

На правах рукописи

ЗОЛОТОВ Александр Максимович

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ
ВЫСОКОТОЧНОЙ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность: 05.16.05 – Обработка металлов давлением,
05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт- Петербург
2003

Работа выполнена на кафедре «Пластическая обработка металлов» ГОУ «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Официальные оппоненты:

- заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор Дурнев Василий Дмитриевич,
- доктор технических наук, профессор Виторский Ярослав Михайлович,
- доктор технических наук, профессор, Иванов Константин Михайлович.

Ведущее предприятие – ОАО Завод турбинных лопаток г. Санкт-Петербург

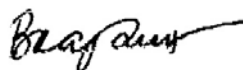
Защита состоится 5 декабря 2003 в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 при ГОУ «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, химический корпус, ауд. 51.

Ваш отзыв на автореферат (1 экз., заверенный гербовой печатью) просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.229.03.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

Автореферат разослан ноября 2003.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



В. А. Кархин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Процессы горячей пластической обработки (ГПО) относятся к широко и весьма успешно применяемым промышленным технологиям. Высокие механические свойства и другие эксплуатационные характеристики заготовок и готовых изделий при высоких показателях использования материала являются отличительной чертой процессов ГПО в сравнении с другими технологическими процессами.

Повышенные требования к точности и качеству изделий и деталей, получаемых методами точной и прецизионной ГПО, в частности горячей объемной штамповки (ГОШ), в свою очередь ведут к значительному повышению требований к технологическому процессу, как с точки зрения надежности результатов проектирования, так и при его промышленной реализации.

Эффективным методом решения этих проблем, весьма интенсивно развивающимся в последнее время, является использование систем автоматизированного проектирования и математического моделирования, в частности на базе метода конечных элементов (МКЭ).

Вместе с тем при проектировании многопереходных процессов ГПО для изготовления изделий повышенной точности, например, многопереходной штамповки заготовок турбинных лопаток, возникает целый ряд специфических проблем, связанных как с математическим моделированием процессов пластического деформирования металла, например, решение контактных задач системы заготовка – инструмент, моделирование тепловых деформаций при остывании заготовок, так и определением переходов формообразования при ГОШ, методики проектирования деформирующего инструмента и других.

В связи с этим разработка научных основ проектирования многопереходных процессов горячей пластической обработки, в частности, процессов горячей объемной штамповки (ГОШ), изделий повышенной точности с использованием компьютерного моделирования является весьма актуальной проблемой современного машиностроительного производства.

Цель работы:

Решение актуальной научно-технической проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение и состоящей в создании методики и алгоритмов компьютерного проектирования многопереходных технологических процессов получения изделий повышенной точности методами горячей объемной пластической обработки и оценки качества результатов проектирования, обеспечивающих повышение эффективности производства, качества изделий и надежности технологий.

Задачи исследования:

1. Анализ факторов, влияющих на характеристики точности готовых изделий и заготовок при горячем пластическом деформировании, создание методики проектирования.

2. Сравнительный анализ моделей материала для исследования процессов финишной пластической обработки, в частности калибровки поковок.
3. Определение термомеханических условий работы деформирующего инструмента при штамповке и калибровке.
4. Решение контактной задачи взаимодействия заготовки и штампа при штамповке и калибровке.
5. Анализ процесса коробления поковок (термомеханических и структурных деформаций) при остывании после деформирования.
6. Проверка адекватности (правомерности) результатов математического моделирования процессов калибровки.
7. Оценка значимости отдельных технологических параметров процесса калибровки.
8. Разработка методики управления параметрами технологического процесса штамповки и калибровки.
9. Анализ основных этапов разработки технологических процессов ГОШ и создание формальных алгоритмов проектирования процессов.
10. Разработка методики определения последовательности операций штамповки и геометрии штамповых переходов на основе методов трехмерного геометрического моделирования.
11. Разработка комплексного алгоритма проектирования многопереходных процессов горячего пластического деформирования заготовок и изделий повышенной точности.

Научная новизна.

1. На основе комплексного анализа технологических процессов сформулирован перечень основных параметров, определяющих точность готовых изделий и заготовок при горячем пластическом деформировании, обоснован выбор математической модели материала для моделирования финишных операций пластической обработки и термомеханических процессов охлаждения заготовок, дана оценка влияния структурных превращений на формоизменение после деформирования. По результатам проведенного анализа разработана и реализована методика прогнозирования характеристик точности получаемых изделий при многопереходных процессах пластической обработки.
2. Разработаны научные основы проектирования многопереходных технологических процессов горячей пластической обработки для изготовления высокоточных заготовок и изделий сложной формы с использованием систем компьютерного моделирования, реализованных на базе твердотельного трехмерного геометрического моделирования и МКЭ.
3. Формализован процесс проектирования технологических переходов ГОШ, разработаны и реализованы методики определения видов, последовательности и геометрии переходов штамповки для поковок пространственной формы, основанные на определении частных критериев сложности отдельных элементов поковок и генерировании геометрии этих элементов по переходам деформирования.

4. Разработана методика и алгоритмы решения задачи контактного взаимодействия при упруговязкопластическом течении металла заготовки и упругом деформировании двух штамповых вставок, с учетом податливости их опорных поверхностей.

5. На основе математического моделирования термомеханических процессов, происходящих на всех стадиях технологического процесса формообразования, показана возможность прогнозирования точности получаемых изделий (поковок) и оценки влияния технологических параметров на показатели качества изделий.

6. Сформулирован алгоритм построения замкнутой системы проектирования технологического процесса ГПО, включающий конструирование заготовки и формообразующего инструмента по переходам деформирования, моделирование процессов деформирования заготовки, работы инструмента и термомеханических процессов охлаждения заготовок, позволяющий прогнозировать точность и качества металла готовых изделий.

Практическая ценность.

1. Разработанные методики компьютерного моделирования, включающие геометрическое и математическое моделирование процессов ГПО, позволяют формализовать этапы конструкторско-технологического проектирования, произвести первичную оценку результатов разработки, повысить качество и сократить сроки подготовки и реализации процессов.

2. Разработанная методика математического моделирования позволяет определить напряженно-деформированное состояние системы заготовка - штамповый инструмент с учетом теплообмена и жесткостных характеристик оборудования, а также термические деформации в заготовке при остывании. Полученные результаты позволяют прогнозировать геометрию получаемых поковок, определить значимость отдельных технологических параметров.

3. Разработана методика компьютерного конструкторско-технологического проектирования, включающая методику определения последовательности операций штамповки и геометрии штамповых переходов для пространственных поковок сложной формы на основе методов пространственного геометрического моделирования и определения частных критериев сложности конструктивных элементов поковок.

4. Разработаны и реализованы алгоритмы комплексного проектирования многопереходных процессов горячего пластического деформирования заготовок и изделий повышенной точности.

5. На базе разработанных методик геометрического моделирования создан ряд программных комплексов, используемых в системах поиска аналогов технологических процессов в базах данных, автоматизации систем управления качеством, визуализации систем измерений геометрии пространственных деталей и др.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на конференции СПбГТУ «Инновационные технологии» (1995г.), меж-

дународной научно-технической конференции «Пластическая и термическая обработка современных металлических материалов» (1995г.), международной научно-технической конференции «Высокие технологии в современном металловедении» (1997г.), научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах» (1997 г.), международной научно-технической конференции «Высокие технологии в современном материаловедении» (1999г.), международной научно-технической конференции «Высокие технологии в современном материаловедении» (2001г.), Юбилейной научно-технической конференции Академии инженерных наук РФ Северо-западное отделение (2001г.)

Публикации. По теме диссертации опубликована 41 работа в журналах и сборниках научных трудов, в виде докладов, тезисов докладов научно-технических конференций и одной монографии.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и общих выводов по работе, изложена на _____ страницах, включая _____ таблиц, _____ рисунков и список литературы из _____ наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

1. Анализ технологических процессов горячего пластического деформирования деталей и заготовок повышенной точности и методов их проектирования.

Детали и изделия, полученные методом горячего пластического деформирования, называются точными или прецизионными, если их важные функциональные элементы и поверхности готовы к сборке или имеют припуск под финишную обработку, например под шлифование.

Основные причины изготовления прецизионных заготовок и изделий следующие:

- изготовление форм, которые нерационально или вообще невозможно изготавливать обработкой резанием;
- использование улучшенных эксплуатационных характеристик заготовок и изделий, полученных в результате горячей пластической деформации;
- сокращение стадий производства и, тем самым, сокращение капиталовложений;
- снижение себестоимости готовых изделий.

Наиболее широкое применение для изготовления точных и прецизионных заготовок и изделий получили следующие технологические процессы горячей пластической обработки:

- горячее прессование профилей сложной формы,
- горячая объемная штамповка в закрытых и открытых штампах и др.

Предварительный анализ факторов, влияющих на эффективность производства изделий повышенной точности методами горячего пластического деформирования, показал, что на геометрию получаемых изделий оказывают влияние все основные технологические параметры процесса (температура нагрева заготовок и инструмен-

та, временные характеристики процесса, жесткостные параметры системы заготовка-инструмент-машина, условия контактного взаимодействия между заготовкой и деформирующим инструментом, а также стабильность значений этих параметров в ходе процесса). В значительной степени влияние этих параметров зависит от сложности геометрии получаемых изделий.

В качестве объекта исследования был выбран технологический процесс штамповки заготовок турбинных лопаток (ЗТЛ) повышенной точности. Этот процесс имеет все основные особенности, присущие многопереходным процессам горячей пластической деформации и отличается значительной сложностью как с точки зрения проектирования, так и при его реализации. Это связано прежде всего со сложностью геометрии получаемых поковок, жесткими технологическими характеристиками материалов и повышенными требованиями к качеству изделий, с точки зрения их эксплуатационных характеристик.

Существующие в настоящее время системы автоматизированного проектирования технологических процессов ГПО позволяют провести практически полный цикл проектирования процессов формообразования для однопереходных процессов деформирования, начиная от проектирования геометрии поковок заканчивая управляющими программами для изготовления и контроля деформирующего инструмента на оборудовании с ЧПУ. Основной проблемой при применении этих систем для многопереходных процессов ГПО является проектирование переходов деформирования.

Современные системы математического моделирования процессов ГПО в основном реализованы на базе метода конечных элементов (МКЭ) и позволяют проанализировать практически все основные операции и этапы процессов. Включают всеобъемлющий перечень моделей материала, позволяют задавать всевозможные типы граничных условий. Вместе с тем при моделировании многопереходных процессов получения изделий повышенной точности необходимо решить ряд специфических задач, что связано с разработкой специализированных многоэтапных алгоритмов применения МКЭ, выбором расчетной модели материала и процесса, методики проектирования геометрии деформирующего инструмента и др.

На основании предварительного анализа состояния вопроса были сделаны следующие выводы:

1. Повышенные требования к точности и качеству изделий, получаемых методами ГПО ведут к значительному повышению требований к качеству и надежности результатов проектирования и промышленной реализации технологического процесса.

2. При проектировании процессов горячей пластической обработки, в частности ГОШ, широко применяются системы автоматизированного проектирования (САПР), математического моделирования (на базе МКЭ) и технологической подготовки производства (CAD-CAE-CAM).

3. При разработке технологических процессов многопереходной ГПО с использованием компьютерного проектирования возникает необходимость решения целого комплекса различных задач математического моделирования для каждого из

последовательности этапов деформирования заготовок, включая задачи термопластического и термоупругопластического течения металла для формообразующих операций, и термоупругопластического деформирования металла при моделировании остывания заготовок и работы деформирующего инструмента.

4. При разработке процессов получения заготовок повышенной точности, в частности прецизионной штамповки, необходимо решение задачи контактного взаимодействия системы заготовка – инструмент для условий термоупругопластического нагружения.

5. В настоящее время отсутствует методика проектирования переходов деформирования, в частности для процессов многопереходной штамповки сложных пространственных деталей.

6. В настоящее время отсутствуют методики комплексного проектирования процессов получения заготовок повышенной точности методами ГПО, в частности определения геометрии деформирующего инструмента, позволяющего получать изделия требуемой точности.

2. Математическое моделирование формоизменения и контактного взаимодействия заготовки и формообразующего инструмента.

Предварительный анализ процесса калибровки. Выбор модели материала.

Технологический процесс изготовления поковок ЗТЛ представляет собой определенную последовательность операций, включающих в себя

1. резку исходных заготовок из проката, в основном с использованием методов механической обработки;
2. профилирование заготовок на горизонтально-ковочных машинах, ковочных вальцах, ротационно-ковочных машинах и др.;
3. штамповку поковок на прессах за один или несколько переходов;
4. обрезку облоя;
5. горячую калибровку поковок;
6. термическую обработку.

Определяющее влияние на характеристики точности получаемых поковок ЗТЛ оказывает финишная операция пластической обработки – горячая калибровка. Процесс горячей калибровки поковки турбинной лопатки сопровождается упругопластическими и объемными температурными деформациями поковки, а также упругими деформациями штамповых вставок, штампового блока и конструкции прессы.

