

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

А. А. Банников¹, Ю. В. Литовка¹, Г. В. Шишкина²

*Кафедры: «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» (1),
sapr.tstu@mail.ru; «Мехатроника и технологические измерения» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: видеокарта; гальванические покрытия; деталь; неравномерность; оптимальное размещение; распараллеливание; расчет.

Аннотация: Рассмотрена задача поиска оптимального расположения деталей-катодов на подвеске, при котором суммарная неравномерность получаемых гальванических покрытий минимальна. Предложены способы ускорения расчетов оптимального расположения при помощи современных технологий, применяемых в ЭВМ. Представлены результаты экспериментов, подтверждающие эффективность распараллеливания расчетов на видеокarte с помощью применения технологии CUDA.

Введение

Нанесение гальванических покрытий – один из наиболее распространенных способов придания покрываемой поверхности деталей специальных свойств [1 – 3]. Качество получаемых гальванических покрытий оказывает значительное влияние на качество готовых изделий и их различные эксплуатационные характеристики (долговечность, стойкость к коррозии, блеск и др.). При этом одним из важнейших показателей качества получаемого покрытия является равномерность распределения толщины наносимого металла по поверхности детали.

В гальванических цехах машиностроительных предприятий, как правило, используются линии для нанесения покрытий с ваннами объемом от 1,5 м³ и больше. В связи с этим детали небольшого размера необходимо обрабатывать совместно, так как нерентабельно обрабатывать по одной детали за один цикл работы гальванической ванны. Совместная обработка их большого количества приводит к экономии затрачиваемых ресурсов (времени, электроэнергии и др.) [4].

При совместном нанесении гальванических покрытий используется несколько устройств для размещения деталей в электрохимической ванне, основными из которых являются барабаны и подвесочные рамы. С точки зрения получения равномерного покрытия по поверхности деталей, использование перфорированных барабанов обеспечивает хорошие значения данного показателя за счет вращения барабана и, как следствие, перемешивания деталей. При этом различные фрагменты поверхностей деталей регулярно оказываются напротив отверстий в барабане, через которые проходит ток. Данный способ используется при нанесении гальванических покрытий на мелкие детали (в основном метизы).



Рис. 1. Подвесочное устройство для обработки деталей в электрохимической ванне

жение деталей на подвесочном устройстве (в случае, когда детали имеют различные формы и размеры).

Совсем иная картина наблюдается при использовании подвесочных устройств, применяемых для обработки средних и крупных деталей (рис. 1).

В зависимости от размеров электрохимической ванны, на подвеске может размещаться до нескольких десятков деталей разных формы и размеров. Как известно, электрическое поле в гальванической ванне имеет сложную структуру, в связи с чем покрытие на поверхности деталей будет иметь различную толщину в разных точках. Если покрытие в некоторых местах поверхности будет меньше значения δ_{\min} , определяемого техническим заданием, деталь отбраковывается. В ряде случаев превышение толщины покрытия максимального значения δ_{\max} также недопустимо, так как приведет к невозможности сочленения деталей на этапе сборки. Повысить равномерность наносимого гальванического покрытия можно, меняя расположение

Постановка задачи

С точки зрения системного анализа, входными координатами гальванической системы являются количество, форма и размеры деталей, поступивших на обработку. В качестве управляющего воздействия выберем расположения деталей-катодов на подвеске.

Суммарная неравномерность m штук деталей может быть оценена формулой, аналогичной приведенной в [5 – 7]:

$$R = \sum_{j=1}^m \int_{S_j} \frac{\delta_j(x, y, z) - \delta_j^{\min}}{\delta_j^{\min}} dS_j,$$

где R – критерий неравномерности; $\delta_j(x, y, z)$ – толщина покрытия в точке j -го катода с координатами (x, y, z) ; δ_j^{\min} – минимальная толщина покрытия на j -м катоде; S_j – площадь поверхности j -го катода.

