частота вращения n и скорость резания v функционально связаны между собой для конкретных условий обработки выражением:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D}. \quad (6)$$

Для описания главной составляющей силы (P_z) и мощности N резания используются формулы теории резания [7]:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^n \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{mp};$$

$$N = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60}, \quad (7)$$

где C_p , x , y , n , q , w , K_{mp} – справочные коэффициенты и показатели степени, учитывающие условия резания.

При этом поправочный коэффициент K_{mp} , учитывающий вид обрабатываемого материала, определяется расчетным путем [4 - 8]:

$$K_{mp} = \left(\frac{\sigma_b}{750} \right)^{n_p}, \quad (8)$$

где n_p – справочный показатель степени, учитывающий условия резания;

σ_b – прочность обрабатываемого материала.

Математическая модель процесса резания является комбинированной и включает все выражения (1) – (8).

Идентификация

Приведенные показатели степени n_v и n_p определяются как линейные комбинации величин соответствующих показателей для конструкционной углеродистой стали (для базового материала [7] $n_v=0,9$ и $n_p=0,3$) и многокомпонентного материала с учетом известных [7] рекомендаций (а именно, при $\sigma_b < 750$ МПа величина $n_v = -1,0$ и $n_p = 0,1$).

Другие эмпирические коэффициенты и показатели степени выбираются [7] соответственно обработке конструкционной углеродистой стали (таблица 3).

Таблица 3

Эмпирические коэффициенты и показатели степени.

Формула	C	x	y	u	q	m	p	w
Скорость резания	68,5	0,3	0,2	0,1	0,25	0,2	0,1	-
Сила резания	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	-	-	0

Значения приведенных пределов прочности, показателей степени и соответствующих поправочных коэффициентов (рассчитанных по формулам (4) и (8)) указаны в таблице 4.

Таблица 4

Приведенные прочность, показатели и поправочные коэффициенты

Способ приведения	Предел прочности, МПа		Приведенные			K_{mv}	K_{mp}
	Полиэтилен	Свинец	Прочность, МПа	показатели			
				n_v	n_p		
Средняя величина	13,5	20	16,75	-0,1	0,4	0,683 3	0,2186

Основные характеристики инструмента для разделения (дисковой пилы) приведены в таблице 5.

Таблица 5

Основные параметры дисковой фрезы

Материал	Диаметр, мм	Ширина, мм	Число зубьев	Передний угол	Задний угол
Сталь 9ФХ	560	5	176	-8°	7,5°

Проверка адекватности

Соответствие математической модели и оригинала (процесса разделения) обеспечивается использованием апробированных выражений [4 - 8] теории резания и технологии машиностроения.

Дополнительно проверено соответствие модели и оригинала [9] по основной выходной переменной модели и оригинала, а именно по времени разделения аккумулятора.

Предельные допустимые отклонения значений выходных переменных оригинала ξ_{max} и ξ_{min} определены [9] по формулам (9, 10) с использованием статистических оценок математических ожиданий ξ и средних квадратических отклонений s экспериментальных данных.

Значения статистики $\zeta(n, Q)$ определены по таблице 4.8в [11] при $Q=5\%$.

$$\xi_{\max} = \xi + \zeta(n, Q) \cdot s \quad (9)$$

$$\xi_{\min} = \xi - \zeta(n, Q) \cdot s \quad (10)$$

Соотношение рассчитанных с помощью математической модели и экспериментальных значений времени разделения (таблица 6) показывает, что гипотеза о соответствии модели и оригинала не может быть отклонена [9].

Таблица 6

Проверка соответствия модели и оригинала.

Вид аккумулятора	Математическая модель разделения, мин.	ζ_{\max} , мин	ζ_{\min} , мин
АКБ 6СТ-60	4,267	5,159	2,443

Разработка конструктивно-технологических предложений

Технологическая схема разделения (рис. 2) описывает схему базирования и закрепления аккумулятора, кинематику инструмента и аккумулятора при разделении, основные кинематические и энергосиловые параметры режима резания.

