

Н. А. Дёмина,
канд техн. наук

Таврический государствен-
ный агротехнологический
университет,
г. Мелитополь, e-mail:
deminanatasha@yandex.ru

УДК 539.3

ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

Запропоновано для оперативного моделювання напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення застосувати експрес-моделі. Вони дають змогу із достатньою точністю визначити задовільні для практики якісні та кількісні залежності характеристик напружено-деформованого стану елементів розділових штампів від конструктивно-технологічних параметрів. На прикладі вирубної матриці штампа досліджено зміну технологічного зазору залежно від її висоти та товщини.

Ключові слова: математична модель, параметрична модель, експрес-модель, розділова операція листової штамповки, матриця, напружено-деформований стан, баланс переміщень.

Введение

При моделировании процесса листовой штамповки [1–3] одним из актуальных вопросов является исследование баланса перемещений и уровней напряжений в области режущих кромок элементов штамповой оснастки. При этом в процессе деформирования кромок режущего инструмента происходит изменение номинального зазора. Вследствие этого соответственно изменяются и условия разделения материала. В работах [3, 4] вопросу взаимодействия элементов технологической системы «режущий инструмент – штамп – пресс – штампуемый материал» уделено значительное внимание. Естественно, что более полноценные результаты моделирования следует ожидать при использовании сложных физических, математических и численных моделей, учитывающих контактное взаимодействие, трение, пластичность, разрушение и другие нелинейные эффекты, сопровождающие процесс разделения листового материала [1–3]. Однако такие модели приводят к необходимости решения громоздких задач, требующих значительных вычислительных ресурсов и временных затрат. В то же время представляет значительный интерес вопрос качественного предварительного экспресс-анализа влияния некоторых параметров на поведение элементов исследуемой технологической системы. С этой точки зрения представляется актуальной и важной такая частная задача как, например, определение вклада перемещений точек матрицы разделительного штампа (РШ) в общий баланс перемещений в межкромочной зоне с использованием экспресс-модели. Для этого были использованы упрощенные расчетные модели матрицы, обоснованные частично в [3].

Постановка задачи

Проведение теоретических и экспериментальных исследований прочности и жесткости наиболее ответственных и нагруженных элементов разделительных штампов в процессе их проектирования, изготовления и эксплуатации обуславливает необходимость решения задачи анализа напряженно-деформированного состояния (НДС), в первую очередь, матриц РШ как потенциально вносящих наибольший вклад в баланс перемещений в зоне разделения штампуемого материала. Подробно методика проведения данного исследования приведена в работе [4]. Там же решена задача определения зависимости НДС матриц РШ от их конструктивных параметров и, в частности, от толщины стенки. В данной же работе, кроме указанной, также решена задача анализа жесткостных параметров матриц РШ при варьировании их высоты. В основу выполненной работы положены многовариантные расчеты напряженно-деформированного состояния матриц, представляющих собой тела вращения, при осесимметричном нагружении.



Рис. 1. Конструкция, параметры и расчетные схемы вырубной матрицы штампа в виде тела вращения

Методика исследований

Для оперативного анализа НДС матриц как элементов единой системы «режущий инструмент – заготовка» была проведена серия многовариантных численных расчетов с варьированием различных параметров и конструктивных схем исполнения инструмента, свойств и толщины штампуемого материала. На рис. 1 приведены расчетные схемы вырубной матрицы штампа. Здесь p_1 – контактное давление на режущей кромке матрицы, распределенное по кольцу шириной a , которое можно вычис-

лить из соотношения [5]; $\int_{d_1/2}^{d_1/2+a} p_{1(r)} 2\pi r dr + F = P_1$; p_2 – распирающее давление, действующее на внутреннюю цилиндрическую поверхность высотой b до момента скола штампуемой детали; F – усилие проталкивания, равное по величине силе трения между матрицей и деталью.

Суммарная величина усилия вырубки P_1 определяется по классической формуле [5]

$$P_1 = k\sigma_{cp}L^p t. \tag{1}$$

Здесь k – коэффициент запаса, принимаемый обычно 1,2–1,3; σ_{cp} – сопротивление срезу штампуемого материала; L^p – периметр вырубяемого контура, в данном случае равный πd_1 ; t – толщина штампуемого материала.