Задача заключается в поиске такого расположения деталей-катодов на подвеске, при котором суммарная неравномерность получаемых покрытий минимальна [8]. Расположение деталей задается координатами базовых точек. В качестве базовой выбрана точка пересечения диагоналей параллелограмма, описывающего деталь.

Для связи критерия с варьируемыми переменными предложена математическая модель, включающая следующие уравнения [6, 9 – 13]:

$$\left. \begin{aligned}
& \delta_j(x, y, z) = \frac{\Theta}{\rho} \int_0^T \eta i_{kj}(x, y, z, \tau) d\tau; \\
& i_{kj}(x, y, z) = \chi \operatorname{grad} \varphi(x, y, z) S_j; \\
& \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0; \\
& \partial \varphi / \partial n |_{S_u} = 0; \\
& \varphi + F_1(i_a) S_a = U; \\
& \varphi + F_2(i_k) S_j = 0; \\
& j = 1, 2, \dots, n,
\end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где S_a – площадь поверхности анода, m^2 ; S_j – площадь поверхности j -ой детали-катода, m^2 ; Θ – электрохимический эквивалент металла покрытия, $kg/(A \cdot c)$; ρ – плотность металла покрытия, kg/m^3 ; T – время нанесения покрытия, c ; η – катодный выход по току; τ – текущее время, c ; i_k, i_a – соответственно катодная и анодная плотности тока, A/m^2 ; χ – электропроводность электролита, $1/\Omega m$; $\varphi(x, y, z)$ – потенциал электрического поля, B ; S_u – площадь поверхности электроизолированных стенок гальванической ванны и поверхности электролита на границе электролит – воздух, m^2 ; n – нормаль к поверхности изолятора; U – напряжение в ванне, B ; $F_1(i_a), F_2(i_k)$ – функции анодной и катодной плотности тока, учитывающие поляризацию соответственно на аноде и катоде, B .

Математическая постановка задачи формулируется следующим образом. Пусть задан массив $A[i, j]$, где i – номер строки, j – номер позиции в строке (под строками понимаются перекладины подвеса, под номером позиции – кронштейны для фиксирования деталей), A – номер размещенной на i -й, j -й позициях детали.

Найти значение $A[i, j]$, $i = 1, \dots, p$, $j = 1, \dots, h$, при которых $R \rightarrow \min$ при связях, определяемых системой уравнений (1).

Покрытие будет считаться качественным, если для всех l точек на поверхности детали, где проводилось измерение толщины покрытия δ_i , выполняется условие

$$\delta_{\min} \leq \delta_i \leq \delta_{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, l. \quad (2)$$

Решение задачи

Простой способ решения рассматриваемой задачи – использование метода полного перебора, но при большой размерности задачи он приводит к очень длительным расчетам. Существуют и другие способы решения данной задачи, такие как метод ветвей и границ и метод Гомори [14, 15], но только метод полного перебора всегда дает гарантированный оптимальный результат.

Главный недостаток метода полного перебора – необходимость просчитать все возможные варианты размещения обрабатываемых деталей на подвесе. Расчет занимает большое количество времени и приводит к простаиванию производственной линии, а также к перерасходу электроэнергии, необходимой для работы ЭВМ, применяемой для расчетов. Данные факторы несут негативные экономические последствия для производства.

Способы ускорения расчетов

Проблему медленной работы метода полного перебора можно решить, применив распараллеливание расчетов. Предположим, что в компьютере, используемым оператором гальванической линии, установлена современная производительная видеокарта с большим количеством вычислительных блоков. В таком случае можно одновременно проводить расчет нескольких вариантов размещения деталей на подвесе.

В качестве примера приведем видеокарту Nvidia GeForce GTX 1060 6GB, которая имеет 1280 вычислительных блоков (рис. 2). При использовании данной видеокарты можно одновременно просчитать все возможные варианты размещения 35 деталей различной формы и веса на подвесе. Таким образом, можно предположить прирост в скорости вычислений примерно в 30 – 35 раз с учетом погрешности. Если задача имеет большую размерность, прирост в скорости расчетов все равно останется существенным по сравнению с последовательными алгоритмами. Следовательно, можно сделать вывод, что использование распараллеливания расчетов при помощи видеокарты ведет к существенному приросту скорости нахождения правильного расположения деталей-катодов на подвесе. В свою очередь это ведет к удешевлению стоимости применения гальванических процессов и снижает процент отбракованных изделий.