Неравномерное остывание поковки и неравномерный разогрев штамповых вставок в ходе технологической операции горячей калибровки приводит к неравномерному распределению предела текучести и модуля упругости по объему поковки и штамповых вставок, что, в свою очередь, оказывает влияние на точность готовой поковки. Поскольку пластические деформации поковки при горячей калибровке относительно малы, упругие, пластические и температурные деформации поковки и деформации инструмента соизмеримы и должны быть в равной степени корректно учтены.

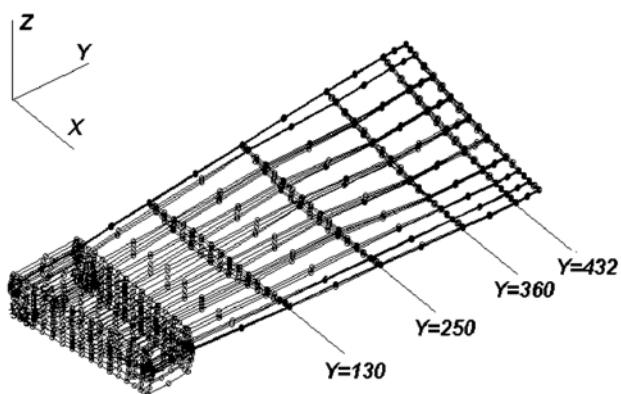


Рис. 1 Сетка конечных элементов поковки.

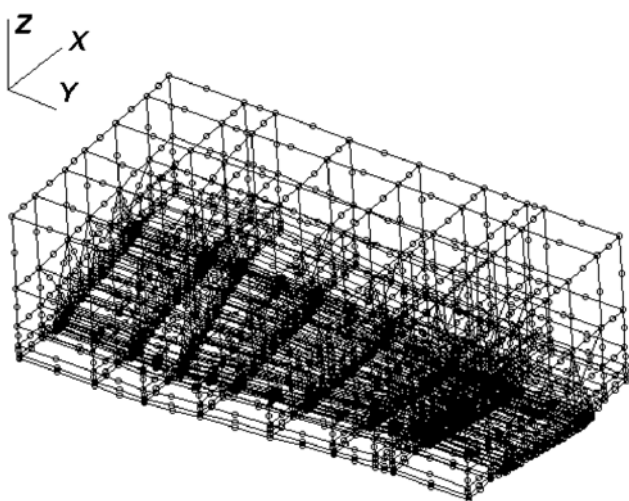


Рис. 2 Сетка конечных элементов верхнего штампа.

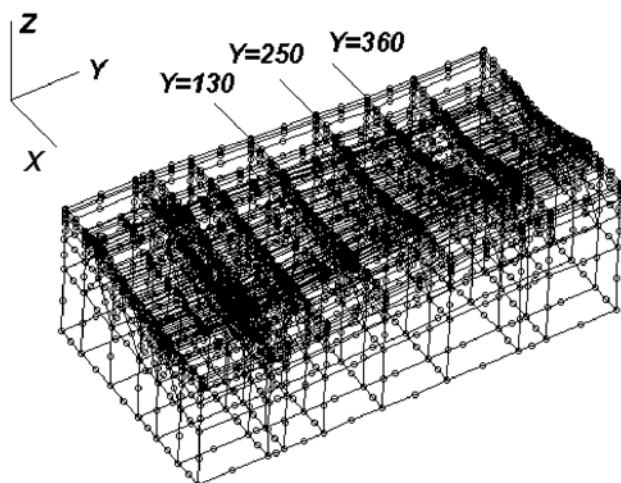


Рис. 3 Сетка конечных элементов нижнего штампа.

проведены предварительные исследования этого процесса для характерного поперечного сечения перовой части ЗТЛ в условиях плоской деформации. При моделировании использовались три расчетные модели: малых упругопластических деформаций и два варианта теории течения: упруговязкопластическая, то есть с

Каждое из трех тел, участвующих во взаимодействии: поковка, верхняя и нижняя штамповые вставки - аппроксимируются сетками конечных изопараметрических элементов (рис. 1-4).

Решение задачи термоупругопластичности включает последовательное решение задач нестационарной теплопроводности и теории упругости или пластичности.

В ходе решения задачи теплопроводности определяется распределение температур по объему поковки и штампов, а также объемные термические изменения, соответствующие последовательным шагам по времени, для которых затем определяются напряжения и деформации.

Горячая калибровка в штампе характеризуется относительно малыми обжатиями, которые определяются величиной припуска под калибровку или величиной «недоштамповки» в окончательном штампе.

В рассматриваемых ниже тестовых примерах величина припуска под калибровку принималась постоянной для всей перовой части поковки лопатки и равной $dh=0.3\text{мм}$. Поэтому этот процесс нельзя рассматривать с точки зрения общепринятых закономерностей теории обработки металлов давлением, типичных для больших пластических деформаций.

Для качественной оценки влияния различных моделей материала на характеристики напряженно-деформированного состояния металла при операции горячей калибровки были -

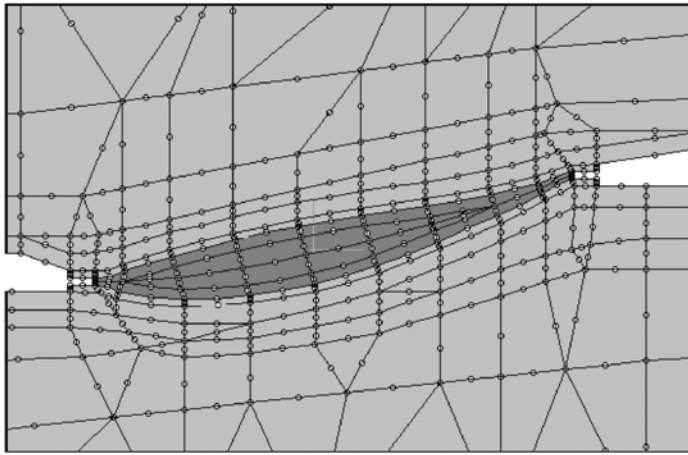


Рис. 4 Сечение ($y = 130\text{мм}$) сеток конечных элементов.

$$S_{ij} = \left(\frac{1}{2G\Delta\tau} + \frac{1}{2\mu} \right)^{-1} \left[\dot{\varepsilon}_{ij} - \delta_{ij} \frac{\sigma_0}{3K\Delta\tau} + \left(\frac{S_{ij}^*}{2G\Delta\tau} + \delta_{ij} \frac{\sigma_0^*}{3K\Delta\tau} - \delta_{ij} \frac{\Delta\varphi}{\Delta\tau} \right) \right],$$

где скорость деформации представлена в виде трех составляющих: скоростей упругой, пластической и температурной деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \dot{\varphi}$,

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{\dot{S}_{ij}}{2G} + \delta_{ij} \frac{\dot{\sigma}_0}{3K} \quad \text{- скорость упругой деформации,}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{S_{ij}}{2\mu} \quad \text{- скорость пластической деформации,}$$

μ - коэффициент вязкости.

Скорость объемной деформации в произвольный момент времени

$$\dot{\varepsilon}_0 = 3\dot{\varphi} + \frac{1}{K} \frac{d\sigma_0}{dt} \quad . \quad G \text{ и } K \quad \text{- модули сдвиговой и объемной деформации.}$$

Процесс горячей калибровки на предварительном этапе исследования рассматривался как процесс жесткого нагружения поковки (вертикальное перемещение верхнего штампа на $\Delta h = 0,3\text{мм}$) за 6 шагов деформирования.

На рис. 5-7 приведены эпюры контактных напряжений σ_z по этапам нагружения для сечения $Y=360$ мм, полученные на основе двух вариантов теории течения и теории малых упругопластических деформаций. Для исключения влияния температурного фактора рассматривался изотермический процесс при температуре металла $T = 1100^\circ\text{C}$.

На первых стадиях нагружения при обжатии $\Delta h = 0,1\text{мм}$, качественных различий в эпюрах контактных напряжений, полученных на основе теории упруговязкопластического течения и теории малых упругопластических деформаций, нет; количественные различия соизмеримы с точностью численных расчетов.

По мере увеличения величины обжатия различия становятся все более заметными; при обжатии $\Delta h = 0,3\text{мм}$ имеем две принципиально разные эпюры

учетом упругих деформаций и жестковязкопластическая, с использованием условия несжимаемости.

В соответствии с моделью упруговязкопластического материала компоненты девиатора напряжений S_{ij} являются функцией скорости деформации, гидростатического давления и напряженного состояния, сформировавшегося на предшествующем этапе процесса (значок-*).

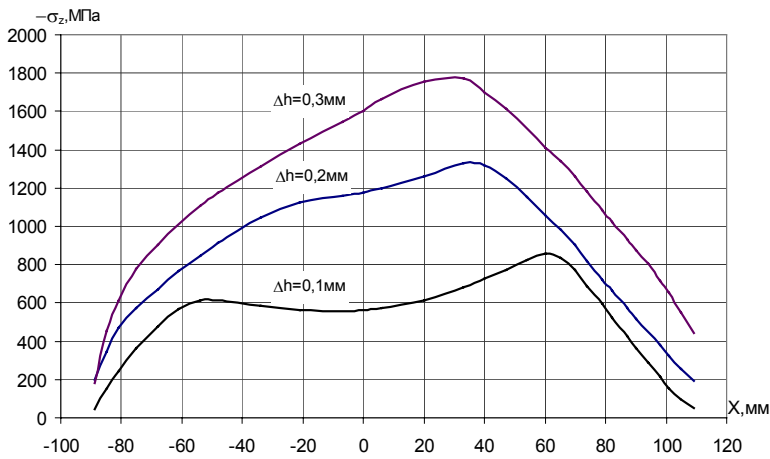


Рис. 5 Эпюры контактных напряжений σ_z (теория упруго-вязкопластического течения).

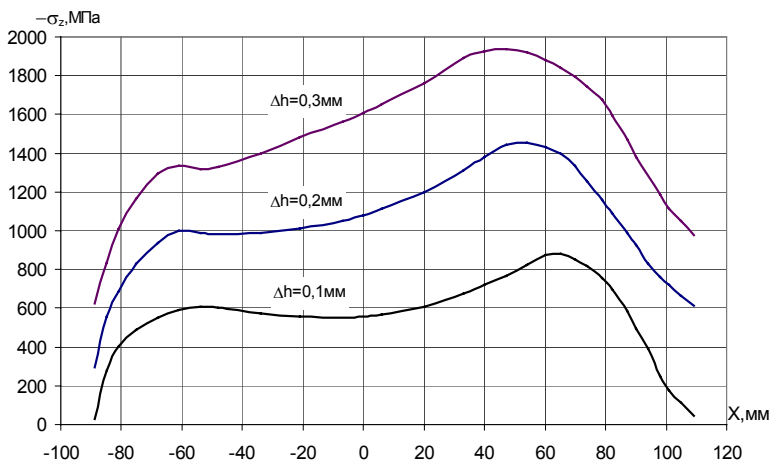


Рис. 6 Эпюры контактных напряжений σ_z (теория малых упругопластических деформаций).

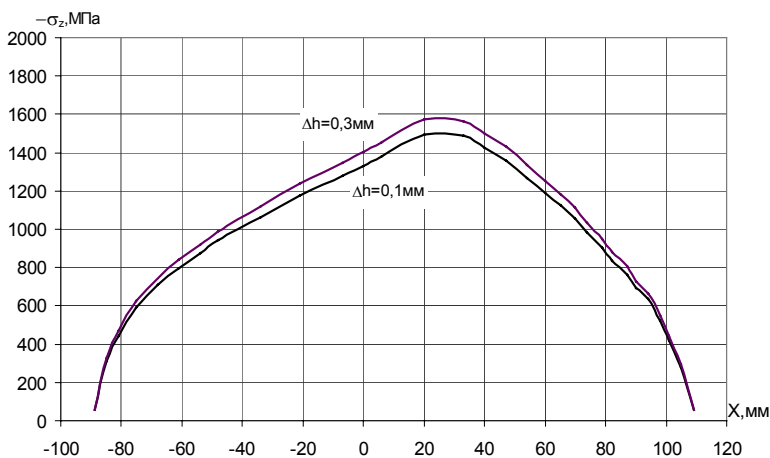


Рис. 7 Эпюры контактных напряжений σ_z (теория вязкопластического течения).

Чтобы объяснить причину сходства и различий в эпюрах контактных напряжений (рис. 5 и 6) следует иметь в виду что на ранних стадиях нагружения ($\Delta h \leq 0,1\text{мм}$) фактором, определяющим характер эпюры контактных напряжений,

контактных напряжений. Эпюра напряжений, полученная по теории течения, имеет характерный куполообразный вид, типичный для многих процессов обработки металлов давлением (рис. 5).

