МЦ45407

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

Байрамов Олег Фёдорович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВНУТРЕННЕЙ РАСКАТКИ ОБОЛОЧЕК НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Специальность 05.03.05 - Процессы и машины обработки давлением

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва - 1986

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель – академик ЦЕЛИКОВ А.И.
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор ЛУГОВСКОЙ В.М.

кандидат технических наук, доцент ДАНИЛОВ В.Л.

Ведущее предприятие – ПО "Электростальтяжмаш", министерство тяжёлого и транспортного машиностроения

Защита диссертации состоится "15" октября 1986 г. в _____ на заседании специализированного Совета К 053.15.13 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзы
Просьба выслa
С диссер
им. Н.Э. Баум

Авторефе

Учён
специал
к.

Зак 879 90 экз.
Объём 1 п.л.

М445407

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В основных направлениях экономического развития СССР поставлена задача до 2000 года удвоить выпуск продукции машиностроения при одновременном снижении металлоёмкости оборудования в 2 раза. Для выполнения этой задачи необходимо освоение таких методов получения новых изделий, которые обеспечивают наиболее эффективное использование металла за счёт приближения формы заготовки к форме и размерам готового изделия. Весьма перспективным является применение способов обработки металлов давлением (ОМД) в виде процессов с локализованным очагом деформации, имеющих повышенные возможности в смысле энергосбережения и точности размеров.

В связи с этим, для удовлетворения потребностей ряда отраслей народного хозяйства в бесшовных цилиндрических оболочках из высокопрочных алюминиевых сплавов, все большее распространение находят процессы раскатки.

Опыт эксплуатации раскатных станов в СССР и за рубежом свидетельствует, что освоение новых мощностей не может идти по пути только технологических разработок и простого количественного изменения параметров машин, который в определённых случаях приводит к неоправданному завышению металлоёмкости агрегатов и браку, вследствие неправильного назначения технологических режимов.

Поэтому задача исследования процесса получения оболочек большого диаметра (1.5-2 метра и более) на основе современного теоретического и экспериментального анализа и создание методики расчёта параметров мощных станов внутренней раскатки является актуальной.

Цель работы. Разработка общей методики расчёта параметров процесса внутренней раскатки цилиндрических изделий и обоснование энергосиловых и технологических условий получения оболочек большого диаметра.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Поставлена и решена плоская упругопластическая задача о напряжённом состоянии очага деформации при внутренней раскатке с учётом реальных физико-механических свойств материалов и контактного трения.

1445407

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана



1445407

Байрамов О.Ф.Разработка ме

МВТ
им. Н.Э.
БИБЛИО

На основе плоской модели деформации разработана методика определения основных параметров процесса, которая позволяет рассчитывать энергосиловые параметры и технологические режимы получения цилиндрических оболочек большого диаметра с необходимой точностью.

2. Для практического решения упругопластических задач ОМД применён метод граничных интегральных уравнений (метод ГИУ).

3. Осуществлены экспериментальные исследования внутренней раскатки оболочек из алюминиевых сплавов 1201 и 1560 диаметром 1900 мм на стане ХПКТ-2000 (ВНИИМЕТМАШ).

Практическая ценность. Предлагаемая методика расчёта позволяет моделировать процесс внутренней раскатки в широком диапазоне изменения технологических параметров – от раскатки малогабаритных труб до производства цилиндрических изделий диаметром несколько метров.

Разработанный пакет программ, реализованный на ЭВМ единой серии, предназначен для определения основных характеристик раскатных станов и может быть использован в системах автоматизированного проектирования.

Построенная теоретическая модель процесса даёт возможность резко сократить количество натурных испытаний, стоимость которых особенно высока для изделий большого диаметра.

Реализация работы. Результаты и рекомендации, предложенные в работе, использованы в НПО ВНИИМЕТМАШ им. А.И.Целикова при проектировании промышленного раскатного стана. Произведён расчёт геометрических и энергосиловых параметров процесса раскатки, определены области допустимых технологических режимов.

Апробация работы. По основным разделам работы сделаны доклады на научных семинарах кафедры "Автоматизированные металлургические машины и агрегаты" МВТУ им. Н.Э.Баумана (1984 г., 1986 г.), на 2-м рабочем совещании по методу граничных интегральных уравнений на базе НИВЦ АН СССР г. Пущино (1985 г.), на научно-техническом семинаре ВНИИМЕТМАШ (1986 г.).

