

УТВЕРЖДАЮ
Директор Института проблем
механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
С.Е. Якуш
«31» октября 2019 г.

О Т З Ы В

ведущей организации, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, на диссертационную работу Вин Аунг «Вычислительный комплекс моделирования и оптимизации процессов формообразования тонкостенных конструкций», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертационная работа Вин Аунг посвящена моделированию технологий формообразования и разработке способа расчета оптимального деформирования тонкостенных конструкций.

Актуальность исследований связана с необходимостью разработки новых подходов при оценке параметров технологических процессов, обеспечивающих высокие требования к точности изготовления деталей и их эксплуатационному ресурсу. Современное оборудование, используемое при формообразовании тонкостенных конструкций на предприятиях, обеспечивается программным комплексом, реализующим упрощенные модели по оценке параметров технологического процесса. В представленной к защите работе предлагается алгоритм оптимизации параметров эксплуатации технологического оборудования на основе анализа полноразмерных моделей конструкций методом конечных элементов в САЕ-системах.

Практическая значимость работы состоит в программной реализации численного метода расчета оптимальных траекторий деформирования в системе инженерного анализа. Разработанный комплекс программ позволяет моделировать процессы формообразования тонкостенных конструкций, оптимизировать траекторию деформирования и форму оснастки, и проектировать технологические процессы изготовления деталей на

автоматизированном оборудовании на этапе подготовки производства. Полученные результаты научного исследования могут быть применимы при расчетах технологических процессов в машиностроительной и авиастроительной отрасли, в частности, в филиале ПАО "Компания "Сухой" "Комсомольский-на-Амуре авиационный завод имени Ю.А. Гагарина".

Научная новизна результатов диссертации определяется тем, что в работе развивается комплексный подход, предусматривающий совместное решение полуобратных задач формообразования для поиска формы оснастки и оптимизации путей деформирования, на основе теории нелинейного необратимого деформирования тонкостенных конструкций, современных численных методов и программирования в системах инженерного анализа САЕ.

Анализ содержания работы.

Во введении диссертационного исследования проведен анализ литературных источников по рассматриваемой проблеме. Обозначены цели исследования. Обоснованы актуальность, практическая значимость, научная новизна работы и достоверность полученных результатов. Отмечен личный вклад автора при подготовке диссертационного исследования. Указана апробация работы и ее краткое содержание.

Первая глава посвящена литературному обзору технологий формообразования тонкостенных металлических конструкций в производстве и существующим методам математического моделирования рассматриваемых технологических процессов. Обсуждаются основные соотношения механики необратимого деформирования и методы решения краевых оптимизационных задач.

В первом разделе отмечаются конструктивные особенности деталей, используемых в современном машиностроении. В технологических процессах изготовления обводообразующих деталей используются методы формообразования. В частности, процессы обтяжки применяют на обтяжном оборудовании с числовым программным управлением. Программное обеспечение S3F-FET, поставляемое к данному оборудованию предоставляет информацию о параметрах рабочих элементов прессы по методу сечений.

Одной из наиболее перспективных технологий формообразования в режиме ползучести является деформирование заготовок многоточечной формовкой с помощью реконфигурируемого стержневого пуансона (матрицы). Для подготовки технологического оборудования в производстве

рассмотренных конструкций необходима разработка управляющей программы и электронной модели пуансона.

Во втором разделе представлены основные сведения механики деформируемого твёрдого тела, в частности теории упругости, пластичности и ползучести. Приводятся определяющие соотношения механики необратимого деформирования и результирующая система уравнений в частных производных. Для численного решения краевых оптимизационных задач используется метод конечных элементов. Основой построения конечно-элементных уравнений являются вариационные принципы виртуальных перемещений и скоростей. Проведено исследование экстремальных значений интегральных функционалов. Что позволило получить замкнутую систему дифференциальных уравнений в частных производных для рассматриваемого процесса необратимого деформирования материала. В разделе обсуждаются современные пакеты для инженерных расчетов. Проведена линеаризация системы уравнений и вычислена матрица жесткости. Представлен реализованный в САЕ-системах алгоритм решения конечно-элементных уравнений для нелинейных задач с автоматическим определением величины параметра деформирования. Проведено исследование возможных оболочек визуализации численных результатов для разрабатываемого МКЭ.