Производительность видеокарт значительно увеличивается с выходом каждого нового поколения. Современные потребительские видеокарты оснащаются еще большим количеством вычислительных блоков. Например, видеокарта Nvidia GeForce RTX 3090 Ti оснащена 10752 вычислительными блоками. Такое количество вычислительных блоков обеспечивает еще больший прирост производительности по сравнению с GeForce GTX 1060.

| Спецификации референсной видеокарты GeForce GTX 1060 | |
|--|--|
| Параметр | Значение |
| Частота ядра | 1506 (1708) МГц |
| Количество универсальных процессоров | 1280 |
| Количество текстурных блоков | 80 |
| Количество блоков блендинга | 48 |
| Эффективная частота памяти | 8000 (4×2000) МГц |
| Тип памяти | GDDR5 |
| Шина памяти | 192-бит |
| Объем памяти | 6 ГБ |
| Пропускная способность памяти | 192 ГБ/с |
| Вычислительная производительность (FP32) | около 4 терафлопс |
| Теоретическая максимальная скорость закраски | 72 гигапикселя/с |
| Теоретическая скорость выборки текстур | 121 гигатекселей/с |
| Шина | PCI Express 3.0 |
| Разъемы | Один разъем Dual Link DVI, один HDMI и три DisplayPort |
| Типичное энергопотребление | 120 Вт |
| Дополнительное питание | Один 6-контактный разъем |
| Число слотов, занимаемых в системном корпусе | 2 |

Рис. 2. Технические характеристики Nvidia GeForce GTX 1060 6GB

Стоит отметить, что современные видеокарты от компании Nvidia поддерживают технологию CUDA – программно-аппаратной архитектуры параллельных вычислений, которая позволяет существенно увеличить вычислительную производительность, благодаря использованию графических процессоров фирмы Nvidia. CUDA SDK позволяет программистам реализовывать на специальных упрощенных диалектах языков программирования C, C++ и Фортран алгоритмы, выполнимые на графических и тензорных процессорах Nvidia. Архитектура CUDA дает разработчику возможность по своему усмотрению организовывать доступ к набору инструкций графического или тензорного ускорителя и управлять его памятью. Функции, ускоренные при помощи CUDA, можно вызывать из различных языков программирования, в том числе Python.

У технологии CUDA есть множество преимуществ:

- наличие понятной документации от разработчика;
- широкий набор готовых инструментов, включающий профайлер;
- наличие готовых библиотек;
- кроссплатформенность технологии;
- технология CUDA является бесплатной.

Работу технологии CUDA можно описать следующим образом. Графический процессор GPU выступает в роли массивно параллельного сопроцессора к центральному процессору CPU. Программа на CUDA задействует как CPU, так и GPU. При этом обычный (последовательный, то есть непараллельный) код выполняется на CPU, а для массивно-параллельных вычислений соответствующий код выполняется на GPU как набор одновременно выполняющихся нитей (поток) [16]. Также важно понимать, что между нитями на CPU и нитями на GPU есть принципиальные различия:

– нити на GPU обладают крайне небольшой стоимостью создания, управления и уничтожения (контекст нити минимален, все регистры распределены заранее);

– для эффективной загрузки GPU необходимо использовать много тысяч отдельных нитей, в то время как для CPU обычно достаточно 10 – 20 нитей.

За счет того, что программы в CUDA пишутся фактически на обычном языке C, в котором добавлено небольшое число новых конструкций, программирование с применением технологии CUDA значительно сокращает время на разработку и повышает удобство работы с кодом, чем при использовании традиционного GPGPU (техника использования графического процессора видеокарты, использующая графические программные интерфейсы приложений для доступа к GPU). Также стоит отметить, что при использовании технологии CUDA в распоряжении программиста оказывается существенно больше контроля и возможностей при работе с видеокартой.