Эпюра напряжений, полученная по теории малых упругопластических деформаций, имеет два максимума, соответствующих (по месту) максимальным относительным деформациям. При одинаковых абсолютных обжатиях Δh относительное обжатие тем больше, чем меньше высота профиля. В районах выхода металла в облойную канавку значения напряжений от максимальных резко снижается до величины, соизмеримой с пределом текучести материала (рис. 6). Максимум контактных напряжений на выходной кромке пера лопатки (на эпюре справа) выше значения максимума в районе передней кромки лопатки. Положение максимума напряжений σ_z по теории течения (рис. 5) смещено в сторону задней более узкой кромки пера.

Решение, полученное на основе модели вязкопластической среды (модель Шведова), с соблюдением условия постоянства объема, дает классическую для обработки давлением эпюру контактных напряжений (рис. 7).

является упругое изменение объема. При расчете по теории малых упругопластических деформаций в условиях плоской деформации ($\varepsilon_y = 0$) и относительно тонкого клиновидного с внешних сторон профиля поковки, течение металла в заусенец затруднено. Схема напряженного состояния, близкого к гидростатическому сжатию, обуславливает объемные деформации тем большие, чем выше относительные обжатия. В результате эпюра контактных напряжений приобретает два максимума.

При расчете по теории упруговязкопластического течения в соответствии с принятой реологической моделью материала включается механизм демпфирования, что приводит к качественным изменениям эпюры контактных напряжений: напряжения нарастают от свободных поверхностей (выходов в заусенец) к середине сечения.

Приведенные модельные примеры позволяют сделать вывод, что рассматриваемый процесс обработки давлением (калибровка) целесообразно трактовать как процесс жесткого нагружения с упруговязкопластическими деформациями, что позволяет учитывать изменения характера напряженно-деформированного состояния в поковке при калибровке в зависимости от значений относительных обжатий.

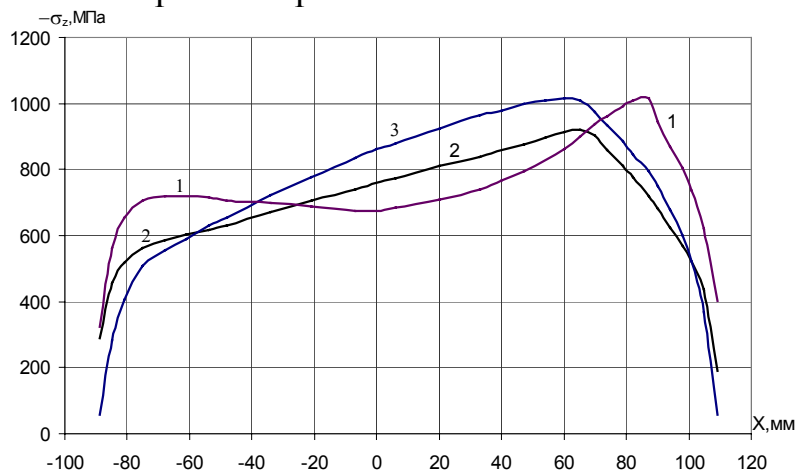


Рис. 8 Эпюра контактных напряжений σ_z при плоской деформации сечения $Y = 130\text{мм}$ ($\Delta h = 0,3\text{мм}$).

1 – по теории малых упругопластических деформаций;
2 – по теории упруговязкопластического течения;
3 – по теории жесткопластического течения.

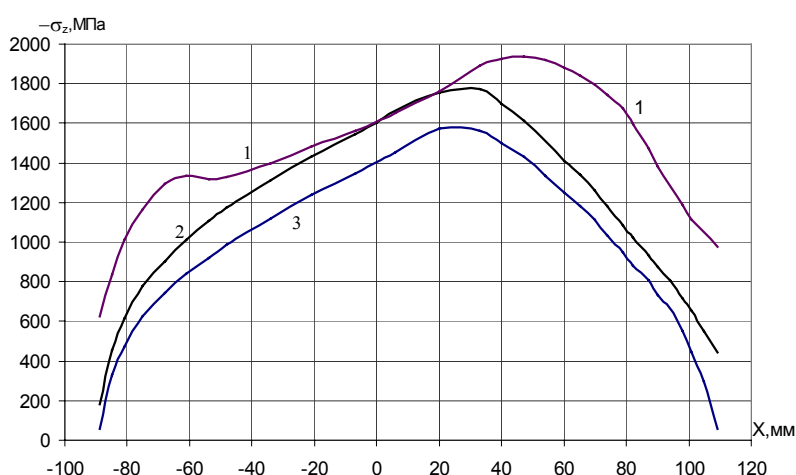


Рис. 9 Эпюра контактных напряжений σ_z при плоской деформации сечения $Y = 360\text{мм}$ ($\Delta h = 0,3\text{мм}$).

1 – по теории малых упругопластических деформаций;
2 – по теории упруговязкопластического течения.
3 – по теории жесткопластического течения.

На рис. 8 и 9 для модельного варианта $\varepsilon_y = 0$, $T = 1100^\circ = \text{const}$ показан характер деформированного состояния наиболее массивного $Y = 130\text{мм}$ и наиболее тонкого $Y = 360\text{мм}$ сечения пера лопатки при обжатии $\Delta h = 0,3\text{мм}$. В большей части се-

чения перемещения вдоль оси X отсутствуют; лишь на небольшом расстоянии от боковых кромок происходит течение металла в направлении облойных канавок. Именно в этих объемах металла происходят пластические деформации; в остальной части сечения интенсивность пластических деформаций близка к нулю. Выход металла в облой в сторону передней кромки пера лопатки – в пределах 1мм; в сторону задней кромки, где относительные деформации выше из-за меньшей толщины профиля – в пределах 2мм.

Для проверки адекватности применения предлагаемой модели упруго-вязкопластического течения для расчета процесса калибровки поковок были проведены исследования и сравнение результатов моделирования и экспериментальных исследований деформированного состояния с использованием оптически чувствительных покрытий (ОЧП) при осадке стальных образцов в условиях плоско-напряженного состояния для малых упругопластических деформаций. Сравнение показало хорошее качественное и количественное совпадение результатов исследований по распределению деформаций в образцах в пределах 5-20%. Большая величина погрешности относится к области малых значений деформаций.

Исследование температурных полей в поковке.

При моделировании температурных полей в поковке использовались следующие начальные условия и данные процесса. Нагретая до температуры $T = 1100^\circ$ поковка переносится из печи к прессу, укладывается в нижний штамп, и далее происходит рабочий ход пресса. Хронометрирование процесса показывает, что в течение 2 секунд поковка охлаждается на воздухе (перенос поковки от печи к прессу), далее 0,5 секунд нижняя поверхность поковки отдает тепло нижнему штампу, а верхняя охлаждается на воздухе; во время рабочего хода обе поверхности охлаждаются в штампе. Таким образом, реальный процесс калибровки происходит не при $T = 1100^\circ$, а в условиях неравномерного распределения температур по объему поковки. При этом поверхность поковки турбинной лопатки охлаждаются до $T \approx 800^\circ$. Термомеханические характеристики материала распределяются в заготовке в зависимости от распределения температурного поля. Поле температур в поковке строится на основании решения задачи нестационарной теплопроводности с граничными условиями 3 рода.

Коэффициент теплоотдачи при охлаждении поковки в нижнем штампе без нагрузки принимался равным $h = 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}}$; при охлаждении поковки в штампе во

время рабочего хода (под нагрузкой) - $h = 8000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}}$. Эти значения коэффициен-

тов теплоотдачи получены последовательным подбором и решением задачи теплопроводности до достижения температуры поверхности поковки, известной из эксперимента. Переход от температуры, известной на момент окончания рабочего хода, к значениям коэффициента теплоотдачи необходим для построения полей температур для нескольких моментов времени, соответствующих этапам решения задачи термоупругопластичности.

В данном расчете процесс калибровки с общим обжатием $\Delta h = 0,3\text{мм}$ прослеживался за 6 этапов с обжатием на каждом из них $\Delta h = 0,05\text{мм}$. Каждому из 6 этапов нагружения соответствовали поля температур в моменты времени, отсчитанные от момента укладки поковки в нижний штамп.

Распределение температур характеризуется высокой неравномерностью как в пределах каждого сечения, так и в различных сечениях вдоль пера лопатки. В массивных сечениях (близких к замковой части) основная часть металла сохраняет исходную температуру $T = 1100^\circ$; пониженную температуру имеет лишь тонкий поверхностный слой, пределах 1-1,5 мм.

Напряженно-деформированное состояние металла поковок в неизотермических условиях калибровки.

Неравномерное температурное поле вносит определенные коррективы в распределение напряжений по объему поковки, показанные на рис. 10. Влияние неравномерного поля температур проявляется через два основных фактора:

- во-первых, изменение термомеханических свойств материала в зависимости от температуры в точке;
- во-вторых, свободные объемные температурные деформации, приводящие к формированию растягивающих напряжений в остывающих поверхностных слоях.

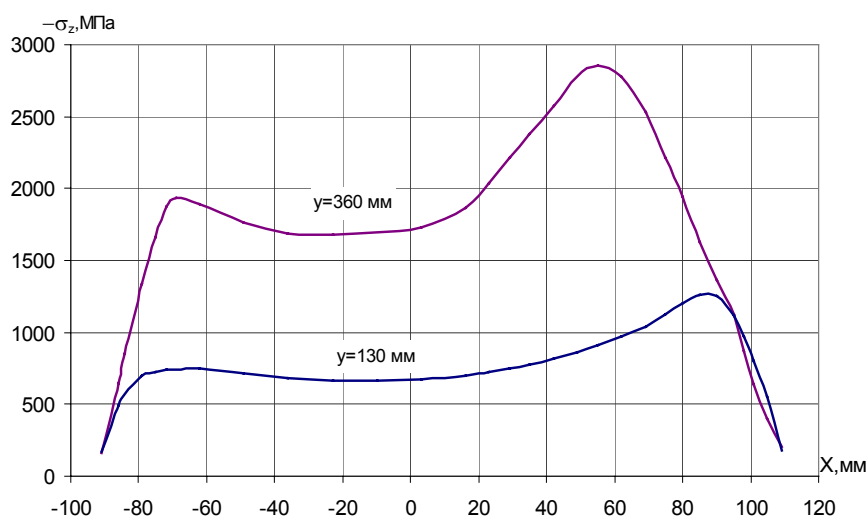


Рис. 10. Эпюры контактных напряжений по сечениям пера лопатки с учетом температурных полей. X - координата вдоль ширины лопатки; Y - координата вдоль пера лопатки.

Поскольку наиболее интенсивно охлаждаются тонкие сечения, именно в них повышаются механические свойства. Если учесть, что в этих же тонких сечениях формировались высокие напряжения, обусловленные геометрическим фактором, влияние температурного фактора в данном случае суммируется с влиянием фактора геометрии. Общий уровень сжимающих напряжений, оказывается выше, чем при калибровке в изотермических условиях.

Для $Y = 130\text{мм}$ эпюра контактных напряжений почти полностью совпадает с изображенной на рис. 10 для случая калибровки при $T = 1100^\circ = \text{const}$. Более того, за счет охлаждения поверхностных слоев и наведения в них растягивающих напряжений, пропорциональных $\alpha \cdot \Delta T$ (α - коэффициент линейного расширения), в массивной (средней) части сечения, сжимающие напряжения оказываются несколько ниже.

По мере уменьшения высоты сечения ($Y = 250, Y = 360\text{мм}$) возрастает относительная деформация, уменьшается температура, что обуславливает более высокий уровень контактных напряжений, превышающих аналогичные значения для рассмотренных ранее изотермических условий. Понижение контактных напряжений в сечении $Y = 432\text{мм}$, более тонком, чем сечение $Y = 360\text{мм}$, объясняется концевым эффектом – расположением сечения у края поковки.

Исследование температурных полей в калибровочном штампе.

Температурные режимы работы верхней и нижней штамповых вставок, как было показано выше, несколько различаются. Верхний штамп соприкасается с поковкой только во время рабочего хода (0,2с); нижний штамп контактирует с поковкой до ее извлечения из ручья 1,2с. Все остальное время штампы охлаждаются на воздухе.

Построение полей температур в штамповых вставках выполняется аналогично тому, как это описано для полей температур в поковке. Для расчета использовались граничные условия 3 рода с теми же коэффициентами теплоотдачи на воздухе, во время рабочего хода для верхнего и нижнего штампов и во время нахождения в нижнем штампе без нагрузки. В качестве температуры окружающей среды задавалась $T_{\infty} = 50^{\circ}$ для охлаждения на воздухе и $T_{\infty} = 1100^{\circ}$ - во время нахождения поковки в штампе.

При ритме калибровки $\Delta t = 30\text{сек}$, примерно к десятому циклу происходит выход на установившийся температурный режим. При этом на поверхностях штамповой вставки, контактирующих со штамповым блоком, поддерживается практически постоянная температура $210^{\circ} - 220^{\circ}$; температура поверхности ручья изменяется в пределах $280^{\circ} - 550^{\circ}$. Термический цикл работы штампов в установившемся процессе показан на рис. 11.