Конкретизируем некоторые параметры расчетной схемы матрицы. Значения ширины кольца контакта a штампуемого материала с матрицей и глубины его внедрения b до момента скола были ранее определены экспериментально [6] и численно [1–3]. Установлено [3, 4], что эти величины зависят от толщины, свойств штампуемого материала, а также относительного зазора между режущими кромками и т. д. При этом в среднем с достаточной для практики точностью принимаем $a = 0,5t$; $b = 0,1t$. Величину распирающего усилия p_2 , равного $0,35p_1$ [7], можно определить из соотношения

$$\int_{h_1-b}^{h_1} p_2(z)\pi d_1 dz = 0,35P_1. \text{ Давление } p_2 \text{ на стенки матрицы из соображений малости ширины участка}$$

распределения принято равномерным, т. е. $p_2(z) = \text{const}$. Поэтому, принимая значение коэффициента трения между внутренней поверхностью матрицы и проталкиваемой деталью равным 0,3, можно записать $F = 0,3P_2$. На основе анализа результатов экспериментов распределение контактного давления p_1 принимается линейным.

Результаты исследований

При исследовании НДС вырубных матриц проведено исследование влияния относительной толщины стенки (внутренние диаметры принимали значения 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100 и 150 мм, для каждого из которых наружные варьировали от 1,03 до $5,0d_1$) и толщины штампуемого материала на законы распределения и величины напряжений и перемещений (исследования проводили на вырубной матрице с размерами: $d_1 = 30$ мм; $d_2 = 31$ мм; $d_3 = 50$ мм; $h_1 = 30$ мм; $h_2 = 10$ мм). В целом качественно и количественно полученные картины распределения компонент напряженно-деформированн-

ного состояния, а также интегральные зависимости характеристик НДС находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными в [4]. Это является дополнительным подтверждением адекватности и точности построенных автором моделей, а также оправдывает их применение для многовариантных исследований.

Рассмотрим матрицу РШ в виде тела вращения. Геометрия ее задается с помощью следующих параметров: диаметров $d(d_1, d_2, d_3)$ и высот $z(h_1, h_2)$ (см. рис. 1). Толщину стенки матрицы определяем по формуле $h = (d_3 - d_1)/2$.

Рассмотрим схему нагружения матрицы РШ. Ее верхняя кромка нагружена усилиями штамповки. Их величины определяются на основе теоретических и экспериментальных исследований законов распределения контактных давлений в зоне взаимодействия штампуемого материала с режущими кромками, подробно изложенных в работах [8, 9]. На основе анализа результатов, представленных в этих работах, сделан вывод о возможности (с достаточной степенью точности) описания закона распределения контактных давлений в первом приближении, как отмечалось выше, линейной зависимостью от координаты r .

Основные конструктивные параметры матрицы СШ, мм

d_1	d_3	h	h_1	h_2
30	50	10	4	4
			7	7
			10	5
			15	10
			20	10
			30	20
			50	40
			75	65
			100	90
			200	190

В качестве граничных условий принят случай свободного опирания матрицы с возможным проскальзыванием по плоскости $z = 0$: $u_z|_{z=0} = 0$; $\tau_{rz}|_{z=0} = 0$, где u_z – осевые перемещения точек матрицы, τ_{rz} – касательные напряжения.

Исследование матриц РШ проводилось на 10 вариантах конструкций, основные параметры которых приведены в таблице. С использованием разработанного программного обеспечения проведены исследования зависимостей характеристик напряженно-деформированного состояния матриц РШ с набором конструктивных параметров, приведенных в таблице, от ее высоты. Расчеты производились при значениях $\sigma_{cp} = 100$ МПа и $\sigma_{cp} = 1000$ МПа, $\rho = 0,35$, $k_T = 0,3$, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0,28$. Толщина штампуемого материала $t = 1$ мм. Усилие штамповки определено по формуле (1) и равно 9,4 кН, усилие распираия – 3,3 кН, усилие трения – 1,0 кН при $\sigma_{cp} = 100$ МПа и соответственно 94 кН, 33 кН и 10 кН при $\sigma_{cp} = 1000$ МПа.

Как показал анализ полученных результатов, наибольшее влияние изменение высоты матрицы $H = h_1$ оказывает на ее деформированное состояние. Схемы деформирования матриц при увеличении высоты H от 4 мм до 200 мм с постоянной толщиной стенки матрицы $h = 10$ мм приведены на рис. 2. Видно, что с ростом высоты матрицы растут перемещения u_z . Для малых высот H характерно смещение точек режущих кромок в направлении оси r (происходит распираие матрицы в зоне режущей кромки). При $15 \text{ мм} \leq H < 75 \text{ мм}$ наблюдается сужение матрицы в зоне режущей кромки. При достаточно больших высотах ($H \geq 75 \text{ мм}$) характерно волнообразное распираие матрицы вдоль образующей в области, примыкающей к режущей кромке. Для матриц высотой $H \geq 75 \text{ мм}$ происходит монотонное снижение перемещения $u_r^{(кр)}$ до 0,1 мкм. Перемещения $u_z^{(max)}$ растут с увеличением высоты матрицы от 2,0 мкм для матрицы высотой $H = 4 \text{ мм}$ до 10,5 мкм для матрицы высотой $H = 200 \text{ мм}$.