В третьем разделе первой главы приводятся основные понятия и принципы теории оптимального управления. Проводится дискриминация методов поиска оптимального решения. Сформулированы достаточные условия существования оптимального решения поставленных задач. Даны постановки некоторых задач оптимизации и методов их решения, в частности рассматриваются задачи оптимального управления. Для численного решения задачи оптимального управления с ограничениями использован метод динамического программирования. Для численного поиска оптимальных путей деформирования использованы генетические алгоритмы. Для оптимизации параметров успешной эксплуатации технологического оборудования проведена постановка и решение задач оптимального управления. Предложена методика формообразования листового металла по оптимальному пути для достижения наиболее равномерного распределения деформации во избежание повреждений, таких как смятие и разрывы. Аналитически найдены оптимальные пути деформирования пластин в ползучести. Аналитические решения в поиске оптимальных путей

деформирования пластин зависят от геометрии модели, свойств материала и определяются при некоторых упрощениях модели.

Во второй главе предлагается математическая формулировка задачи оптимального управления в технологических процессах.

В первом разделе представлена математическая модель формообразования в режиме ползучести изделий из листов и панелей с помощью реконфигурируемого стержневого пуансона, позволяющего изменять форму заготовки. Деформирование рассматривается с учетом контактных условий со стержнями и малых деформаций, но больших перемещений и поворотов. Рассматривается квазистатическая задача формообразования в общей Лагранжевой формулировке с упругой разгрузкой. Конечное положение стержней, обеспечивающих необходимое упреждение панели, находится итерационным методом решения полуобратной задачи в ползучести. В качестве критерия оптимального деформирования выбран параметр поврежденности. Искомыми оптимальными функциями управления являются перемещения стержней реконфигурируемого устройства.

Во втором разделе моделируется технология обтяжки на прессе для изготовления обшивок двойной кривизны в условиях пластичности. Задача кинематического формообразования обтяжкой на пуансоне формулируется, в виде квазистатического вариационного принципа в общей Лагранжевой формулировке. Для определения необходимой кривизны пуансона, обеспечивающей необходимое упреждение панели, используется итерационный метод решение обратной задачи в пластичности. Сформулирована задача оптимального деформирования для получения максимальных значений пластических деформаций (значения остаточных перемещений), обеспечивающих необходимую остаточную форму, или минимального значения поврежденности материала в пластичности. В качестве управляющих переменных выбраны краевые смещения панели, моделирующие движение зажимов обтяжного оборудования. Для постановки и решения задачи оптимизации пути деформирования предполагается, что известна некоторая форма пуансона, задающая необходимое упреждение панели. Иначе можно воспользоваться итерационным методом для вычисления геометрии поверхности пуансона, обеспечивающей необходимую остаточную кривизну панели. В качестве критерия оптимизации принимается накопленная в процессе деформирования работа рассеяния и величина остаточных перемещений. Задачи деформирования

представлены в виде вариационных формулировок с контактными ограничениями для численного решения методом конечных элементов.

Третья глава посвящена реализации метода динамического программирования при поиске оптимального решения в методе конечных элементов.

В первом разделе применяются основные процедуры метода конечных элементов к рассмотренным вариационным принципам и строятся дискретные уравнения задач деформирования с учетом контактных условий. Для пошагового интегрирования уравнений механики деформируемого твердого тела строятся уравнения в приращениях. На каждом шаге нагружения (времени) определяются приращения тензора деформаций, напряжений и, конечном итоге, вектора перемещений. Предполагалось, что при значении параметра нагружения все искомые величины определены. Для обеспечения устойчивого процесса интегрирования в системе MSC.Marc использована схема адаптивного пошагового выбора - AUTO STEP, AUTO CREEP. Управление шагом нагружения в данной схеме связано с количеством повторений, необходимых для достижения сходимости. На каждом шаге и на каждой итерации процедуры Ньютона — Рафсона проводилась проверка вектора перехлеста, определяющего проникновение узла одного тела в другое. При определении контактной поверхности, применялись основные процедуры контактных задач, которые включают метод множителей Лагранжа, метод штрафа и учет контактных ограничений.

Во втором разделе, в силу дискретизаций по времени, минимизируемый функционал заменяется квадратурной формулой. В этом случае была сформулирована дискретная задача оптимального управления. Построены рекуррентные соотношения для аналога функции Беллмана. Показана справедливость данных рекуррентных соотношений, применение которых приводит к наикратчайшему пути деформирования. Процесс решения состоит в выборе из возможных положений контактных тел во времени, задающих перемещения пластинки, тех, которые дают минимальное значение критерия. Для уточнения решения, полученным методом динамического программирования, предлагалось использовать метод локальных вариаций.