Публикации. Содержание основных разделов диссертации изложено в 5 публикациях.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и результатов, а также приложений. Она изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 121 наименования.

Глава I СУЩЕСТВО ВОПРОСА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время в авиационной промышленности, энергетике, а также в ряде других отраслей народного хозяйства, используются оболочки большого диаметра в виде цилиндрических конструкций с повышенной жёсткостью и коррозионной стойкостью, элементов магистральных трубопроводов, резервуаров и т.д.

Анализ различных способов получения подобных изделий показывает большие технологические преимущества способа раскатки перед другими. Перспективность раскатки, как вида ОМД, обусловлена несколькими причинами: достигается высокая точность и качество поверхности изделия, раскаткой обрабатывается большинство материалов, малы усилия деформирования.

В развитых капиталистических странах несколько десятков фирм занимаются разработкой и эксплуатацией различного раскатного оборудования. В Советском Союзе получили промышленное распространение станы наружной и внутренней раскатки и ротационного выдавливания, созданные во ВНИИМЕТМАШ, ВИЛС, ЭЗТМ, НИАТ.

Из двух способов раскатки - наружной и внутренней - для получения оболочек большого диаметра (D > 1500 мм) способ внутренней раскатки обладает рядом преимуществ: достигается более высокая точность по толщине стенки и диаметру, образуется винтообразная волокнистость, имеется экономия в размерах и массе оборудования.

Процессы раскатки являются предметом экспериментальных и теоретических исследований около 25 лет. Опираясь на классические труды А.А.Ильюшина, Р.Хилла, А.И.Целикова большой вклад в разработку теории и технологии процесса внесли советские исследователи Баркая В.Ф., Казакевич И.И., Арутюнов И.Г., Верник Ю.А., Сиротинский М.С., Шинкаревич Ю.П., Гредитор М.А. и другие, а также зарубежные учёные Томсен Э., Кобаяши Ш.

Существующая теория и разработанная на её основе методика расчёта энергосиловых параметров (ЭСП) раскатных станов средней мощности опирается на одномерную модель деформации, испо-

льзование которой при описании процесса получения крупногабаритных оболочек приводит к сильно завышенным результатам, неправильному выбору технологических параметров, и, в конечном счёте, препятствует широкому внедрению процесса в промышленность.

Современный подход состоит в отказе от одномерной модели деформации при обязательном рассмотрении реальных реологических свойств материалов и контактного трения.

Для дальнейшего развития процесса внутренней раскатки, практического освоения его преимуществ при производстве крупногабаритных оболочек необходимо, в первую очередь, решить следующие задачи:

I. Разработать теорию процесса, способную не только точно количественно характеризовать напряжённое состояние очага деформации и всех ЭСП, но также получать практические рекомендации относительно допустимых технологических режимов.

2. Осуществить экспериментальные работы по внутренней раскатке оболочек в ранее неисследованной области диаметров изделий с целью отработки технологии, оценки перспектив создания более крупных агрегатов и, наконец, проверки теоретических результатов.

Глава 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О НАПРЯЖЁННОМ СОСТОЯНИИ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВНУТРЕННЕЙ РАСКАТКЕ. ВЫБОР СПОСОБА РЕШЕНИЯ.

Построение теории процесса внутренней раскатки опирается на решение задачи о напряжённом состоянии очага деформации, для постановки которой необходим обоснованный выбор допущений и гипотез. На основании существующего теоретического и экспериментального материала выбрана расчётная схема очага деформации. При постановке задачи приняты следующие допущения, описывающие наиболее важные черты процесса:

I. Рассматривается задача в плоском приближении (плоское деформированное состояние).

2. Материал заготовки подчиняется закону текучести Мизеса. Свойства материала определяются диаграммой деформирования $\sigma_i(\varepsilon_i)$. Скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ не оказывает влияния на σ_i.

3. Объёмные силы не учитываются.

4. Процесс деформации происходит в холодном состоянии. Разогрев металла вследствие пластических деформаций не рассматривается.