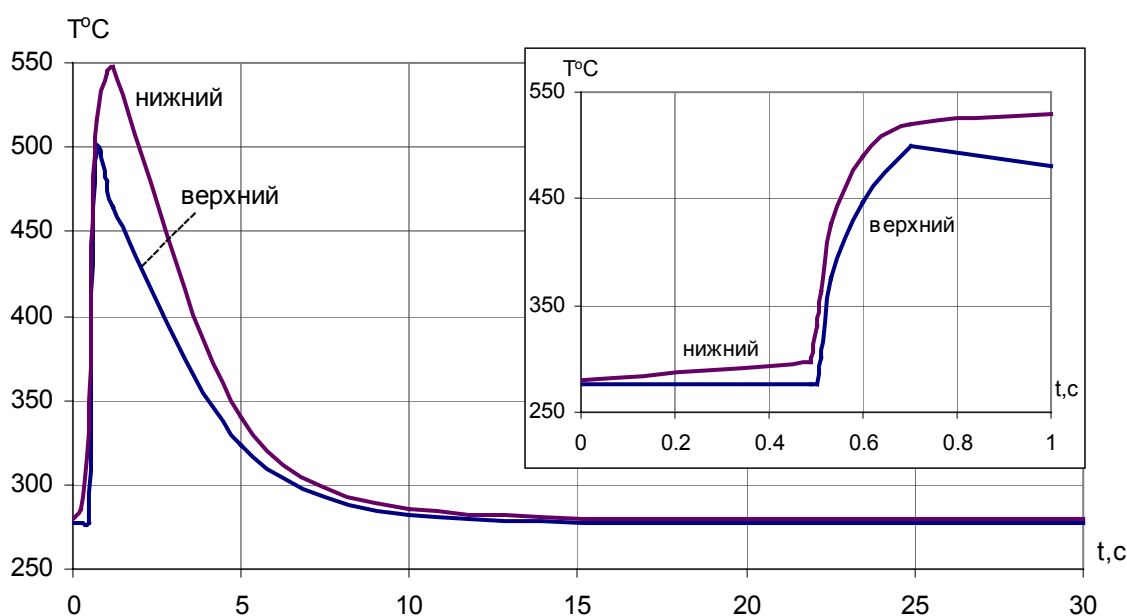


Рис. 11. Термические циклы работы верхнего и нижнего штампов – изменение температуры на гравюре штамповой вставки при ритме штамповки $\Delta t = 30\text{сек}$.

Распределение температур по гравюрам штампов, в перовой зоне лопатки, близко к равномерному, за исключением краев штамповой полости – на стыке с неконтактными поверхностями. Градиенты температур имеются в углах полости, соответствующей замковой части лопатки.

Моделирование контактного взаимодействия системы заготовка – инструмент.

Решение задачи термоупругопластичности МКЭ для поковки и для штампов может быть выполнено только при условии задания граничных условий в перемещениях или напряжениях на поверхностях контакта. В анализируемом процессе горячей калибровки поковки эпюры контактных перемещений и контактных напряжений не могут быть заданы, т.к. они являются основными искомыми параметрами и подлежат определению в ходе решения контактной задачи - задачи о взаимодействии поковки, верхней и нижней штамповых вставок.

Математическая постановка контактной задачи формулируется следующим образом: при заданном перемещении верхнего штампа на поверхностях контакта поковки с инструментом вертикальные перемещения точек поверхности поковки и штампа должны быть одинаковы, а узловые силы - одинаковы по абсолютной величине и противоположны по направлению (для напряжений только одинаковые значения). Выполнение этих условий на обеих контактных поверхностях соответствует точному решению контактной задачи Герца.

При численном решении выполнение контактных условий возможно лишь с некоторой заданной (требуемой) точностью. Эта точность может быть достигнута методом последовательных приближений - путем поочередного численного решения задачи термоупругопластичности для поковки, верхней и нижней штамповых вставок - с постепенным уточнением граничных (контактных) условий для каждого из анализируемых тел.

На рис. 12 представлена схема расчета задачи контактного взаимодействия системы заготовка – инструмент.

При решении контактной задачи на каждом шаге моделирования задавались фиксированные перемещения угловых точек (узлов) на опорной поверхности штамповых вставок ($u_z/2$).

Влияние воздействия штампового блока, стола пресса (для нижней вставки) и ползуна (для верхней вставки) на опорную поверхность вставок при нагружении задавались при помощи задания жесткости на поверхности соответствующих элементов.

Боковые поверхности вставок фиксируются в штамповом блоке при помощи клина, то есть на них также воздействует определенная жесткость.

Как показали предварительные исследования влияние этого параметра на прогиб штамповых вставок в вертикальном направлении незначителен по сравнению с опорной поверхностью. При моделировании горизонтальные перемещения боковых поверхностей в пределах их контакта со штамповым блоком задавались нулевыми.

Алгоритм поиска векторов перемещений $\{U\}$ и напряжений σ_z выглядит следующим образом.

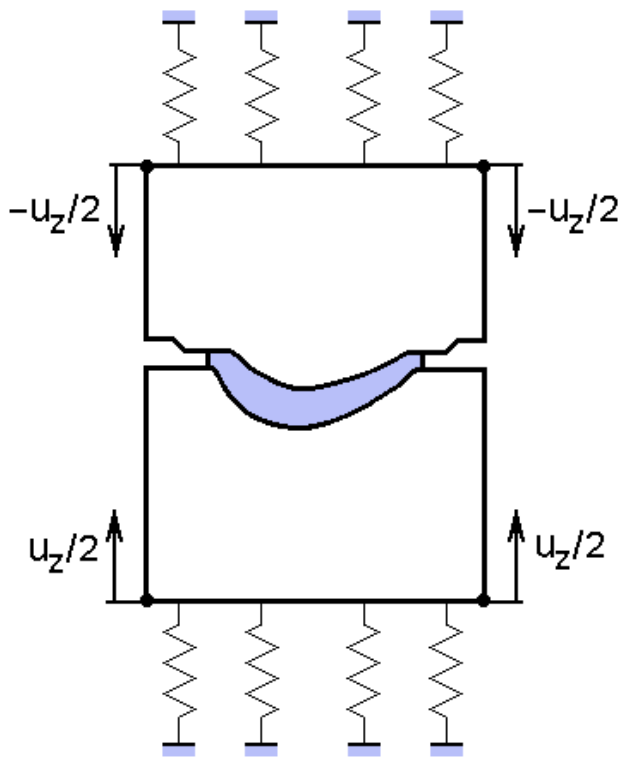


Рис. 12 Схема расчета контактного взаимодействия системы заготовка – инструмент.

Если вычисленные перемещения узлов штампа $\{u\}_{шт}$ отличаются от перемещений соответствующих узлов поковки, необходимо сделать следующее приближение, задав в качестве граничных условий для расчета поковки

$$\{u\}^{(1)} = p\{u\}_{шт} + (1 - p)\{u\}^{(0)}$$

Здесь $p < 1$ - итерационный параметр, подбираемый с целью ускорения сходимости итерационного процесса нахождения контактных перемещений.

Поскольку контактные напряжения передаются из решения задачи о поковке в качестве граничных условий для расчета напряженно-деформированного состояния штампа, итерационный процесс решения контактной задачи заканчивается по условию

$$|\{u\}^{(n)} - \{u\}_{шт}| < \delta,$$

где $\{u\}^{(n)}$ - n-приближение вектора перемещений, задаваемого в качестве граничного условия при расчете поковки;

δ - требуемая точность сходимости итерационного процесса.

В случае упругопластического взаимодействия трех тел (поковка и два штампа) равенство контактных напряжений и распределения перемещений контактирующих тел должно быть соблюдено во всех точках обеих контактных поверхностей. При численном решении контактной задачи с тремя телами поочередно решаются две контактные задачи взаимодействия поковки с верхним и нижним штампами.

Методом конечных элементов решается задача формоизменения одного тела (поковки) при заданных граничных условиях в перемещениях $\{u\}^{(0)}$, обусловленных перемещением другого тела (штампа) как жесткой недеформируемого тела. Результатом такого решения являются, в частности, приведенные напряжения по контуру области. Рассчитанные для сторон граничных элементов напряжения, являющиеся реакцией на перемещение штампа, могут быть использованы для расчета напряженно-деформированного состояния штампа в качестве граничных условий силового нагружения. Результатом решения методом конечных элементов задачи о штампе являются, в частности, перемещения узлов контактной поверхности $\{u\}_{шт}$.

Следует иметь в виду, что при решении контактной задачи нас интересует только конечные деформации штамповых вставок на последнем этапе процесса калибровки. В этом случае, как показал анализ взаимодействия итерационных процессов на модельных задачах, целесообразно использовать следующий алгоритм.

При решении контактной задачи общее перемещение верхнего штампа ΔH следует представить в виде последовательности малых перемещений Δh поочередно верхнего и нижнего штампов, где $\Delta H = \sum |\Delta h|$ - суммарное обжатие поковки.

На каждом шаге моделирования, начиная с первого, определяется напряженно-деформированное состояние металла поковки. Полученные из решения контактные напряжения на гравюре затем задаются в качестве граничных условий при решении задачи нагружения верхней и нижней штамповых вставок. В результате расчета получаем распределение параметров напряженно-деформированного состояния в инструменте, перемещений гравюры штампов и ее новую геометрию. На следующем шаге моделирования течения металла поковки ($i+1$) в качестве граничных условий задаются перемещения узлов на контактной поверхности, полученные из новой геометрии гравюры штампа на предыдущем шаге. При этом величина шага перемещения Δh_{i+1} должна быть увеличена на величину максимального перемещения гравюры. Такая последовательность задания граничных условий в перемещениях позволяет поддерживать примерное равенство суммарных узловых сил по верхней и нижней контактной поверхностям. После достижения равенства $\Delta H = \sum |\Delta h|$ достаточно двух-трех итераций при $\Delta h = 0$, чтобы достичь приемлемой точности выполнения условий равновесия поковки, находящейся под действием усилий - реакций со стороны верхнего и нижнего штампов.

Полученное в результате решения контактной задачи распределение прогибов верхней и нижней штамповых вставок имеет весьма неравномерный характер и представляет собой куполообразную фигуру, у которой положение максимума прогиба соответствует приблизительно середине перовой части, а максимальная величина суммарного прогиба соизмерима с величиной обжатия.

Чтобы дать количественную оценку влияния упругих деформаций штампа на напряженно-деформированное состояние поковки, необходимо сопоставить эпюры контактных напряжений, полученные исходя из представления о жестком недеформируемом штампе и в результате решения задачи о взаимодействии поковки и штампа (контактной задачи); и в том, и в другом случае необходимо решить трехмерную задачу.

На рис. 13 и 14 показаны эпюры контактных напряжений для двух характерных сечений поковки $Y = 360\text{мм}$ и $Y = 130\text{мм}$, полученные на стадии процесса $\Delta h = 0,05\text{мм}$ из условий абсолютно жесткого и упруго деформирующегося штампа. Эпюры 1 и 2 получены из решения контактной задачи и относятся к первой и последней итерации.

Нетрудно было предвидеть, что учет упругих деформаций штампа в тонком сечении поковки ($Y = 360\text{мм}$) с высокими контактными напряжениями должен привести к снижению общего уровня напряжений. Изменился также характер распреде-

ления напряжений по ширине сечения. В районе передней кромки лопатки положение и величина максимума напряжений практически не изменились. В центральной части сечения за счет общего прогиба штампа напряжения резко снизились. Ориентация поковки, общий прогиб штампа и неравномерное распределение напряжений привели в районе задней кромки к значительному снижению и смещению максимума напряжений в сторону облойной канавки.

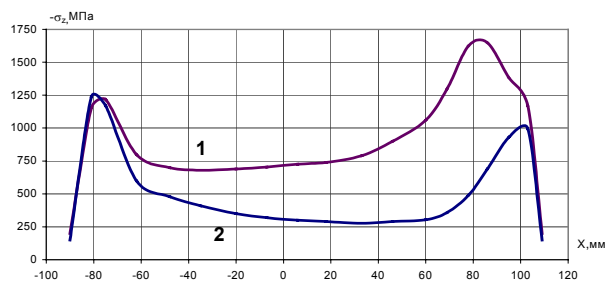


Рис. 13 Эпюры контактных напряжений для сечения $Y = 360\text{мм}$, 1 – жесткий штамп, 2 – упруго деформирующийся штамп.

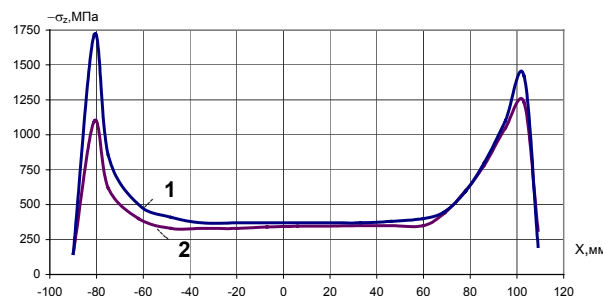


Рис. 14. Эпюра контактных напряжений для сечения $Y = 130\text{мм}$, 1 – жесткий штамп, 2 – упруго деформирующийся штамп.