Приведем основной алгоритм работы с технологией CUDA [17]:

- 1) выделяем память на GPU;
- 2) копируем данные из памяти CPU в выделенную память GPU;
- 3) осуществляем запуск ядра (или последовательно запускаем несколько ядер);
- 4) копируем результаты вычислений обратно в память CPU;
- 5) освобождаем выделенную память GPU.

Все нити выполняются параллельно, и каждая нить может получить информацию о себе через встроенные переменные.

Во время работы программы нити разбиваются на группы по 32 нити, называемыми warp. Только нити в пределах одного warp выполняются физически одновременно. Нити из разных warp могут находиться на разных стадиях выполнения программы. При этом управление warp'ми прозрачно осуществляет сам GPU [18].

Для решения задач CUDA использует очень большое количество параллельно выполняемых нитей, при этом обычно каждой нити соответствует один элемент вычисляемых данных. Применяя возможности технологии CUDA при разработке расчетно-логической интеллектуальной системы оптимального управления процессом нанесения гальванического покрытия с применением множества деталей-катодов различных форм и размеров, можно добиться еще большего прироста скорости вычислений.

Кроме применения высокопроизводительной видеокарты в ЭВМ оператора, существуют и другие способы увеличения скорости расчета оптимального расположения деталей на подвесе. На данный момент популярным способом проведения сложных вычислений являются вычисления в «облаке». Облачные вычисления – это предоставление вычислительных ресурсов по запросу через Интернет. Ресурсами могут быть серверы, системы хранения, сети передачи данных, программное обеспечение, платформенные сервисы. Поставщики облачных услуг распределяют вычислительные ресурсы между разными заказчиками. Каждый из заказчиков получает требуемый пул мощностей или сервисов, которые при необходимости масштабируются.

Применение облачных вычислений – крайне удобный способ наращивания вычислительных мощностей. При реализации крупных проектов и расчете больших массивов данных данный способ крайне актуален, однако для применения в задачах, связанных с гальваническими линиями, возможности облачных вычислений избыточны. Не существует столь больших по объему гальванических ванн, в которых можно было бы обрабатывать сразу несколько тысяч деталей средних и крупных размеров. Таким образом, рассмотренный способ не актуален для специфики данной области.

Создание вычислительного кластера из нескольких компьютеров – еще один способ увеличения скорости вычислений при их распараллеливании. Вычислительный кластер – это набор соединенных между собой компьютеров (серверов), которые работают вместе и могут рассматриваться как единая система. В отличие от грид-вычислений, все узлы компьютерного кластера выполняют одну и ту же задачу и управляются одной системой управления.

Серверы кластера обычно соединяются между собой по быстродействующей локальной сети, причем на каждом из серверов работает собственный экземпляр операционной системы. В большинстве случаев все вычислительные узлы кластера используют одинаковое оборудование и одну и ту же операционную систему. Однако в некоторых инсталляциях, например, с использованием платформы приложений для организации кластеров OSCAR (*англ.* Open Source Cluster Application Resources), могут использоваться различные операционные системы или разное серверное оборудование. Кластеры обычно развертываются для большей производительности и доступности, чем то, что можно получить от одного компьютера, пусть даже очень мощного. Часто такое решение более экономично, чем отдельные компьютеры.

Данный способ распараллеливания вычислений актуален на крупных гальванических линиях, если на производство постоянно поступают большие партии новых видов деталей, расчеты для которых ранее не проводились. Стоит отметить, что в случае с гальваническими линиями можно применять кластер небольшого размера, состоящий из 3 – 5 рабочих станций. Их суммарной производительности будет достаточно, чтобы удовлетворить потребности производства.

Результаты экспериментов

Для подтверждения эффективности распараллеливания вычислений решена задача поиска оптимального размещения 12 различных деталей на подвесочном устройстве ванны никелирования, имеющем четыре перекладины с тремя кронштейнами для закрепления деталей на каждой перекладине (рис. 3).