5. На контактных поверхностях принят закон трения Кулона-Амонтона.

В отличие от обычно принятой размерности для подачи [мм/оборот/ролик] в работе всюду подача s указывается в миллиметрах : [s] = [мм], при этом их численные значения эквивалентны.

Назначение граничных условий (ГУ) завершает постановку. Сформулированная задача об очаге деформации при внутренней раскатке есть плоская упругопластическая проблема со смешанными ГУ.

Сравнительный анализ подходов к решению упругопластических задач, встречающихся при описании процессов ОМД, позволяет утверждать, что наиболее эффективными являются методы, ориентированные на использование ЭВМ: метод конечных разностей (МКР), метод конечного элемента (МКЭ), метод граничных интегральных уравнений.

Опыт применения всех перечисленных методов показывает, что для задач с развитыми пластическими деформациями, с выраженной анизотропией в свойствах, предпочтение следует отдавать МКЭ. В задачах упругости и пластичности с малыми упругопластическими деформациями преимущество метода ГИУ бесспорно. Есть веские основания предполагать его высокую эффективность и при решении задач с умеренными деформациями (15-30%).

Поскольку, согласно оценкам М.С.Сиротинского, процесс внутренней раскатки характеризуется эквивалентными деформациями 15-24%, то для решения поставленной задачи выбран метод граничных интегральных уравнений.

Тем самым, на примере конкретной проблемы, можно будет оценить практическую эффективность метода ГИУ в новой для него области пластических деформаций.

Глава 3 МЕТОД ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

В качестве определяющих соотношений рассматривается сис-

тема уравнений, описывающая упругопластическое поведение материала для плоского случая, которая включает в себя:

- дифференциальные уравнения равновесия:

$$\sigma_{jk,k} + R_j = 0, \qquad (1)$$

где R_j - компоненты объёмных сил;

- соотношения деформационной теории пластичности:

$$\sigma_{jk} - \delta_{jk}\sigma_0 = \frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}(\varepsilon_{jk} - \delta_{jk}\varepsilon_0), \qquad (2)$$

$$\varepsilon_{jk} = (u_{j,k} + u_{k,j})/2, \qquad (3)$$

$$\sigma_0 = E\varepsilon_0/(1-2\nu), \qquad (4)$$

$$\sigma_i = 3\mu(1-\omega_i)\varepsilon_i, \qquad (5)$$

где

$$\sigma_0 = \sigma_{kk}/3, \quad \varepsilon_0 = \varepsilon_{kk}/3, \qquad (6)$$

$$\sigma_i = \left(\frac{3}{2}s_{jk}s_{jk}\right)^{1/2}, \quad s_{jk} = \sigma_{jk} - \delta_{jk}\sigma_0, \qquad (7)$$

$$\varepsilon_i = \left(\frac{2}{3}e_{jk}e_{jk}\right)^{1/2}, \quad e_{jk} = \varepsilon_{jk} - \delta_{jk}\varepsilon_0; \qquad (8)$$

- граничные условия:

- на границе Γ заданы напряжения:

$$\sigma_{jk}n_k = T_j, \qquad (9)$$

где n_k - компоненты единичного вектора внешней нормали к границе Γ;

- на границе Γ заданы перемещения:

$$u_j(S) = \bar{u}_j(S), \quad S \in \Gamma. \qquad (10)$$

При записи уравнений принято соглашение о суммировании по повторяющимся индексам. На индекс i это соглашение не распространяется; он служит для обозначения интенсивностей напряжений и деформаций, а также функции Ильюшина ω_i. Запись индекса после запятой означает дифференцирование по соответствующей координате, область изменения индексов j,k есть 1,2.