Таким образом, общий прогиб поверхности ручья штампа вносит существенные изменения не только в эпюру контактных напряжений, полученную из условия абсолютно жестких штампов, но и оказывает значительное влияние на конечную геометрию поковок после калибровки. Важно также отметить, что прогиб оказывает влияние на такой важный параметр, как равномерность припуска под механическую обработку, характеризующий геометрию поковок повышенной точности. Для обеспечения равномерности припуска необходимо вводить коррекцию гравюры калибровочного штампа, компенсирующую его прогиб.

Второй весьма важный вывод, следующий из решения контактной задачи, заключается в том, что равномерный припуск под калибровку не может быть получен на предыдущем переходе штамповки, без соответствующей коррекции гравюры штампа.

Таким образом, характеристики геометрии поковок после калибровки в значительной степени зависят от геометрии заготовки после первого перехода штамповки, главным образом от распределения и величины припуска под калибровку, то есть наблюдается явная наследственность процесса.

Исследование влияния первого перехода штамповки на величину припуска на калибровку поковок.

Для определения характеристик геометрии поковок после первого перехода штамповки с учетом прогиба штамповых вставок было проведено моделирование течения металла при формообразовании на первом переходе штамповки.

Как и при исследовании процесса калибровки при моделировании первого перехода штамповки решалась нестационарная задача термоупругопластичности с учетом условий нестационарного теплообмена заготовки с инструментом. Все основные характеристики процесса задавались аналогично описанному выше при мо-

делировании процесса калибровки. Коэффициент трения принимался равным $\mu=0,3$, температура нагрева заготовки $T=1180^{\circ}\text{C}$. Процесс разбивался на 50 шагов деформирования, на начальных этапах $\Delta h=1$ мм, на конечных этапах $\Delta h=0,2$ мм. В связи с тем, что течение металла в перовой части полости штампа происходит в основном в поперечном направлении, за исключением замковой части и внешней торцевой части пера, для ускорения процесса моделирования расчеты производились для контрольных сечений перовой части при условии плоско-деформированного состояния $\epsilon_y=0$. В процессе моделирования, по мере искажения сетки конечных элементов, производилась переразбивка сетки с последующей аппроксимацией параметров температурного поля и напряженно-деформированного состояния в металле. На рис. 15 представлены исходные (после переразбивки) и деформированные сетки конечных элементов для на различных стадиях процесса штамповки заготовки турбинной лопатки для сечения $Y=130$ мм. Следует отметить, что полученное распределение контактных напряжений при моделировании течения металла практически совпадало по характеру с распределением, представленным на рис. 5 для $\Delta h=0,3$ мм, и отличалось для различных сечений только по величине максимального значения.

На основании полученных распределений контактных напряжений по сечениям перовой части производилась их аппроксимация по поверхности контакта. В торцевых областях перовой и замковой части (облойная канавка) значения принимались равными пределу текучести при минимальной температуре штамповки.

Решение контактной задачи проводилось по аналогичной методике, описанной выше при моделировании калибровки. Коррекция геометрии гравюры штампа проводилась на каждом пятом шаге для первых 45 этапов, а затем на каждом шаге моделирования.

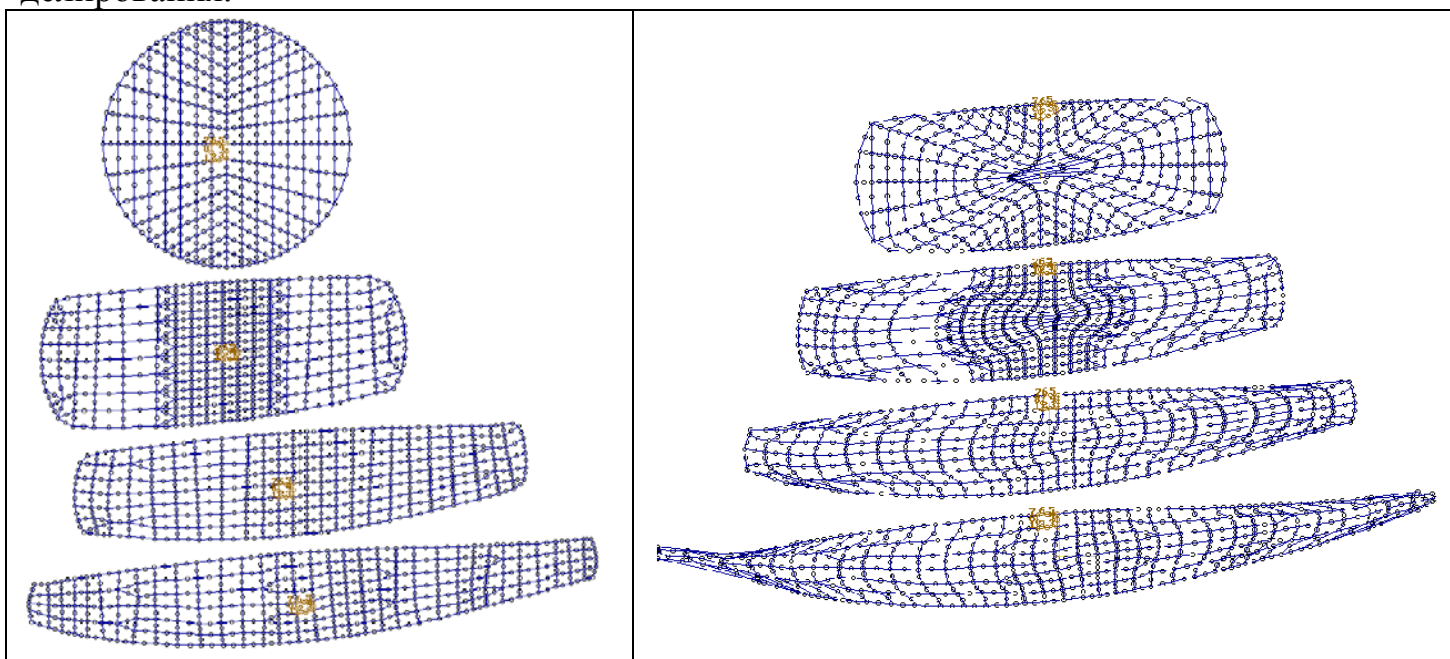


Рис. 15 Исходные и деформированные сетки конечных элементов на различных стадиях процесса штамповки заготовки турбинной лопатки для сечения $Y=130$ мм.

Полученное распределение прогибов гравюры штампов имеет куполообразный характер, с положением максимума приблизительно в центральной части пера. Максимальный относительный прогиб гравюры $\Delta u_{\max} = u_{\max} - u_{\min}$ составляет для верхней вставки $\Delta u_{\max} = 0,91$ мм, для нижней $\Delta u_{\max} = 0,88$ мм.

Следует отметить, что упругое пружинение заготовки после снятия нагрузки относительно ее толщины на порядок меньше и составляет сотые доли мм.

Моделирование контактного взаимодействия заготовки и штампового инструмента при калибровке с учетом неравномерного припуска на калибровку.

Полученная в результате моделирования геометрия поковки после первого перехода штамповки задавалась в качестве исходных данных при последующем моделировании процесса калибровки поволоков (сетка КЭ). При моделировании процесса калибровки с переменной величиной припуска (под калибровку) в начальный момент контакт заготовки со штампом происходит в точке. Затем контактная поверхность постепенно увеличивается по длине и ширине до момента заполнения полости калибровочного штампа. Расчеты процесса горячей калибровки выполнены при коэффициенте трения $\mu = 0,3$.

На рис. 16 показано исходное и конечное положение верхнего и нижнего калибровочных штампов и конечноэлементной модели поковки турбинной лопатки для сечения $Y = 360$ мм. В увеличенном масштабе показаны фрагменты поковки и штампов в районах выхода металла в облойную канавку.

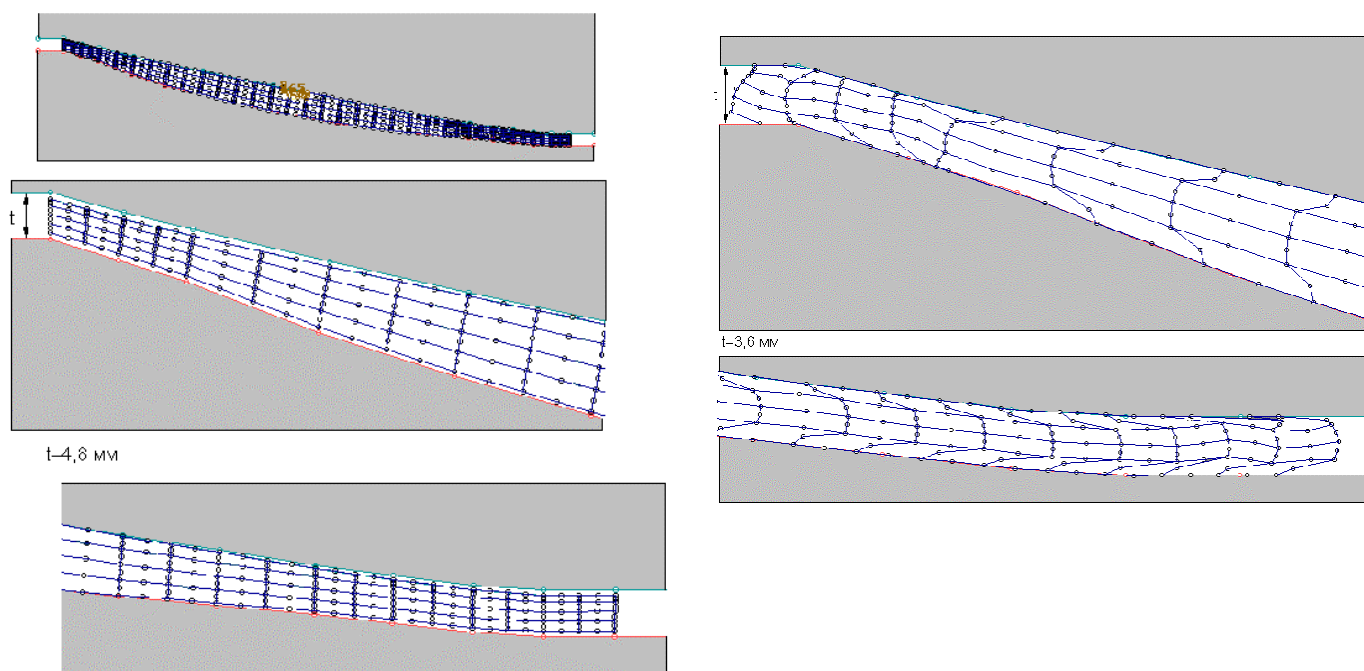


Рис.16 Исходное и конечное положение поковки в калибровочном штампе сечения $Y = 360$ мм.

На рис. 17 и 18 представлены распределения вертикальных напряжений и прогибы верхней вставки калибровочного штампа при неравномерном припуске под калибровку, полученные в результате моделирования.