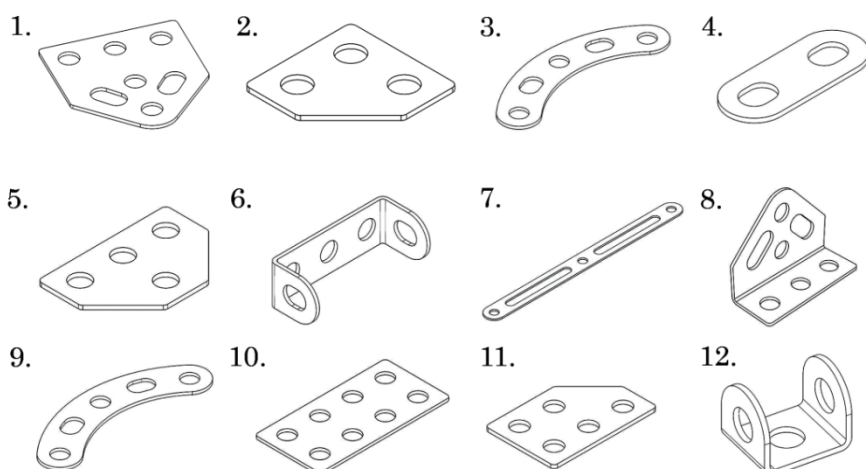


Рис. 3. Детали, на которые необходимо нанести никелевое покрытие

Таблица 1

Оптимальная матрица размещения деталей

| | $j = 1$ | $j = 2$ | $j = 3$ |
|---------|---------|---------|---------|
| $k = 1$ | 9 | 10 | 7 |
| $k = 2$ | 11 | 6 | 1 |
| $k = 3$ | 5 | 8 | 2 |
| $k = 4$ | 12 | 3 | 4 |

Процесс никелирования осуществляется в щелочном электролите Уоттса состава, г/л: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 300; $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 60; H_3BO_3 – 45. Удельная проводимость электролита $\chi = 17,75 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$, катодный выход по току $\eta = 0,98 = \text{const}$, электрохимический эквивалент никеля $\Theta = 3,04 \cdot 10^{-7} \text{ кг/(А}\cdot\text{с)}$, плотность никеля $\rho = 8900 \text{ кг/м}^3$. Время нанесения покрытия 30 мин.

Расчеты методом полного перебора при последовательных и распараллеленных вычислениях дали одинаковый оптимальный результат (табл. 1).

Для данного размещения критерий $R = 0,0833$ – всего для одной детали не выполнилось условие (2).

Поиск оптимального решения осуществлялся с использованием процессора IntelCorei3-10100 и видеокарты MSI GeForce GTX 1060 6GB.

Анализ времени, затраченного на поиск оптимального решения, показал, что последовательный расчет методом полного перебора продолжался 5 ч 27 мин; расчет с использованием распараллеливания вычислений при помощи видеокарты с поддержкой технологии CUDA – 32 мин.

Таким образом, можно сделать вывод, что в данном случае применение распараллеливания вычислений ускорило выполнение задачи поиска оптимального размещения 12 различных деталей на подвесочном устройстве ванны никелирования в 10,2 раза.

Заключение

Рассматриваемая задача поиска оптимального расположения деталей-катодов на подвеске при большой размерности требует существенных вычислительных мощностей, поэтому необходимо разрабатывать высокопроизводительные алгоритмы, использующие современные аппаратные технологии, которые могут решать столь сложные задачи за приемлемое время.

Применение технологии распараллеливания расчетов CUDA при помощи видеокарты значительно повышает эффективность работы системы оптимального управления процессом нанесения гальванического покрытия с применением множества деталей-катодов различной формы и размеров [19]. Снижается время расчета, повышается удобство работы оператора гальванической линии. В связи с этим повышается эффективность работы гальванического производства.