Из уравнений (2-6) следует:

$$\sigma_{jk} = \mu(1-\omega_i)(u_{j,k} + u_{k,j}) + \delta_{jk}\left[\lambda^* + \frac{1}{3}\omega_i(2\mu - \text{æ}\lambda^*)\right]u_{k,k}, \qquad (11)$$

где

$$\lambda^* = \frac{\nu^* E^*}{(1+\nu^*)(1-2\nu^*)}, \quad E^* = \frac{1+\text{æ}\nu}{(1+\text{æ}\nu)^2}E, \quad \nu^* = \frac{\nu}{1+\text{æ}\nu} \qquad (12)$$

приведённые константы упругости,

æ - параметр, характеризующий тип напряжённого состояния:

$æ = 0$ – плоская деформация,

$æ = 1$ – плоское напряжённое состояние,

E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

При подстановке выражения (II) в уравнение равновесия получается неоднородное дифференциальное уравнение для перемещений:

$$\mu u_{j,kk} + (\lambda^* + \mu) u_{k,kj} = F_j, \qquad (13)$$

где

$$F_j = R_j - R_j^*,$$

$$R_j^* = \mu[\omega_i u_{j,kk} + \tfrac{1}{3}\omega_i(1+æ\tfrac{\lambda^*}{\mu})u_{k,kj} + \omega_{i,k}(u_{j,k}+u_{k,j}) - \tfrac{1}{3}\omega_{i,j}(2-æ\tfrac{\lambda^*}{\mu})u_{k,k}]. \qquad (14)$$

На части границы Γ_1, где заданы перемещения, граничные условия сохраняются без изменения. На той части границы, где заданы напряжения (9), необходимо ввести дополнительные в соответствии с (II):

$$\sigma_{jk} n_k = T_j + T_j^*, \qquad (15)$$

где компоненты дополнительных граничных напряжений T_j^* выражаются в виде:

$$T_j^* = \omega_i[(u_{j,k}+u_{k,j})\mu - \tfrac{1}{3}\delta_{jk}(2\mu - æ\lambda^*)u_{k,k}]n_k. \qquad (16)$$

Итак, решение задачи в рамках деформационной теории пластичности сводится к интегрированию системы уравнений (13) при граничных условиях (10) и (15). Для упругой задачи ($\omega_i = 0$) уравнение (13) есть не что иное, как неоднородное уравнение Навье-Ляме с заданными объёмными силами R_j. При наличии пластических деформаций $\omega_i \neq 0$ и возникают добавочные объёмные силы R_j^*. Поведение материала и теперь можно описать неоднородным уравнением Навье-Ляме, но с объёмными силами $F_j = R_j - R_j^*$ и с соответствующим изменением ГУ.

Решение неоднородного уравнения (13), известное как тождество Somigliana, даёт перемещение произвольной точки области в виде интегрального соотношения:

$$u_j(s) = \int_\Gamma [U_{jk}(s,Q)t_k(Q) - T_{jk}(s,Q)u_k(Q)]d\Gamma(Q) + \int_\Omega U_{jk}(s,q)F_k(q)d\Omega(q), \qquad (17)$$

где

$t_k(Q)$, $u_k(Q)$ – соответственно, компоненты напряжений и перемещений на границе Γ,

Ω – область анализа, Γ – граница Ω, Q – точка грани-

ци ($Q \in \Gamma$), q, s – точки области ($s, q \in \Omega$).

Ядра интегрального уравнения (I7) имеют вид:

$$U_{jk}(s,q) = c_1(c_2\delta_{jk}\ln r - \psi_j\psi_k/r^2),$$

$$T_{jk}(s,q) = c_3[(c_4\delta_{jk}+2\psi_j\psi_k)\psi_k n_k - c_4(\psi_j n_k - \psi_k n_j)]/r^2,$$

$$c_1 = -1/[8\pi\mu(1-\nu^*)],\ c_2 = 3-4\nu^*,\ c_3 = -1/[4\pi(1-\nu^*)],\ c_4 = 1-2\nu^*, \quad (I8)$$

$$\psi_j(s,q) = x_j(q) - x_j(s),\ r^2(s,q) = \psi_j\psi_j.$$

Перемещение $u_j(s)$ можно найти из (I7), если определены все компоненты граничных перемещений $u_k(Q)$ и напряжений – $t_k(Q)$. Но в корректно поставленной задаче обе функции никогда сразу неизвестны. Требуемые значения можно получить из г р а н и ч н о г о интегрального уравнения, которое связывает между собой только перемещения и напряжения на границе Γ:

$$\frac{1}{2}\delta_{jk}u_k(S) = \int_\Gamma [U_{jk}(S,Q)t_k(Q) - T_{jk}(S,Q)u_k(Q)]d\Gamma(Q) + \int_\Omega U_{jk}(S,q)F_k(q)d\Omega(q). \quad (I9)$$

После решения ГИУ (I9) определяются все компоненты напряжений и перемещений на границе Γ, и, следовательно, можно вычислить перемещение произвольной точки области в соответствии с уравнением (I7). Далее по перемещениям находятся деформации и напряжения во всей области.