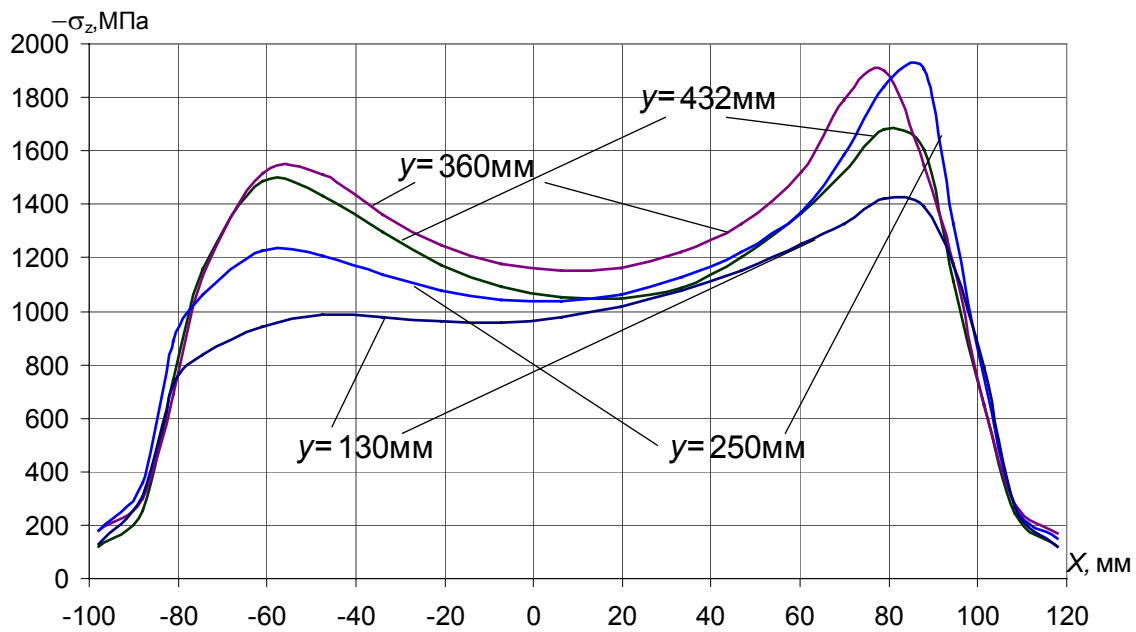


Рис. 17 Эпюры контактных напряжений в верхней вставке

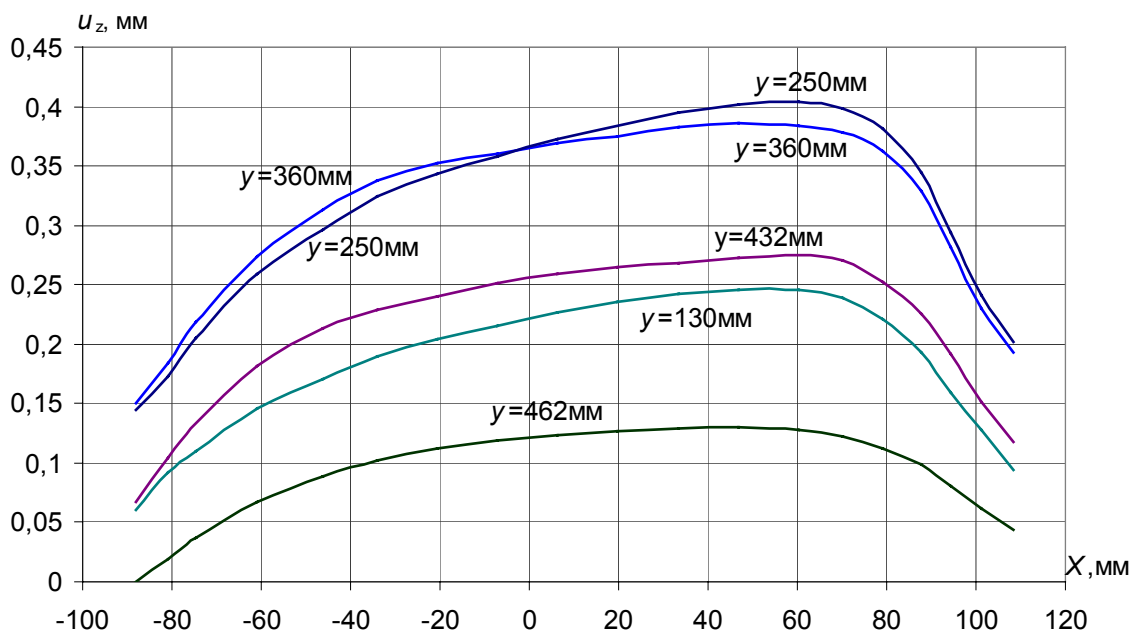


Рис. 18 Эпюра контактных перемещений верхним штампом по сечениям поковки.

3. Термические деформации заготовок при охлаждении после калибровки (коробление поковок).

Моделирование термомеханических процессов охлаждения поковки после калибровки предполагает совместное решение уравнений нестационарной теплопроводности и теории упруговязкопластических деформаций. Процесс прослеживается

во времени от момента снятия нагрузки после калибровки. Расчет полей температур и формоизменения выполнялся за 31 этап, охватывая промежуток времени 3 часа.

В связи с разными условиями охлаждения до рабочего хода, во время рабочего хода пресса и при охлаждении поковки на воздухе поле температур и его изменение во времени носят достаточно сложный характер.

Наиболее высокую температуру к концу рабочего хода сохраняют объемы металла массивных сечений ($y = 130$ мм), близкие к замковой части; наиболее низкую температуру имеют тонкие кромки (входная и выходная) удаленных от замка сечений. Перепад температур по объему поковки к концу рабочего хода приближается к $\Delta T = 300^\circ$.

В связи с кратковременностью пребывания заготовки в штампах ($\Delta t = 0,7$ с) потери тепла невелики (охлаждается только тонкий поверхностный слой). Поэтому влияние термической усадки на этой стадии процесса не является определяющим или заметным на фоне формоизменения, вызываемого деформированием поковки.

Кинетика изменения прогиба в точке А (в самом тонком месте поковки) представлена на рис. 19. На этом же рисунке показано изменение температуры в той же точке А и в точке В, расположенной в центре замковой части и имеющей максимальную в объеме поковки температуру.

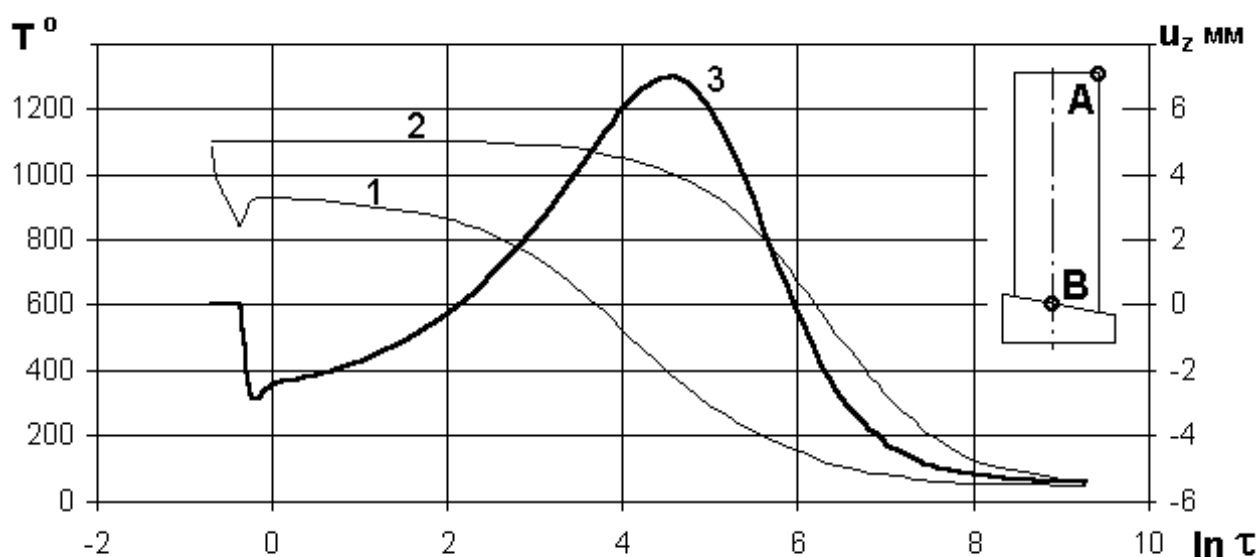


Рис. 19 Изменение прогиба и температуры поковки при остывании

- 1 – минимальная температура поковки (в точке А);
- 2 – максимальная температура поковки (в точке В);
- 3 – перемещение u_z точки А.

Кинетика изменения прогиба продольной оси поковки определяется соотношением температур, распределенных вдоль длины, ширины и толщине поковки.

Структурные превращения в металле происходят в узком интервале температур и сопровождаются резким изменением объема. Поскольку причиной коробления поковки является неравномерное охлаждение и связанные с ним неравномерные

объемные температурные изменения, структурные превращения должны в какой-то степени отразиться на кинетике формоизменения при охлаждении поковки.

На рис. 20 показана типичная зависимость свободных объемных температурных изменений от температуры. Это – часть дилатограммы материала, соответствующая периоду охлаждения.

Расчет кинетики деформирования с учетом структурных превращений выполнен по той же схеме. До момента $\tau = 100$ с ни одна точка в объеме поковки не охлаждалась до точки M_H , и эта часть графика, изображающего кинетику прогиба точки торцевого сечения поковки (рис. 21), повторяет соответствующую кривую из рис. 19.

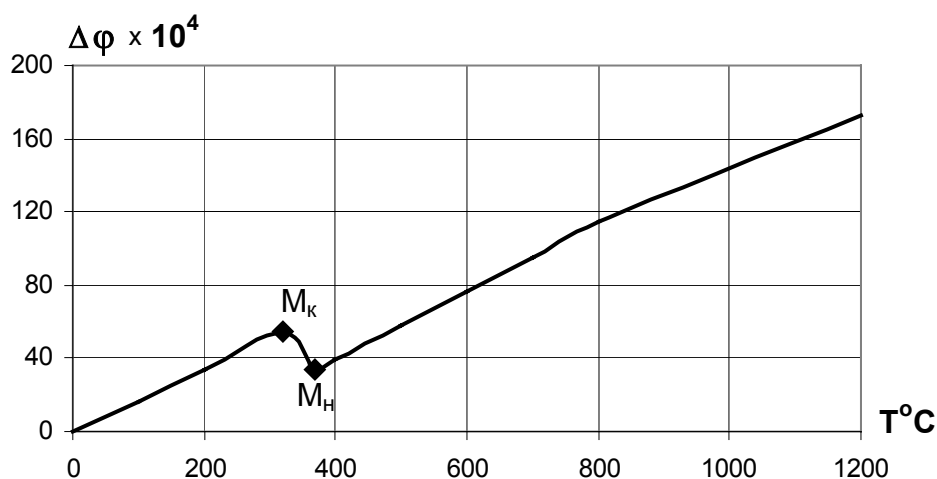


Рис. 20 Часть дилатограммы материала поковки (аустенитно-мартенситная сталь X16H5M4), соответствующая периоду охлаждения.

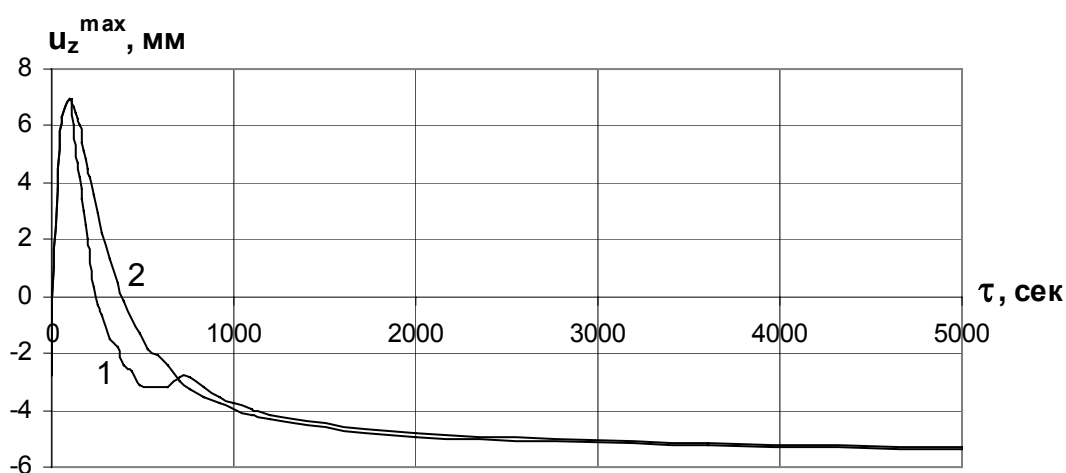


Рис. 21 Изменение во времени величины максимального прогиба u_z^{\max} пера лопатки:

- 1 - расчет с учетом структурных превращений;
- 2 - расчет без учета структурных превращений.

В рассматриваемом технологическом процессе начало мартенситного превращения совершенно случайно совпадает по времени с моментом максимального прогиба пера лопатки вверх ($u_z^{\max} = +6,92$ мм). Прогиб поковки вверх, вызван преиму-

ществительным охлаждением и, следовательно, уменьшением ширины (размера вдоль оси X) тонкой торцевой части пера лопатки. Одновременно происходило увеличение кривизны профиля и разворот сечения (закрутка пера лопатки). Структурные превращения, начавшиеся в раньше всех остывшей торцевой части поковки, резко меняют механизм формоизменения. Торцевая часть, продолжая остывать, с момента времени $\tau = 100$ с начинает уширяться, причем в очень значительной степени В остальной части поковки остывание вызывает деформации укорочения.

Помимо прогиба продольной оси поковки, структурные изменения в материале влияют на формоизменение в направлении оси X, вызывая изменение кривизны сечения лопатки и его разворот (закручивание).

Таким образом, учет структурных превращений, по данным приведенных исследований, практически не отразился на окончательных характеристиках формоизменения, что в основном связано с геометрией поковки лопатки.

Сравнение результатов моделирования процесса с экспериментальными данными.

Сравнение результатов моделирования технологического процесса изготовления поковки лопатки с натурными поковками проводилось по характеристикам геометрии их перовых частей. Следует отметить, что сравнение проводилось для условий изготовления первой пробной партии поковок при запуске технологического процесса в производство. Этим объясняются значительные отклонения геометрии полученных поковок лопаток от номинальных размеров.