В третьем разделе, аналогично, в силу дискретизаций по параметру деформирования, минимизируемые функционалы заменяются квадратурными формулами. Формулируются дискретные задачи оптимального управления. В качестве управляющих переменных

выбираются компоненты перемещений узлов, расположенных на торцах панели. Результатом решения является поиск оптимальной функциональной зависимости компонент перемещений. В данном случае строятся рекуррентные соотношения. Процесс решения состоит в выборе из возможных положений краев пластины по двум координатам при различных значениях параметра деформирования, задающим перемещения пластинки, таких, которые дают минимальные значения рассматриваемых критериев.

В четвертой главе приводится программная реализация метода динамического программирования в системе MSC.Marc, MSC.Patran для задач оптимизации работы технологического оборудования при формообразовании деталей в условиях ползучести.

В первом разделе подробно описана реализация алгоритма оптимизации деформирования в режиме ползучести. Путь деформирования аппроксимируется системой прямолинейных коротких отрезков. В этом случае решение элементарных операций сводится к сравнению значений на разных маршрутах, а задача оптимального деформирования в режиме ползучести состоит в определении, среди всех ломанных, той линии, длина которой наименьшая. Для программной реализации метода динамического программирования и построения искомой функции, вводится сетка с N шагами по времени и M - по величине перемещений. Вычисляются шаги метода динамического программирования, на которых задается один из вариантов граничных условий на перемещения.

Во втором разделе реализуется алгоритм оптимизации деформирования в режиме пластичности при обтяжке. Задача сводится к определению функций граничных условий, обеспечивающих оптимальную зависимость компонент перемещений. Для программной реализации метода динамического программирования и построения искомой функции, вводится сетка с N и M шагами по величине каждой компоненты перемещений. задается формула для вычисления шагов метода динамического программирования и варианты граничных условий на перемещения, учитывающие растяжение по касательной к краю пуансона.

В третьем разделе представлена программная реализация разработанных алгоритмов путем построения пользовательских программ для MSC.Patran, MSC.Marc на языках PCL, Fortran, и управляющей программы, написанной на языке C++, с использованием объектно-ориентированного программирования - архитектуры COM и DCOM. Для решения большого объема однотипных времязатратных задач разработан

алгоритм параллельного конечно-элементного анализа на кластере вычислительных машин, при котором распределяется только расчет алгоритма метода динамического программирования.

В пятой главе представлены результаты моделирования и оптимизации технологических процессов формообразования.

В первом разделе рассматривается анализ путей многоточечного формообразование панелей с помощью реконфигурируемого устройства. В первом подразделе рассматривается анализ процессов формообразования квадратной пластинки в реконфигурируемой установке с верхней и нижней матрицей, включающих по четыре стержня. Выбраны различные варианты деформирования панели (с разными скоростями движения стержней реконфигурируемой установки). Конечное положение стержней в данных вариантах одинаковое. Представлены значения максимальных интенсивностей напряжений в процессе деформирования и их конечные значения при разгрузке, значение рассеянной энергии, а также максимальные перемещения заготовки после деформирования и разгрузки. Результаты расчетов показывают зависимость напряжений от пути нагружения. Расчетные данные подтверждают выбор рассеянной энергии в качестве параметра поврежденности, т.к. минимальное значение энергии в конечный момент обеспечивает минимальные напряжения на всем пути деформирования.

Во втором подразделе проводится анализ решения задачи, определения оптимальной траектории деформирования, используя метод динамического программирования при $N=M=2$. Подход динамического программирования заключается в том, что каждая подзадача решается один раз, сокращая при этом количество вычислений в сравнении с полным перебором. Для введенной сетки, реализующей варианты движения стержней, вычислены значения рассеянной энергии для всех траекторий деформирования. В результате вычислен оптимальный путь деформирования для разных формулировок задач.

В третьем подразделе приводятся решения задач, определения оптимальной траектории деформирования стержнями по поврежденности материала в ползучести, используя метод динамического программирования при $N>2$, $M>2$, в частности при $N=M=3$ и $N=M=6$. Для сокращения времени расчета в случае $N=M=3$ применяется алгоритм уточнения решения методом локальных вариаций. В результате расчетов видно, что при уменьшении сетки оптимальная ломаная линия, вычисленная данным численным

методом, будет приближаться к оптимальной кривой, полученной аналитически для изгиба пластин. Дана оценка сокращения времени расчета по предложенному алгоритму в сравнении с полным перебором всех путей.