Список литературы

1. Кудрявцев, Н. Т. Электролитические покрытия металлами : учеб. пособие / Н. Т. Кудрявцев. – М. : Химия, 1979. – 351 с.
2. Гальванические покрытия в машиностроении : справочник : в 2-х томах / Под ред. М. А. Шлугера. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 240 с.
3. Мельников, Л. С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / Л. С. Мельников. – М. : Машиностроение, 1991. – 384 с.
4. Васильев, А. С. Постановка задачи оптимального нанесения гальванических покрытий на множество деталей / А. С. Васильев, Ю. В. Литовка // Математические методы в технике и технологиях : материалы XVIII Междунар. науч. конф., 31 мая – 02 июня 2005 г., Казань. – Казань, 2005. – Т. 10. – С. 101–102.
5. Каданер, Л. И. Равномерность гальванических покрытий / Л. И. Каданер. – Харьков : Харьковский ордена Трудового Красного Знамени гос. университет им. А. М. Горького, 1960. – 414 с.
6. Литовка, Ю. В. Метод расчета потенциалов анодов в многоанодной гальванической ванне / Ю. В. Литовка, И. А. Дьяков // Теоретические основы химической технологии. – 1997. – Т. 31, № 2. – С. 218 – 221.
7. Соловьев, Д. С. Оптимальное управление технологическим процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с дополнительными катодами и биполярными электродами / Д. С. Соловьев, В. З. Као, Ю. В. Литовка // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 8. – С. 547 – 553. doi: 10.17587/mau.17.547-553
8. Литовка, Ю. В. Оптимизация размещения многокатодной системы с целью минимизации суммарной неравномерности гальванического покрытия / Ю. В. Литовка, А. А. Банников // Современные технологии в задачах управления автоматикой и обработки информации : материалы XXVIII Междунар. науч.-техн. конф., 14 – 20 сентября 2019 г., Алушта. – М., 2019. – С. 66–67.
9. Гнусин, Н. П. Основы теории расчета и моделирования электрических полей в электролитах / Н. П. Гнусин, Н. П. Поддубный, А. И. Маслий. – Новосибирск : Наука, 1972. – 276 с.
10. Иванов, В. Т. Численные расчеты электрических полей в электролитах на основе метода квазилинеаризации / В. Т. Иванов // Электрохимия. – 1972. – Т. 8, № 11. – С. 1654 – 1657.
11. Литовка, Ю. В. Моделирование и оптимизация процесса нанесения гальванических покрытий в условиях реверсирования тока / Ю. В. Литовка, А. В. Романенко, А. В. Афанасьев // Теоретические основы химической технологии. – 1998. – Т. 32, № 3. – С. 301 – 304.

12. Литовка, Ю. В. Моделирование и оптимизация импульсных токовых режимов нанесения гальванических покрытий / Ю. В. Литовка, Р. С. Кондрашин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1999. – Т. 5, № 1. – С. 26 – 33.
13. Литовка, Ю. В. Моделирование и оптимизация гальванической ванны с дополнительными катодами / Ю. В. Литовка, В. З. Као // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 68 – 74. doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.068-074
14. Высшая математика : учебно-методическое пособие. В 4 ч. Ч. 4. Математическое программирование / Сост. Т. В. Веремеенко ; под ред. Л. Г. Третьяковой. – 2-е изд., испр. – Минск : ГИУСТБГУ, 2010. – 158 с.
15. Набатова, Д. С. Математические и инструментальные методы поддержки принятия / Д. С. Набатова. – М. : Юрайт, 2017. – 292 с.
16. Сандерс, Дж. Технология CUDA в примерах: введение в программирование графических процессов / Дж. Сандерс, Э. Кэндрот ; пер. с англ. А. А. Слинкина. – М. : ДМК Пресс, 2013. – 232 с.
17. Боресков, А. В. Основы работы с технологией CUDA / А. В. Боресков, А. А. Харламов. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 232 с.
18. Козлов, С. О. Использование технологии CUDA при разработке приложений для параллельных вычислительных устройств / С. О. Козлов, А. А. Медведев // Вестн. Курганского гос. ун-та. Серия: Естественные науки. – 2015. – № 4 (38). – С. 106 – 112.
19. Литовка, Ю. В. Система управления многокатодной гальванической ванной / Ю. В. Литовка, А. А. Банников // Современные технологии в задачах управления автоматикой и обработки информации : материалы XXIX Междунар. науч.-техн. конф., 14 – 20 сентября 2020 г., Алушта. – СПб., 2020. – С. 42.