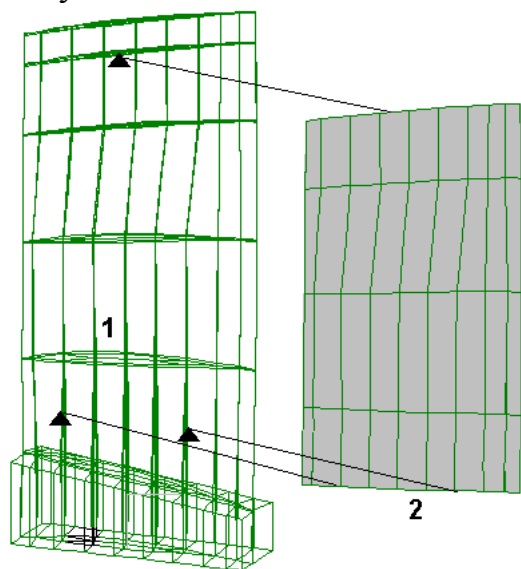


Рис. 22 Геометрические модели расчетной (1) и реальной (2) поковок.

Измерения координат реальной поковки проводились на координатно измерительной машине фирмы Zeiss. Фактически производились измерения геометрии контрольных поперечных сечений перовой части поковки. По измеренным координатам реальной поковки и сетки КЭ модели после полного остывания были построены две геометрические модели (рис.22).

Затем с использованием системы геометрического моделирования обе модели совмещали в трех точках на выпуклой поверхности перовой части. При помощи горизонтальных плоскостей с фиксированной координатой вдоль оси поковки обе модели рассекались и проводилось сравнение координат контуров сечений.

Результаты сравнения во-первых показали хорошее качественное совпадение распределений прогиба пера лопатки вдоль ее оси, высоты профиля в поперечных сечениях и угла закрутки пера вдоль оси. Максимальное отклонение толщины про-

филя пера в области максимального прогиба штампов составило 0,2-0,25 мм, в области входной и выходной кромок 0,1- 0,15 мм.

Сравнение величины прогиба вдоль оси и разворота поперечных сечений перовой части реальной и модельной поковок показали достаточно большие отклонения. После уточнения условий остывания поковок после калибровки и внесение необходимых изменений в граничных условия при моделировании были получены следующие результаты. Максимальное отклонение по прогибу поковок составило порядка 0,5-0,8 мм, по развороту поперечных сечений перовой части – 0,4-0,6 мм. Это связано в основном с достаточно грубой сеткой КЭ и неточностью задания граничных условий остывания поковки. В дальнейшем при стабилизации условий охлаждения поковок и более точной КЭ модели, точность моделирования этих параметров повысилась в 2-3 раза.

4. Разработка методики и алгоритмов проектирования переходов формообразования поковок для многопереходных процессов ГОШ.

В данном разделе проведен анализ последовательности необходимых этапов и процедур проектирования, применяемых при разработке технологических процессов горячей объемной штамповки, а также система показателей и параметров, позволяющих описывать эту последовательность с учетом альтернативных вариантов реализации технологии изготовления поковок.

Рассмотрим последовательность этапов проектирования технологического процесса ГОШ. Эта последовательность состоит из трех основных этапов:

1. проектирование геометрии поковки;
2. проектирование технологических операций процесса штамповки,
3. конструирование формообразующего инструмента.

Исходными данными для первого этапа проектирования является геометрическая модель детали и характеристики материала. На этом этапе реализуются следующие проектные процедуры:

- задание положения поковки в штампе,
- определение поверхности разъема штампов,
- назначение припусков и технологических напусков.

В результате проектирования получаем геометрическую модель поковки. Как правило, в современных трехмерных систем автоматизированного проектирования (3-D CAD- системы) перечисленные выше процедуры являются стандартными.

Наиболее важным этапом проектирования процессов, является второй- проектирование операций штамповки.

В качестве исходных данных для этого этапа проектирования используется геометрическая модель поковки в каком-либо стандартном формате, например STL.

Определение вида и последовательности переходов формообразования основывается на оценке показателей сложности, с точки зрения технологии штамповки, как поковки в целом, так и ее отдельных конструктивных элементов. Для проведения такого анализа необходимо создать геометрическую модель поковки с облоем и перемычками в отверстиях.

Далее на основе специальной системы анализа формы производится расчет эпюр площадей сечений поковки с облоем и ее характеристик, в частности коэффициента подкатки. На основании данного параметра определяется необходимость предварительного профилирования исходной заготовки перед штамповкой и производится выбор вида процесса профилирования (вальцовка заготовок, высадка, подкатка, формовка и т.д.), а также отделочных операций штамповки (обрезка облоя, пробивка перемычек, правка или калибровка поковок).

Для определения необходимых переходов штамповки применяется оценка показателей сложности отдельных конструктивных элементов поковки. Как правило, форму любой поковки можно представить в виде набора стандартных конструктивных элементов: «бобышек», «стержневых» элементов, ребер, вертикальных и горизонтальных выступов, кольцевых элементов, «вилок» и т.д. Положение этих элементов относительно оси или какой либо базы поковки, а также соотношения их габаритных и относительных размеров, определяет необходимый минимум операций и их вид, позволяющий с высокой надежностью изготовить данный элемент методами ГОШ. Для такого анализа используется оригинальная специализированная система, позволяющая получать наборы сечений отдельных элементов вдоль или поперек их локальной оси. Оценка значений показателей сложности каждого элемента производится по геометрии наиболее сложного контура из набора сечений. В зависимости от значений данного показателя и вида элемента, на основе данных, приведенных в справочной литературе по проектированию ГОШ, а также собственного опыта технолога, определяются необходимые переходы для формообразования этих элементов. Для этого удобнее всего воспользоваться преобразованием геометрии контуров сечений для каждого из необходимых операций. После этого, для создания геометрии соответствующего элемента на текущем переходе, на контура «натягивается» сетка, состоящая из граней многоугольной или треугольной формы. Элементы размещаются на своих позициях относительно оси или базы поковки, а затем, с использованием процедуры синтеза, создаются модели для каждого из переходов.

Этап конструирования формообразующего инструмента, включает следующие процедуры проектирования:

- проектирование геометрии ручьев штампов (гравюры для каждого из переходов) на основе геометрических моделей переходов штамповки, полученных на втором этапе,
- компоновка ручьев в штампе или во вставке,
- определение дополнительных элементов штамповых вставок (замков, выталкивателей и т.д.),
- компоновка вставок в штамповом блоке.

Необходимо иметь в виду, что приведенная выше методика позволяет получить во-первых, геометрию полости штампа для каждого из переходов и вариант геометрии исходной заготовки, во-вторых, только первое приближение варианта технологического процесса из множества возможных. Правильность выбора варианта технологии может быть проверена при помощи математического моделирования процесса течения металла при заполнении полости штампа на каждом их переходов

штамповки. Следует также отметить, что предлагаемая методика не позволяет полностью формализовать процесс проектирования и зависит от опыта технолога. Вместе с тем она позволяет всегда получить вариант технологического процесса, хотя возможно не наилучшего.

На рис. 23 и 24 представлены результаты проектирования варианта технологического процесса многопереходной штамповки поковки рычага передней подвески легкового автомобиля.

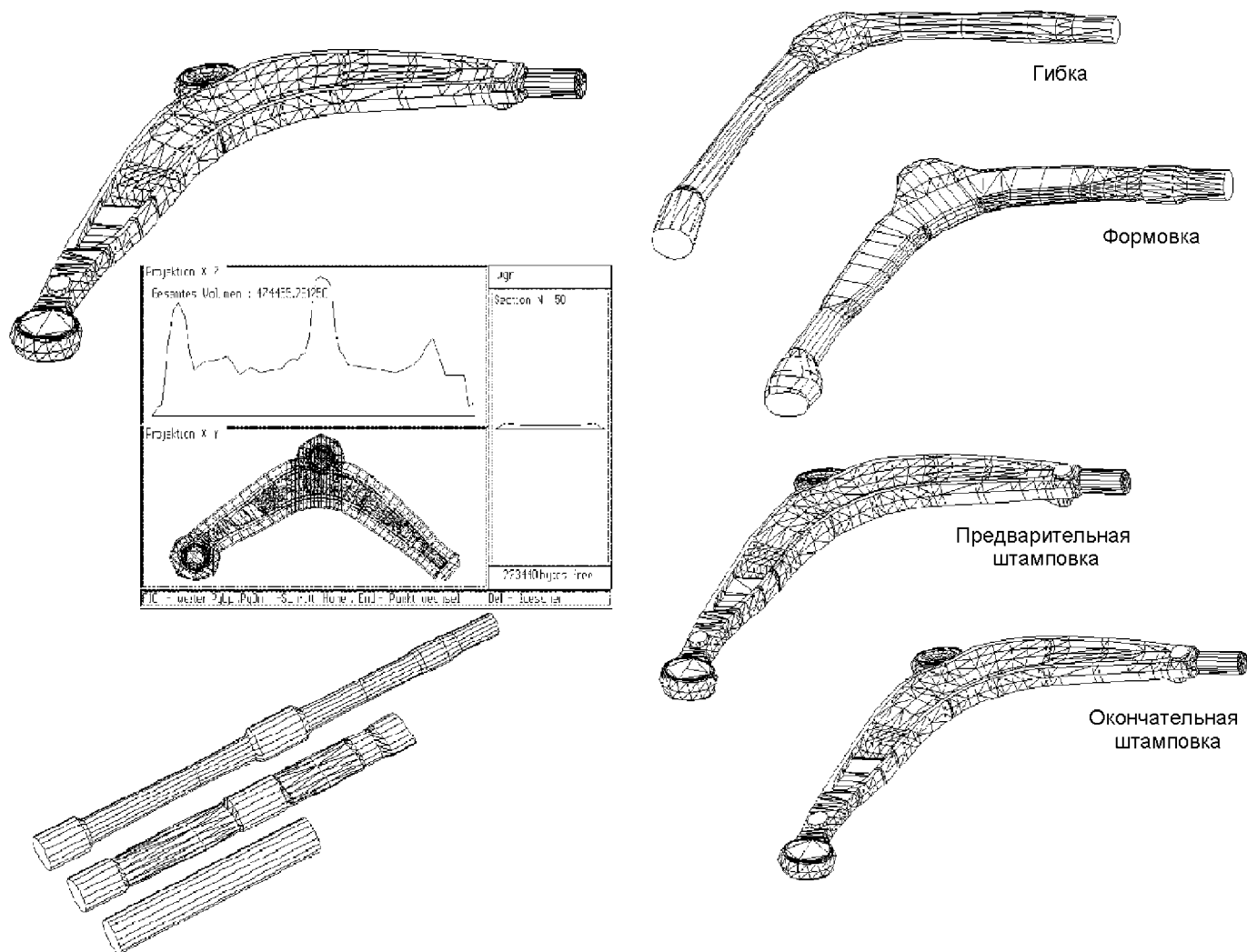


Рис. 23 Поковка рычага передней подвески, эпюра площадей сечений поковки с облоем и переходы профилирования заготовки на ковочных вальцах.

Рис. 24 Вариант переходов штамповки поковки рычага передней подвески автомобиля.

5. Проектирование технологических процессов многопереходной штамповки поволоков повышенной точности с использованием компьютерного моделирования.

На рис. 25 представлена блок-схема алгоритма проектирования процессов штамповки поволоков повышенной точности с использованием математического моделирования. Далее рассмотрим более подробно отдельные процедуры проектирования, указанные в алгоритме.