В четвертом подразделе рассматривается задача определения перемещений стержней реконфигурируемой установки, создающих упреждающую кривизну панели, которая обеспечивает заданную остаточную форму после разгрузки. В качестве примера формуется панель двойной кривизны центроплановой части самолета. Для расчета используется итерационный метод решения обратных задач, реализованный для контактных задач. Представлены графики сходимости данного метода решения при разных коэффициентах, которые согласуются с условиями сходимости.

Во втором разделе анализируются различные варианты траекторий движения зажимов при формообразовании панели обтяжкой.

В первом подразделе анализируются различные пути деформирования при обтяжке панели с заданной формой пуансона. Проводится поиск оптимального процесса формообразования панели в процессе обтяжки, обеспечивающего максимальные остаточные деформации. Показана зависимость пути деформирования от остаточной конфигурации панели.

Во втором подразделе приводятся решения задач оптимального управления методом динамического программирования для сеток $N=M=3$, $N=M=6$, $N=M=10$ по наибольшим значениям остаточных перемещений и по наименьшим значениям поврежденности материала в пластичности. Для сравнения времени работы последовательного и параллельного алгоритмов вычислены коэффициенты ускорения и эффективности.

В третьем подразделе рассматривается задача расчета формы пуансона, создающего такую упреждающую кривизну панели при обтяжке, которая обеспечивает заданную остаточную форму после разгрузки. Для расчета используется итерационный метод решения обратных задач, реализованный в MSC.Marc для контактных задач деформирования обтяжкой. Представлены графики сходимости данного метода решения при разных коэффициентах.

Заключение содержит краткий обзор основных результатов, выносимых на защиту.

В приложении приведен текст программы, реализующей параметризацию конечно-элементной модели стержневой установки на языке препроцессора PCL.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Следует отметить небрежность в оформлении диссертации, что затрудняет ее восприятие и понимание. Текст диссертации изобилует несогласованностью падежей в предложениях.
2. Не лишены опечаток и формулы, так в 1-ой формуле на стр. 21 присутствует лишний знак равенства.
3. При изложении материала присутствует многократное повторение формул и описаний к ним. Этого можно было бы избежать, пронумеровав соответствующие формулы в 1 главе.
4. В описании величин в ассоциированном законе пластического течения на стр. 21 λ названа функцией, являющаяся множителем лагранжа, не обязательно функцией, она может быть и постоянной величиной. Тут же введено обозначение s_{ij} для градиента к поверхности текучести, далее из описания можно заключить, что это девиатор напряжений. Остаётся непонятным почему он обязательно сонаправлен с градиентом к поверхности текучести.
5. Сравнив описание ассоциированного закона на стр. 21 и закон ползучести на той же странице. Можно получить систему нелинейных уравнений для определения компонент девиатора напряжений. Далее при изложении этот факт никак не обсуждается и не используется.
6. Из рисунков рис 4.1 с.58 и 5.6 с. 73 не совсем понятно, как именно выбираются законы движения контактных тел. Только на рисунках 5.10 и 5.12 пути выделены жирной, пунктирной линией и цветом.
7. Не понятно почему автор не использует систему единиц измерения СИ, это приводит к ошибкам в записи единиц измерения. Так модуль Юнга почему-то измеряется в $\text{кг}/\text{мм}^2$, а не в $[\text{Па}] = [\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)]$. Далее по тексту (см. стр. 67, табл. 5.1) такие же единицы измерения приписаны напряжениям, а в табл. 5.2 на стр. 74 в этих же единицах измерения меряется рассеянная энергия, которую обычно измеряют в джоулях $[\text{Дж}] = [\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2]$.

Несмотря на указанные замечания, необходимо отметить, что диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему, в которой получены новые научные результаты, касающиеся и имеющие существенное значение для решения актуальных прикладных и производственных задач.

Полученные численные результаты работы достоверны. Они подробно изложены в тексте диссертации и опубликованы в 17 научных работах, в том числе в 4 статьях в ведущих научных рецензируемых журналах. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационного исследования. Имеется свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Диссертационная работа Вин Аунг «Вычислительный комплекс моделирования и оптимизации процессов формообразования тонкостенных конструкций» удовлетворяет требованиям Положения ВАК РФ о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв заслушан и одобрен на заседании Лаборатории моделирования в механике деформируемого твердого тела Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН 21 октября 2019г., протокол № 11.

Радаев Юрий Николаевич,
д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник
Лаборатории моделирования в механике деформируемого твердого тела
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1,
тел.+74997399531,
email: radayev@ipmnet.ru

_____ Ю.Н. Радаев

Подпись Радаева Ю.Н. заверяю
Ученый секретарь Института
проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук
к.ф.-м.н.

_____ М.А. Котов