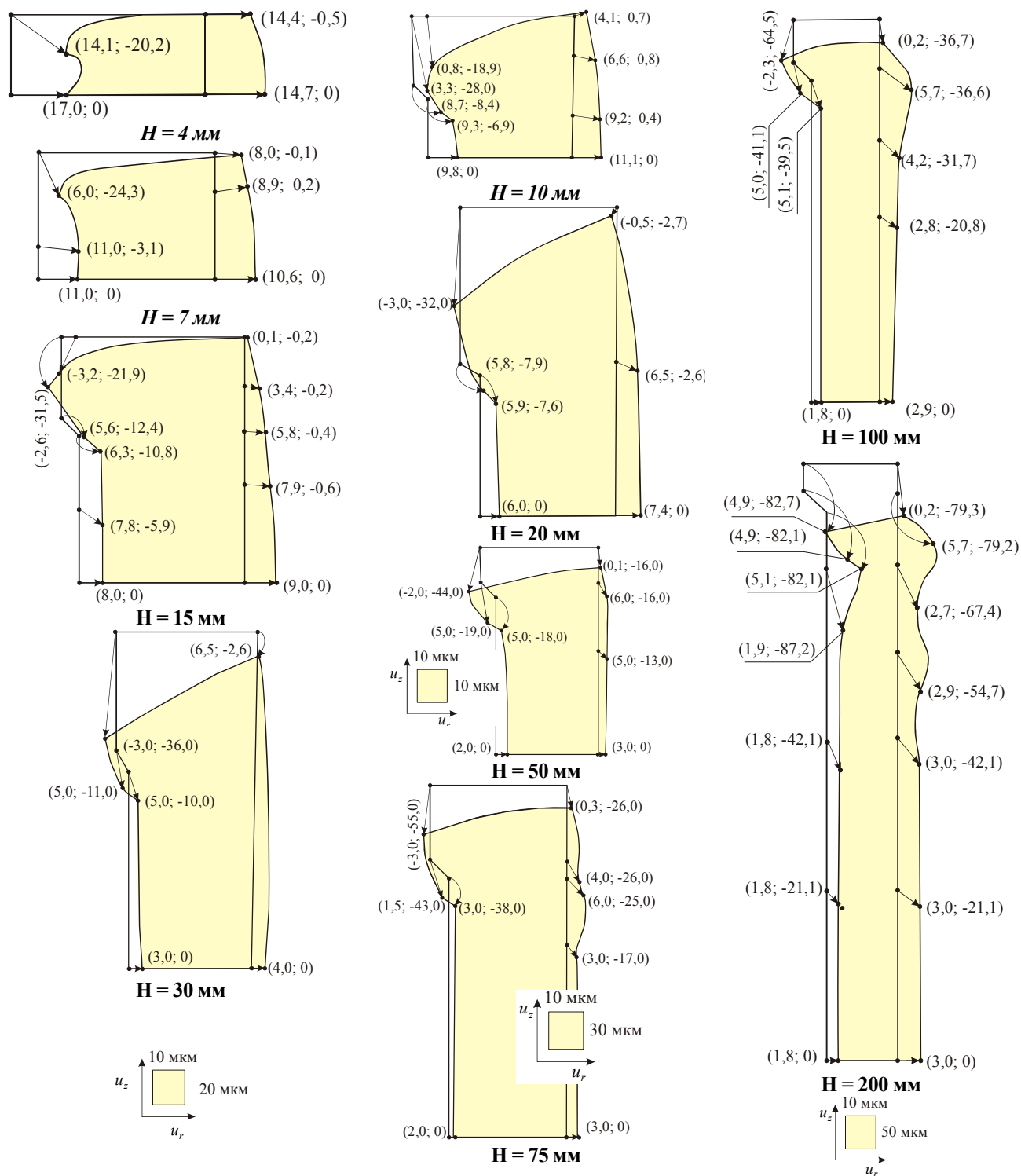


Рис. 2. Схемы деформирования матриц при изменении высоты с постоянной толщиной стенки