Аналитическое решение интегральных уравнений (I7) и (I9) при произвольной форме области Ω и условий на границе Γ не представляется возможным. Поэтому при численном решении интегралы заменяются дискретным аналогом – суммой: граница Γ разбивается на N граничных элементов, а область Ω на F треугольных фрагментов. В итоге, ГИУ (I9) можно записать в матричной форме:

$$\frac{1}{2}[\mathcal{E}]\{u\} = [\mathcal{U}]\{t\} - [\mathcal{T}]\{u\} + \{r\}, \quad (20)$$

где

$[\mathcal{E}]$ – $2N \times 2N$ – единичная матрица,

$[\mathcal{U}]$ и $[\mathcal{T}]$ – $2N \times 2N$ – матрицы коэффициентов,

$\{u\}$ – $2N \times 1$ – вектор гран ных перемещений,

$\{t\}$ – $2N \times 1$ – вектор граничных напряжений,

$\{r\}$ – $2N \times 1$ – вектор от распределенных объёмных сил.

В соответствии с граничными условиями уравнение (20) преобразуется к системе линейных уравнений общего вида:

$$[\mathcal{A}]\{x\} = \{b\}, \quad (21)$$

где

$[\mathcal{A}]$ – $2N \times 2N$-матрица, образованная перестановкой столбцов из матриц $[\mathcal{T}]$ и $[\mathcal{U}]$ в соответствии с заданными ГУ,

$\{b\}$ – $2N \times 1$ – вектор правой части. Представляет сумму вектора $\{r\}$ и произведений известных величин граничных функций на соответствующие столбцы матриц $[\mathcal{U}]$ и $[\mathcal{T}]$.

$\{x\}$ – $2N \times 1$ – вектор искомых неизвестных напряжений или перемещений.

Основное матричное уравнение метода ГИУ (2I) является нелинейным вследствие того, что некоторые входящие в него величины (например, распределенные объёмные силы R^*_i (14)) зависят от всей истории нагружения и априори неизвестны. Численное решение уравнения (2I) осуществляется при помощи последовательных приближений, при этом на каждом шаге итерации решается упругая задача с известным распределением объёмных сил и изменёнными ГУ (метод упругих решений А.А.Ильюшина).

Принципиальное преимущество метода ГИУ перед вариационно-разностными методами, которое состоит в уменьшении размерности задачи на единицу, полностью сохраняется и в упругопластических проблемах. Число неизвестных в основном уравнении метода ГИУ (2I) определяется только разбиением границы, в то время как в МКР и МКЭ неизвестные обязательно находятся и внутри области.

Формирование основной матрицы $[\mathcal{A}]$ при традиционном способе может превышать время решения полученной системы линейных уравнений (2I). В работе предложены меры повышения эффективности вычислений за счёт аналитического определения всех компонентов матрицы (в том числе и сингулярных).

Хорошая обусловленность матриц, встречающихся в практических приложениях наряду с их невысоким порядком приводят к устойчивым алгоритмам решения упругопластических задач, не требующих ЭВМ с большими ресурсами памяти и быстродействия.

Глава 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВНУТРЕННЕЙ РАСКАТКИ

Данная глава посвящена численному решению поставленной задачи методом ГИУ и разработке на его основе методики расчёта энергосиловых и технологических параметров процесса.

В связи с этим осуществлена полная формализация задачи: назначены конкретные граничные условия с учётом контактного трения, произведено разбиение анализируемой области на треугольные фрагменты и границы на элементы.

Для уменьшения ошибки, связанной с разбросом данных о механических свойствах исследуемых сплавов проведены испытания на одноосное растяжение образцов, изготовленных непосредственно из материала заготовок. В результате получены экспериментальные значения σ_s и σ_b и диаграммы деформирования $\sigma_i(\varepsilon_i)$ сплавов 1201 и 1560 при комнатной температуре.