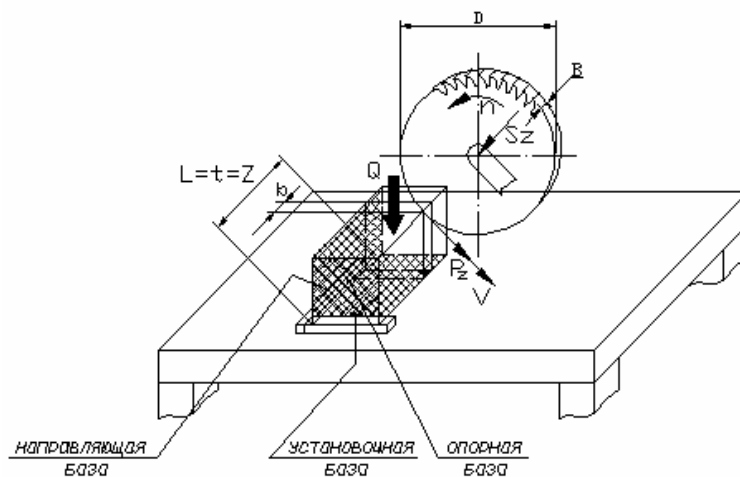


Рисунок 2 - Технологическая схема разделения

Для базирования используется комплект базовых поверхностей (установочная, направляющая и опорная базы), характерный для призматических деталей, к которым (по форме) относится аккумулятор.

Закрепление аккумулятора с силой зажима Q (которая определяется из условия неподвижности аккумулятора при действии силы резания P_z) производится вручную. Разделение производится с руч-

ной подачей при одновременном захвате всего поперечного сечения аккумулятора.

Оптимизация параметров конструктивно-технологических предложений

Задача оптимизации формулируется на основе математической модели процесса (1) – (8) как задача об определении значений кинематических параметров режима резания, при которых основное время резания (критерий оптимизации) минимально и одновременно выполняются ограничения по стойкости дисковой пилы и мощности резания:

$$\begin{aligned} T &= \frac{L}{n \cdot s} \cdot \frac{Z}{t} \rightarrow \min, \\ T &\geq [T], \\ N &\leq [N], \end{aligned} \quad (11)$$

где $[T]$ и $[N]$ – предельно допустимые значения стойкости инструмента и мощности резания.

В качестве примера рассмотрим решения задачи оптимизации для разделения конкретного вида свинцового аккумулятора, а именно, АКБ 6СТ-60. С учетом изложенного ранее формулировка задачи оптимизации примет вид:

$$\begin{aligned} T_o &= \frac{1,625}{n \cdot s_z} \rightarrow \min, \\ \frac{A_v}{s \cdot n^5} &\geq [T], \end{aligned} \quad (12)$$

$$K_N \cdot s^{0.72} \cdot n \leq [N],$$

$$n < 20 \text{ об/мин}, \quad s_z < 0,2 \text{ мм.}$$

Учитывая нелинейный вид формулировки задачи оптимизации для ее решения использован известный [10] вариант градиентного метода оптимизации, основанный на имитационных экспериментах с ММ процесса разделения. Ход решения представлен в таблице 7.

Начальные значения (основни уровни) и интервалы варьирования оптимизируемых переменных (n и s_z) выбраны с учетом результатов теоретических исследований (приблизительно посередине установленных предельных диапазонов). После определения составляю-

щих градиента целевой функции их значения были уменьшены в десять раз (для обеспечения возможности реализации движения по градиенту). Для начала движения по градиенту выбрано сочетание факторов, которые имеют наиболее подходящие значения критерия оптимизации и ограничений (третий имитационный эксперимент в таблице 7).