Таким образом, получаем параметры, характеризующие деформированное состояние матриц РШ: $u_r^{(max)}$, $u_r^{(кр)}$, $u_z^{(max)}$. Распределение напряжений в исследованных матрицах соответствует в основных чертах результатам, приведенным в [10]. Для иллюстрации картины распределения эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ (по Мизесу) для матрицы РШ высотой 4 мм и 20 мм представлены на рис. 3. Отличительной особенностью напряженного состояния матриц РШ малой высоты ($H \leq 15$ мм) является распространение зоны высоких напряжений на область подошвы матрицы. Картина распределения напряжений σ_z – доминирующих для матриц СШ – при $z = 0$ носит явно выраженный неравномерный характер в отличие от близкого к равномерному закону распределение σ_z по координате r для матриц с $H \geq 20$ мм. Но величины максимальных значений σ_z^{max} , наблюдающихся на внутренней стенке матрицы на расстоянии $(0,1-0,15) \cdot t$ от режущей кромки, и значение $\sigma_z^{кр}$ на режущей кромке неизменны для всех высот и примерно равны соответственно 450 МПа и 425 МПа.

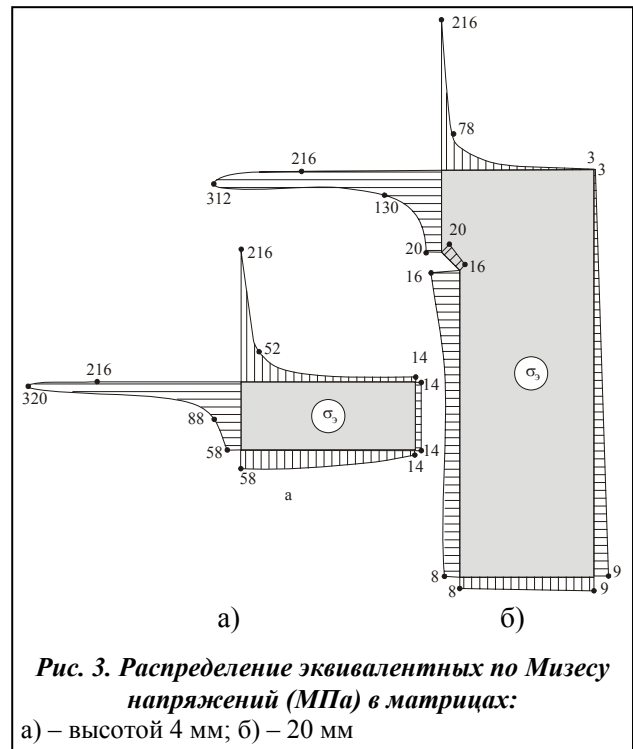


Рис. 3. Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений (МПа) в матрицах: а) – высотой 4 мм; б) – 20 мм

Выводы

Анализ картин распределений перемещений, напряжений и интегральных зависимостей перемещений и напряжений точек режущей кромки матрицы РШ служит основой для следующих основных выводов.

1. Эквивалентные напряжения в зоне режущей кромки матрицы имеют примерно одинаковый уровень при варьировании ее высоты – 205÷230 МПа при $\sigma_{ср} = 100$ МПа.

2. Максимальные эквивалентные напряжения $\sigma_{экв}^{max}$ достигаются в зоне внутренней стенки матрицы на удалении $(0,1-0,15) \cdot t$ мм от режущей кромки и слабо изменяются в диапазоне 315÷320 МПа при варьировании высоты матрицы.

3. Деформированное состояние матриц существенно зависит от их высоты. При этом условно можно выделить матрицы: низкие ($H < d/3$, $d = d_1$ – внутренний диаметр матрицы); средней высоты $d/3 < H < d/2$; высокие ($H > d/2$). Для низких матриц характерно их распирание во всех сечениях; уменьшение высоты матрицы происходит вдоль внутренней образующей $r = d/2$, внешняя образующая $r = d_3/2$ укорачивается незначительно или даже растягивается. Матрицы средней высоты испытывают сужение в зоне режущей кромки и распирание в средней части и при приближении к подошве. Все сечения $z = const$ матрицы осаживаются в направлении действия усилий штамповки, причем укорочение внутренней образующей на порядок выше, чем наружной. Для высоких матриц характерной особенностью является волнообразный характер распирания сечений $z = const$ при движении вдоль образующих в зоне режущей кромки, а также примерно равномерная осадка данных сечений в направлении действия усилия штамповки; доминирующими являются осевые перемещения точек матриц.