Solution of the Control Problem of Uneven Plating Using Parallel Processing of Information

A. A. Bannikov¹, Yu. V. Litovka¹, G. V. Shishkina²

*Departments of Automated Decision Support Systems (1), sapr.tstu@mail.ru;
Mechatronics and Technological Measurements (2), TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: video card; electroplated coatings; detail; unevenness; optimal placement; parallelization; calculation.

Abstract: The problem of finding the optimal arrangement of cathode parts on the suspension, in which the total unevenness of the resulting galvanic coatings is minimal, is considered. Methods for accelerating the calculation of the optimal location with the help of modern technologies used in computers are proposed. The results of experiments confirming the efficiency of parallelization of calculations on a video card using the CUDA technology are presented.

References

1. Kudryavtsev, N.T. *Elektroliticheskiye pokrytiya metallami: uchebnoye posobiye* [Electrolytic coatings with metals: textbook], Moscow: Khimiya, 1979, 351 p. (In Russ.)
2. Shluger M.A. [Ed.] *Gal'vanicheskiye pokrytiya v mashinostroyenii: spravochnik: v 2-kh tomakh* [Galvanic coatings in engineering: a reference book: in 2 volumes], Moscow: Mashinostroyeniye, 1985, vol. 1, 240 p. (In Russ.)

3. Mel'nikov L.S. *Spravochnik po gal'vanopokrytiyam v mashinostroyenii* [Handbook of electroplating in mechanical engineering], Moscow: Mashinostroyeniye, 1991, 384 p. (In Russ.)
4. Vasil'yev A.S., Litovka Yu.V. *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh* [Mathematical methods in engineering and technology], Proceedings of the XVIII International Scientific Conference, 31 May - 02 June, 2005, Kazan, 2005, vol. 10, pp. 101-102. (In Russ.)
5. Kadaner L.I. *Ravnomernost' gal'vanicheskikh pokrytiy* [Uniformity of galvanic coatings], Kharkov: Khar'kovskiy ordena Trudovogo Krasnogo Znameni gosudarstvennyy universitet im. A. M. Gor'kogo, 1960, 414 p. (In Russ.)
6. Litovka Yu.V., D'yakov I.A. [Method for calculating the potentials of anodes in a multi-anode galvanic bath], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 1997, vol. 31, no. 2, pp. 218-221. (In Russ.)
7. Solov'yev D.S., Kao V.Z., Litovka Yu.V. [Optimal control of the electroplating process in a bath with additional cathodes and bipolar electrodes], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye* [Mechatronics, automation, control], 2016, vol. 17, no. 8, pp. 547-553, doi: 10.17587/mau.17.547-553 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Litovka Yu.V., Bannikov A.A. *Sovremennyye tekhnologii v zadachakh upravleniya avtomatiki i obrabotki informatsii* [Modern technologies in the problems of control of automation and information processing], Proceedings of the XXVIII International Scientific and Technical conference, 14 - 20 September, 2019, Alushta, Moscow, 2019, pp. 66-67. (In Russ.)
9. Gnusin N.P., Poddubnyy N.P., Masliy A.I. *Osnovy teorii rascheta i modelirovaniya elektricheskikh poley v elektrolitakh* [Fundamentals of the theory of calculation and modeling of electric fields in electrolytes], Novosibirsk: Nauka, 1972, 276 p. (In Russ.)
10. Ivanov V.T. [Numerical calculations of electric fields in electrolytes based on the quasi-linearization method], *Elektrokhiimiya* [Electrochemistry], 1972, vol. 8, no. 11, pp. 1654-1657. (In Russ.)
11. Litovka Yu.V., Romanenko A.V., Afanas'yev A.V. [Modeling and optimization of the electroplating process under current reversal conditions], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 1998, vol. 32, no. 3, pp. 301-304. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Litovka Yu.V., Kondrashin R.S. [Modeling and optimization of pulsed current modes of electroplating], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1999, vol. 5, no. 1, pp. 26-33. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Litovka Yu.V., Kao V.Z. [Modeling and optimization of a galvanic bath with additional cathodes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 68-74, doi: 10.17277/vestnik.2016.01.pp.068-074 (In Russ., abstract in Eng.)
14. Veremeyenko T.V. [Comp.], Tret'yakova L.G. [Ed.] *Vysshaya matematika: uchebno-metodicheskoye posobiye. V 4 ch. Ch. 4. Matematicheskoye programirovaniye* [Higher mathematics: teaching aid. At 4 pm Part 4. Mathematical programming], Minsk: GIUSTBGU, 2010, 158 p. (In Russ.)
15. Nabatova D.S. *Matematicheskiye i instrumental'nyye metody podderzhki prinyatiya* [Mathematical and instrumental methods of acceptance support], Moscow: Yurayt, 2017, 292 p. (In Russ.)
16. Sanders Dzh., Kendrot E. *Tekhnologiya CUDA v primerakh: vvedeniye v programirovaniye graficheskikh protsessov* [CUDA technology in examples: an introduction to the programming of graphical processes], Moscow: DMK Press, 2013, 232 p. (In Russ.)