Описана программа BIEMPLAS решения плоских упругопластических проблем методом ГИУ и показана конкретная ориентация алгоритма на описание очага деформации при внутренней раскатке. Структура программы такова, что она легко может быть видоизменена к решению других плоских задач пластичности.

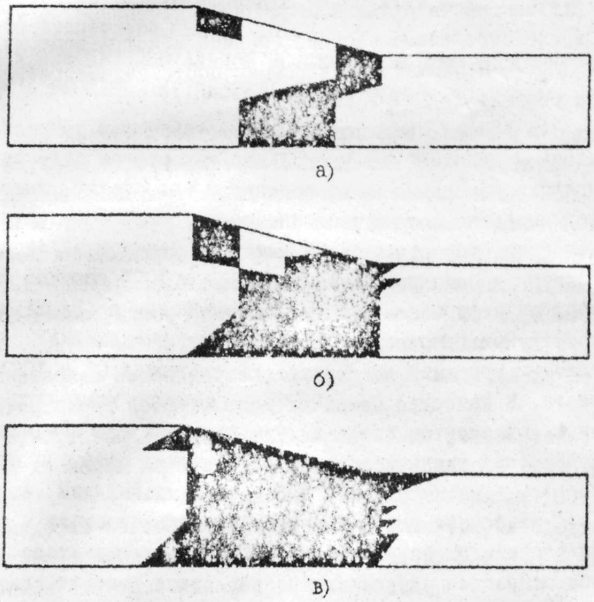
На основе данных о технологических режимах раскатки был выбран широкий диапазон изменения основных параметров и с помощью программы BIEMPLAS получены полные картины напряжённого состояния для каждой конкретной совокупности толщины заготовки - H и изделия - h, подачи - S, угла конусности ролика - α и длины его калибрующего участка - $\ell_к$, коэффициента трения - f, высоты матрицы - L и марки сплава.

Анализ результатов выявил некоторые закономерности влияния перечисленных параметров на характер напряжённого состояния и неравномерность деформации.

В частности, получены эпюры радиального и осевого контактных напряжений по длине очага деформации в зависимости от подачи и марки сплава. Установлено, что влияние подачи незначительно, за исключением области перехода конического участка ролика в калибрующий. Осевые напряжения не превышают 35% радиальных. Влияние трения в целом несущественно, но при этом осевая составляющая подвержена большему влиянию. Неравномерный характер эпюры выражен сильнее у радиальной компоненты, макси-

мум которой достигает $(4-5)\sigma_b$.

Построены картины распределения эквивалентных напряжений σ_i по очагу деформации, на основании которых исследовано возникновение и развитие пластической области в зависимости от подачи. На рисунке, для примера, показаны пластические зоны, полученные по программе BIEMPLAS.



Развитие пластической области при раскатке сплава I20I.

H =36.5 мм, h =25.2 мм, α =I5°, $\ell_к$=5 мм, f =0.07, L =200 мм

а) S = 0.48 мм – I5 пластических фрагментов

б) S = 0.90 мм – 32 пластических фрагмента

в) S = I.54 мм – 49 пластических фрагментов

Для определенной совокупности параметров (марка сплава, H, h, α, ℓ_x) определена величина подачи S_{MIN}, при которой пластические деформации проникают на всю толщину стенки оболочки: S_{MIN} = 0.3-0.4 мм. Это значение подачи принято в качестве нижней границы области допустимых подач.

Получены расчётные поля распределения средних напряжений σ_0 по очагу деформации, определены зоны преимущественных сжимающих и растягивающих напряжений. Рассмотрена оценка возможности разрушения материала оболочки на основании коэффициента жёсткости схемы напряжённого состояния $K = 3\sigma_0/\sigma_i$. Отсюда определена верхняя граница области допустимых подач - S_{MAX}. К примеру, для совокупности параметров, приведенных на рисунке S_{MAX} = I.5 мм.

В работе проведен полный геометрический анализ всех проекций контактной площади. Получены точные формулы и построены графики изменения соответствующих составляющих. Из экспериментов известно, что наплыв металла в очаге при $\alpha \leq I5^0$-$I8^0$ практически отсутствует, поэтому для определения действительных величин проекций площади контакта рассмотрено только влияние упругой деформации сжатия рабочего ролика вследствие высоких контактных напряжений. Приведен алгоритм вычисления действительных проекций на основе распределения напряжений по длине очага. В качестве исходных используются геометрические величины компонентов площади. Расчёты показывают, что контактные напряжения увеличивают соответствующие проекции на 30-50% и более.