В дальнейшем планируется проведение с использованием экспресс-моделей аналогичного типа исследование НДС других элементов технологической системы разделительных операций листовой штамповки.

Литература

1. Демина, Н. А. Математическое моделирование контактного взаимодействия системы призматических тел / Н. А. Демина // Пробл. машиностроения. – 2014. – Т. 17, № 3. – С. 52–56.
2. Демина, Н. А. Параметрические модели для исследования контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки / Н. А. Демина // Пробл. машиностроения. – 2014. – Т. 17, № 4. – С. 31–35.

3. Дьоміна, Н. А. Удосконалення методів розрахунку елементів штампового оснащення на основі аналізу їх напружено-деформованого стану: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. А. Дьоміна – Харків, 2011. – 20 с.
4. Заярненко, Е. И. Разработка математических моделей и расчеты на прочность разделительных переналаживаемых штампов: Дис. ... д-ра техн. наук / Е. И. Заярненко. – Харьков, 1992. – 280 с.
5. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
6. Мовшович, И. Я. Исследование сопротивления срезу при штамповке листового материала / И. Я. Мовшович, Е. И. Заярненко, В. А. Долгов // Технология и организация производства. – 1975. – № 2. – С. 28–30.
7. Гнучий, Ю. Б. Анализ результатов численного моделирования процесса вырубке-пробивки / Ю. Б. Гнучий, В. М. Смирнягин // Вестн. Киевск. политехн. ин-та. – К.: Машиностроение, 1986. – № 23. – С. 12–22.
8. Артюхов, В. П. Исследование распределения напряжений в элементах вырубных штампов методом фотоупругости / В. П. Артюхов, В. И. Савченко // Кузнеч.-штамп. пр-во. – 1970. – № 11. – С. 24–26.
9. Елистратов, В. И. Исследование нормальных напряжений по торцу твердосплавных пуансонов при вырубке-пробивке / В. И. Елистратов // Кузнеч.-штамп. пр-во. – 1973. – № 8. – С. 21–24.
10. Львов, Г. И. Моделирование и анализ элементов технологических систем листовой штамповки / Г. И. Львов, Н. А. Ткачук // Механіка та машинобудування. – 1997. – № 1. – С. 34–39.

Поступила в редакцію 11.11.14

А. В. Панкратов, д-р. техн. наук
Т. Е. Романова, д-р. техн. наук
А. А. Коваленко

Институт проблем
 машиностроения
 им А. Н. Подгорного
 НАН Украины, Харьков,
 e-mail: AnnKovalenko@email.ua

УДК 519.85

ЗАДАЧА РАВНОВЕСНОЙ КОМПОНОВКИ ЦИЛИНДРОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОНТЕЙНЕРЕ МИНИМАЛЬНОГО РАДИУСА

Розглядається задача рівноважної компоновки однорідних кругових циліндрів на стелажках циліндричного контейнера з урахуванням обмежень поведінки таким чином, щоб радіус контейнера і відхилення центра мас механічної системи від заданого значення були мінімальними. Будується математична модель рівноважної компоновки циліндричних об'єктів у вигляді задачі нелінійного програмування з використанням ρ -функцій. Пропонується ефективний алгоритм пошуку локально-оптимальних розв'язків. Наводяться результати чисельних експериментів.

Ключові слова: *рівноважна компоновка, циліндри, обмеження поведінки, математичне моделювання, нелінійне програмування*

Введение

Оптимизационные 3D-задачи *равновесной компоновки (balance layout problem)* цилиндрических объектов имеют широкий спектр научных и практических применений, в частности, в ракетно-космическом машиностроении [1]. Отличительной чертой этого класса задач является необходимость учета *ограничений поведения (behavior constraints)*, включая ограничения на центр масс, осевые и центробежные моменты инерции механической системы. Под механической системой понимается упрощенная модель космического аппарата, которая представляет собой контейнер с *опорными стеллажами (bearing plates)* (корпус космического аппарата) и размещаемые на стеллажах объекты (оборудование). Часто контейнер и объекты имеют цилиндрическую форму. Кроме упомянутых выше ограничений поведения, обязательными являются *ограничения размещения*, учитывающие непересечение объектов и включение объектов в контейнер.

Многие публикации (например, [2–4]) посвящены исследованию задач *равновесной компоновки цилиндрических объектов* и разработке эффективных алгоритмов для их решения. В большинстве из них предлагаются эвристические алгоритмы. Для построения адекватных математических моделей *равновесной компоновки* в виде задач нелинейного программирования необходимо описание всех ограничений в аналитическом виде.