Таблица 7

Решение задачи оптимизации

	Подача, мм	Частота, об/мин	Время, мин	Стойкость, мин	Мощность, кВт
Основной уровень	0,05	10	3,25	50,91156	2,4462799
Интервал	0,02	0,5			
Верхний уровень	0,07	10,5	2,210884	28,49324	3,2727108
Нижний уровень	0,03	9,5	5,701754	109,6597	1,6087874
Имитационные эксперименты					
1	0,07	10,5	2,210884	28,49324	3,2727108
2	0,07	9,5	2,443609	46,99702	2,961024
3	0,03	10,5	5,15873	66,48423	1,7781334
4	0,03	9,5	5,701754	109,6597	1,6087874
Градиент	-1,551497792	-0,19394			
Шаг движения	-0,031029956	-0,09697			
Шаг корректируемый	-0,003102996	-0,0097			
Движение по градиенту					
5	0,033102996	10,5097	4,67085	59,97471	1,9104795
6	0,036205991	10,51939	4,266603	54,58237	2,0396722
7	0,039308987	10,52909	3,926184	50,04264	2,1660712
8	0,042411982	10,53879	3,635584	46,16837	2,2899719
9	0,045514978	10,54848	3,384613	42,82346	2,4116202

Оптимальное решение соответствует второму шагу движения по градиенту, так как в этом случае достигается предельное значение ограничения по стойкости фрезы: $n_{opt} = 10,5$ об/мин,

$$s_{z\ opt} = 0,036 \text{ мм/зуб.}$$

Дополнительный анализ показывает, что решение задачи оптимизации зависит от выбора начальной области. Это объясняется особенностями ММ, в частности, очень сильным (и противоречивым) влиянием входных переменных на выходные переменные. Например, частота вращения входит в выражение для стойкости инструмента в пятой степени. Для уменьшения влияния такой неоднородности следует провести более глубокое исследование допустимой области изменения входных переменных, что выходит за пределы целей настоящего исследования.

Использование системы математического моделирования, которая включает

- математическое моделирование (целеполагание, идеализация, формализация, идентификация, проверка адекватности);
- разработку конструктивно-технологических предложений;
- оптимизацию параметров конструктивно-технологических предложений,

позволяет эффективно решать практические задачи повышения эффективности механического разделения неоднородных конструкций электрических аккумуляторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы Международной конференции «Сотрудничество для решения проблемы отходов», 28–31 марта 2012 г., г. Харьков, Украина
2. Патент №48930 Україна, H01M10/54, C22B7/00. Спосіб переробки відпрацьованих акумуляторних батарей / Гончаренко В.І. (Україна). - №2002064740; Заявлено 10.06.2002; Опубл. 15.08.2002, Бюл. №8.-2 с.
3. Ясев А.Г. Комплексный метод совершенствования технологической оснастки процессов обработки деталей металлургических машин // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. Том 10. Дніпропетровськ: Системні технології, 2007. – с. 68-82
4. Филоненко С.Н. Резание металлов. – К.: Техніка, 1975. – 232 с.
5. Справочник по обработке металлов резанием / Ф.Н. Абрамов, В.В. Коваленко, В.Е. Любимов и др. – К.: Техніка, 1983. – 239 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 1 / Под ред.. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. –М.: Машиностроение, 1972. – 694 с.
7. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2 / Под ред.. А.Н. Малова – М.: Машиностроение, 1972. – 568 с.
8. Механическая обработка пластмасс / Семко М.Ф. и др. –М.: Машиностроение, 1965.
9. Ясев А.Г. Соответствие математических моделей и технологических процессов в металлургии и машиностроении. - Днепропетровск: Днепр-VAL, 2001. - 237 с.
10. Ясев А.Г. Применение методов оптимизации технологических процессов. С. 163-217 // Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. - Т. 8: «Оптимизация технологических процессов в машиностроении» - Одесса: ОНПУ, 2004. - 509 с.
11. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики.- М.: Наука, 1983. - 416 с.