17. Borekov A.V., Kharlamov A.A. *Osnovy raboty s tekhnologiyey CUDA* [Fundamentals of working with CUDA technology], Moscow: DMK Press, 2010, 232 p. (In Russ.)

18. Kozlov S.O., Medvedev A.A. [The use of CUDA technology in the development of applications for parallel computing devices], *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye nauki* [Bulletin of the Kurgan State University. Series: Natural Sciences], 2015, no. 4 (38), pp. 106-112. (In Russ., abstract in Eng.)

19. Litovka Yu.V., Bannikov A.A. *Sovremennyye tekhnologii v zadachakh upravleniya avtomatiki i obrabotki informatsii* [Modern technologies in the tasks of controlling automation and information processing], Proceedings of the XXIX International Scientific and Technical Conference, 14 - 20 September, 2020, Alushta, St. Petersburg, 2020, p. 42. (In Russ.)

Lösung des Problems der Kontrolle der Ungleichmäßigkeit der galvanischen Abdeckung durch parallele Informationsverarbeitung

Zusammenfassung: Es ist das Problem betrachtet, die optimale Anordnung von Teilkathoden auf der Aufhängung zu finden, bei der die Gesamtunebenheit der resultierenden galvanischen Schichten minimal ist. Die Methoden zur Beschleunigung der Berechnung des optimalen Standorts mit Hilfe moderner Computertechnologien sind vorgeschlagen. Es sind die Ergebnisse von Experimenten vorgestellt, die die Effizienz der Parallelisierung von Berechnungen auf einer Grafikkarte unter Verwendung der CUDA-Technologie bestätigen.

Résolution du problème de la gestion de l'hétérogénéité de la couverture galvanique avec l'utilisation du traitement parallèle de l'information

Résumé: Est examinée la tâche de trouver l'emplacement optimal des pièces-cathodes sur la suspension, dans lequel l'irrégularité totale des revêtements galvaniques obtenus est minimale. Sont proposés les moyens d'accélérer les calculs de l'emplacement optimal à l'aide de technologies modernes utilisées dans les ordinateurs. Sont présentés les résultats des expériences qui confirment l'efficacité de la parallélisation des calculs sur la carte vidéo à l'aide de la technologie CUDA.

Авторы: *Банников Андрей Алексеевич* – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; *Литовка Юрий Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; *Шишкина Галина Викторовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.