На основе плоской модели разработана методика расчёта энергосиловых параметров процесса, которая существенным образом опирается на результаты решения задачи о напряжённом состоянии очага деформации по программе BIEMPLAS.

Для каждой конкретной совокупности исходных параметров данная методика позволяет определять все компоненты усилия деформирования, усилие подачи, момент и мощность, необходимые для раскатки, область допустимых подач.

Если в качестве исходных задаются эксплуатационные параметры - толщина стенки и диаметр изделия, предел текучести материала после деформации, то предлагаемая методика при помощи моделирования процесса даёт возможность осуществлять выбор

марки сплава и режимов раскатки для получения изделия с требуемыми свойствами. Гибкость вычислительных средств позволяет ставить задачу оптимальной калибровки инструмента.

В диссертационной работе смоделированы различные варианты процесса раскатки. В частности, графически представлены результаты расчётов тех же режимов, которые были реализованы в экспериментах.

Время расчёта одного варианта составляет 8–10 минут работы центрального процессора ЭВМ ЕС 1055М.

Глава 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБОЛОЧЕК

Практическое освоение станов внутренней раскатки изделий большого диаметра невозможно без выполнения соответствующих опытных разработок. Вследствие актуальности экспериментов и научной новизны результатов были осуществлены экспериментальные исследования процесса внутренней раскатки оболочек диаметром 1900 мм из алюминиевых сплавов 1201 и 1560 на модернизированном стане ХПКТ-2000 (ВНИИМЕТМАШ) с участием ВИЛС и МВТУ им. Н.Э. Баумана.

В качестве исходных для раскатки использованы 4 заготовки из сплава 1201 и 20 заготовок из сплава 1560, полученные из горячекатанных кольцевых обечаек.

В технологической части экспериментов было установлено, что в результате раскатки достигается требуемая точность геометрических размеров. Механические свойства изделий из сплава 1201 после раскатки и термообработки (старение) повышаются, в среднем, на 10–25% и составляют: $\sigma_в$ = 410 МПа, $\sigma_т$ = 460 МПа, δ = 10% при сохранении высокой коррозионной стойкости.

Для получения полной и достоверной энергосиловой картины процесса была разработана соответствующая силоизмерительная и регистрирующая аппаратура, в состав которой входят датчики для замера компонентов усилий деформирования и подачи, а также момента раскатки. В основу устройства силоизмерительных датчиков заложена конструкция сдвигового упругого элемента, их тарировка осуществлена непосредственно на раскатном стане.

Определение энергосиловых параметров производилось при раскатке с постоянной и переменной подачей. Результаты экспериментов записывались на осциллографе. Полученные осциллограммы, которые собраны в приложении к диссертации, далее обрабатывались с

использованием тарировочных коэффициентов и, поэтому, все опытные данные представлены в виде таблиц и графиков зависимости ЭСП от марки сплава, подачи, толщины стенки заготовки и изделия.

Осуществлена экспериментальная проверка теоретических результатов по определению ЭСП процесса. Рассмотрены две методики расчёта: методика, основанная на одномерной модели деформации и методика, предложенная в данной работе. Сравнение результатов, полученных по обеим методикам с экспериментальными данными показало, что:

- применение одномерной модели для описания процесса раскатки оболочек с исходной толщиной стенки 20-40 мм приводит к завышению результатов на 25-100% и более;

- результаты, полученные на основе плоской модели очага деформации отличаются от экспериментальных данных на 10-20%.

Опытным путём найден диапазон подач, при которых раскатка не вызывала разрушения изделия. Теоретический прогноз по разработанной в диссертации методике оказывается в лучшем соответствии с экспериментом, чем рассчитанный по одномерной модели.

Экономический эффект от раскатки опытной партии оболочек составил 120 тысяч рублей. Долевое участие автора в этой работе 25%.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Впервые поставлена упругопластическая задача о напряжённом состоянии очага деформации при внутренней раскатке алюминиевых сплавов, реализующая модель плоского деформированного состояния. Определяющие соотношения сформулированы на основе реальных физико-механических свойств раскатываемых материалов, граничные условия заданы с учётом контактного трения. Решение поставленной задачи позволило уточнить характер напряжённого состояния и получить ряд новых результатов, в частности:

- построены эпюры изменения радиальных и осевых контактных напряжений по длине очага деформации и установлено, что величина подачи и контактное трение не оказывают на них существенного влияния. Величина осевой компоненты напряжения не превышает 35% от радиальной;

- получены картины распределения эквивалентного напряжения и развития пластической области по очагу. Из условия проникновения пластических деформаций на всю глубину сечения установлена

нижняя граница области допустимых подач - S_{MIN};

- получены картины распределения среднего напряжения σ_0 и выявлены зоны преимущественных сжимающих и растягивающих напряжений. Произведена оценка возможности разрушения на основании коэффициента жёсткости схемы напряжённого состояния, которая даёт верхнюю границу области допустимых подач - S_{MAX};

- осуществлён полный геометрический анализ и определены действительные величины всех проекций контактной площади с учётом упругого контактного сжатия рабочего ролика;

- разработана методика расчёта энергосиловых параметров процесса внутренней раскатки на основе плоской модели деформации.

2. Показана принципиальная возможность применения метода граничных интегральных уравнений к решению упруго-пластических задач с эквивалентными деформациями 0.15-0.20; при этом обнаружена его высокая эффективность и разрешающая способность.

На основе метода ГНУ разработан алгоритм численного анализа плоских проблем упругости и пластичности, с помощью которого была решена поставленная задача.

3. Проведены экспериментальные исследования процесса внутренней раскатки оболочек диаметром 1900 мм из алюминиевых сплавов 1201 и 1560 на стане ХПКТ-2000 (ЧИИМЕТМАШ). В результате экспериментов установлено, что получение крупногабаритных изделий методом внутренней раскатки обеспечивает высокую точность геометрических размеров и повышение механических свойств на 10-25%, что характеризует перспективные возможности способа и при получении цилиндрических изделий большого диаметра.

4. Применение одномерной модели при расчётах как ЭСП процесса, так и области допустимых подач, приводит к весьма завышенным оценкам. Сравнительный анализ результатов, полученных на основе плоской модели деформации с данными экспериментальных исследований показывает её хорошее соответствие реальному процессу раскатки. Получение достоверных результатов в широком диапазоне изменения технологических параметров, включающем и область режимов раскатки крупногабаритных изделий, позволяет рекомендовать разработанную модель напряжённого состояния для освоения имеющихся и предсказания новых возможностей процесса внутренней раскатки.

5. Долевое участие в экономическом эффекте от раскатки опытной партии оболочек составляет 30 тыс. рублей.

Содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Байрамов О.Ф. Применение метода граничных интегральных уравнений для решения задач обработки металлов давлением // Изв. ВУЗов. Машиностроение. - 1984. - № 6. - С. 105 - 110.

2. Расчёт энергосиловых параметров и формоизменения при прокатке в черновых клетях широкополосных станов методом конечных элементов / В.В. Калмыков, И.Н. Ананьев, В.К. Белянинов, Ю.П. Шинкаревич, О.Ф. Байрамов // Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. - 1984. - № 412. - С. 57 - 67.

3. Исследование процесса винтовой прокатки в матрице тонкостенных оболочек из алюминиевых сплавов / И.Г. Арутюнов, В.А. Самсонов, Ю.П. Шинкаревич, И.Н. Ионов, Ю.П. Михайлов, С.А. Никитин, О.Ф. Байрамов // Тр. ВНИИМЕТМАШ. - 1984. - Машины и агрегаты металлургического производства. - С. 54 - 65.

4. Байрамов О.Ф. Аналитическое определение площади контакта при внутренней раскатке оболочек // Изв. ВУЗов. Машиностроение. - 1985. - № 10. - С. 126 - 132.

5. Байрамов О.Ф. Повышение эффективности вычислительной процедуры метода граничных интегральных уравнений в задачах обработки металлов давлением // Изв. ВУЗов. Машиностроение. - 1985. - № 12. - С. 115 - 121.

Байрамов