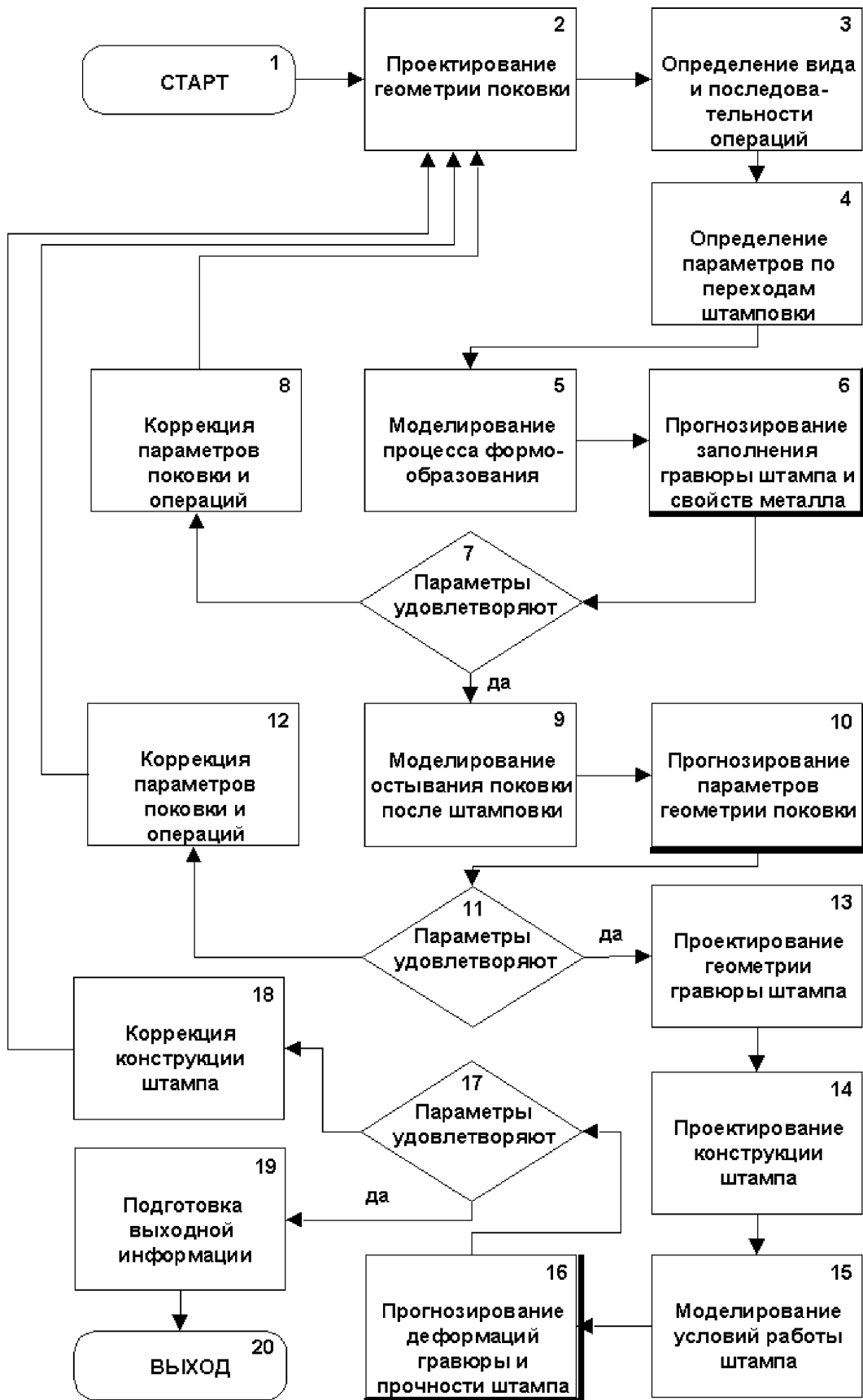


Рис.25 Блок-схема алгоритма проектирования процесса многопереходной штамповки использованием математического моделирования.

Методика проектирования переходов штамповки поковки повышенной точности.

В качестве исходных данных используется геометрическая модель поковки с назначенными припусками и технологическими напусками. Проектирование происходит в обратном порядке последовательности этапов технологического процесса.

1. Определение геометрии поковки после процесса калибровки (перед охлаждением на воздухе).

Производится расчет размеров и геометрии поковки после нагрева в печи (так называемые «горячие» размеры). Затем моделируем температурные поля и термические деформации в заготовке в соответствии с этапами, описанными в разделах 2 и 3, то есть перенос заготовки от печи к прессу, контакт заготовки со штампом и охлаждение на воздухе. Деформирование заготовки в калибровочном штампе не моделируется. В результате получаем первое приближение геометрии заготовки после калибровки (рис. 26)

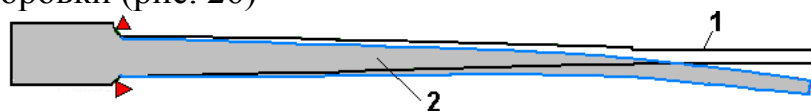


Рис. 26 Схема расчета первого приближения искомой геометрии заготовки. 1- исходная геометрия, 2- геометрия после моделирования.

Для получения второго приближения решаем обратную задачу. Для этого задаем распределение температур в исходной модели поковки, полученное в результате расчета при определении первого приближения, в обратном порядке по шагам времени, то есть от последнего к первому(аналог нагрева заготовки в условиях неравномерного температурного поля). Далее определяются термические деформации и новая геометрия поковки после нагрева в печи (рис.27).

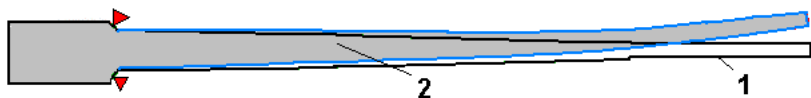


Рис. 27 Схема расчета второго приближения искомой геометрии заготовки. 1- исходная геометрия, 2- геометрия после моделирования.

На последующих итерациях с использованием какого-либо итерационного метода (например метода деления отрезка пополам) определяются новые приближения геометрии «горячей» поковки и производится моделирование задачи охлаждения до достижения необходимой точности.

2. Определение геометрии поковки перед калибровкой (после последнего перехода штамповки).

В качестве исходных данных используется геометрия поковки, полученная в момент окончания процесса калибровки. На этом шаге проектирования должен быть назначен припуск для калибровки. Предлагается, для уменьшения неравномерности распределения деформаций в поковке при калибровке, задавать припуск переменным по ширине профиля пера, величина которого должна зависеть от высоты профиля.

3. Определение геометрии заготовки на промежуточных переходах штамповки.

4. Определение геометрии исходной заготовки.

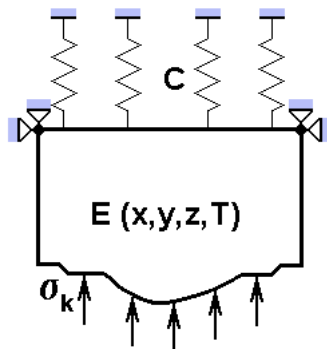
Процедуры проектирования для 3 и 4 шага были описаны выше.

Проектирование геометрии штамповых вставок с учетом их деформаций при калибровке.

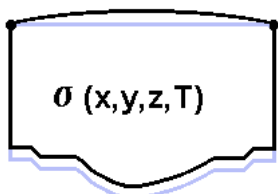
Для определения искомой геометрии штамповых вставок предлагается следующий трехшаговый алгоритм проектирования.

При расчетах принимается допущение, что штамповая вставка при нагружении деформируется только упруго. То есть решается задача термоупругости.

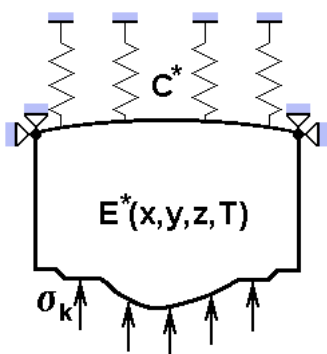
В качестве исходных данных задается модель штамповой вставки, геометрия гравюры которой определяется по размерам поковки после окончания процесса калибровки. Расчет температурного поля во вставке производится в соответствии с описанием в разделе 2. Далее производится моделирование напряженно-деформированного состояния в поковке при калибровке, в соответствии с описанной ранее методикой в условиях деформирования заготовки в жестких штампах. Полученное распределение контактных напряжений σ_k на последнем шаге процесса используется в дальнейшем в качестве граничных условий.



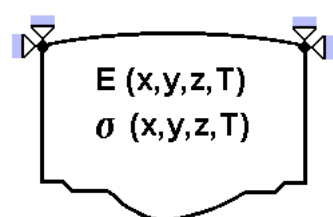
На первом шаге проектирования производится моделирование напряженно-деформированного состояния в штамповой вставке при калибровке. Схема задания граничных условий представлена слева на рисунке и соответствует условиям при решении задачи контактного взаимодействия заготовки и штампового инструмента.



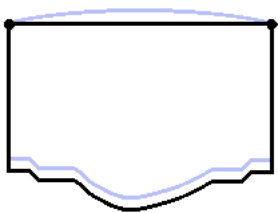
В результате моделирования получаем геометрию штамповой вставки под нагрузкой. На основании полученной новой геометрии опорной поверхности штамповой вставки производится коррекция исходной модели (сетки КЭ) штамповой вставки.



На втором этапе расчета для новой сетки конечных элементов производится новый расчет напряженно-деформированного состояния в штамповой вставке при калибровке. При этом величина жесткости на опорной поверхности и модуль упругости задаются на несколько порядков больше $E^* = E \cdot 10^5$ и $c^* = c \cdot 10^5$. При заданных значениях жесткости и модуля упругости значения деформаций в штампе практически равны 0.



На третьем этапе производится моделирование разгрузки штамповой вставки, после снятия контактной нагрузки. Полученное на втором этапе распределение напряжений во вставке являются начальными условиями. Модуль упругости задается для материала вставки как и на первом этапе.



Полученная в результате моделирования разгрузки новая геометрия штамповой вставки является искомой геометрией, которая обеспечивает требуемую геометрию и точность поковки при калибровке.

Аналогично производится проектирование геометрии штамповых вставок для окончательной штамповки.

Описанная выше методика реализована и прошла опробование.

Предлагаемые методики и алгоритмы проектирования технологических процессов не позволяют получить полностью готовое решение. Однако при их использовании, как показала практика за рубежом, можно в 2-3 раза сократить количество итераций при запуске технологии в производство.

Общие выводы по работе.

1. Разработана методика конструкторско-технологического проектирования многопереходных технологических процессов горячей объемной штамповки на базе трехмерного геометрического моделирования.
2. Формализован процесс проектирования технологических переходов ГОШ, разработаны и реализованы методики определения видов, последовательности и геометрии переходов штамповки для поковок пространственной формы, основанные на определении частных критериев сложности отдельных элементов поковок и генерировании геометрии элементов по переходам деформирования.
3. Разработана и реализована методика расчета (прогнозирования) конечной геометрии поковок, с учетом термического режима работы и упругопластических деформаций штампового инструмента, термомеханического режима остывания поковки после деформирования, фазовых и структурных превращений в металле поковки.
4. Решена задача контактного упругопластического взаимодействия поковки со штамповым инструментом при операции штамповки и калибровки, позволяющая определить влияние жесткостных, термических и др. параметров на геометрию поковок.
5. На основе математического моделирования термомеханических процессов, происходящих на всех стадиях технологического процесса формообразования, показана возможность прогнозирования точности получаемых изделий (поковок) и оценки значимости технологических параметров на показатели качества изделия.
6. Разработанные методики компьютерного моделирования, включающие геометрическое и математическое моделирование процессов ГПО, позволяют формализовать этапы конструкторско-технологического проектирования, произвести первичную оценку результатов разработки, повысить качество и сократить сроки подготовки и реализации процессов.
7. Разработанная методика математического моделирования позволяет определить напряженно-деформированное состояние системы заготовка - штамповый инструмент с учетом теплообмена и жесткостных характеристик оборудования, а

также термические деформации в заготовке при остывании. Полученные результаты позволяют прогнозировать геометрию получаемых поковок, определить значимость отдельных технологических параметров.

8. Создана база компьютерного конструкторско-технологического проектирования, включающая методику определения последовательности операций штамповки и геометрии штамповых переходов для пространственных поковок сложной формы на основе методов пространственного геометрического моделирования и определения частных критериев сложности конструктивных элементов поковок.

9. Разработаны и реализованы алгоритмы комплексного проектирования многопереходных процессов горячего пластического деформирования заготовок и изделий повышенной точности.

10. На базе разработанных методик геометрического моделирования создан ряд программных комплексов, используемых в системах поиска аналогов технологических процессов в базах данных, автоматизации систем управления качеством, визуализации систем измерений геометрии пространственных деталей и др.

Публикации.

1. Богоявленский К.Н., Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Разработка условий получения точных поковок сложной конфигурации на кривошипных горячештамповочных прессах. Сборник трудов конференции "Повышение эффективности кузнечно-штамповочного производства". Кишинев, 1977г.

2. Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Автоматизированная система оптимального выбора оборудования для штамповки точных поковок сложной конфигурации. Сборник трудов конференции "Повышение эффективности кузнечно-штамповочного производства". Кишинев, 1977г.

3. Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Исследование возможности автоматизации участка штамповки заготовок турбинных лопаток. Сборник трудов конференции "Совершенствование кузнечно-штамповочного оборудования ударного действия", Москва 1978г

4. Богоявленский К.Н., Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Автоматизированная система подготовки и управления качеством процессов штамповки заготовок турбинных лопаток. Сборник трудов конференции "Научные основы автоматизации производственных процессов и управления качеством в машиностроении и приборостроении", Москва 1979г.

5. Völkner W., Aksenov L. Zolotov A. Ermittlung der Kontaktspannungen bei komplizierten Werkzeugen. Neue Hütte №6 1979

Богоявленский К.Н., Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Исследование деформаций при штамповке высоколегированных сталей и сплавов. Известия ВУЗов "Черная металлургия" № 7, 1981г.

6. Богоявленский К.Н., Аксенов Л.Б., Золотов А.М., Мальчиков В.С. Повышение стойкости штампов для поковок энергетического машиностроения на основе прогнозирования характера их износа. «Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением». Сборник трудов ЛДНТП 1982г.

7. Богоявленский К.Н., Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Деформирование жаропрочных сплавов. Машиноведение N1 1982г.
8. Богоявленский К.Н., Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Проектирование штампов для горячего деформирования металла с учетом формы их износа. Сборник трудов конференции “Расчет и конструирование машин и механизмов” Алма-Ата 1982г.
9. Богоявленский К.Н., Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Штамповка жаропрочных сплавов. НИИмаш, Москва 1983г.
10. Богоявленский К.Н., Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Расчет деформационных полей с использованием координатных функций. Известия Вузов “Черная металлургия” N 5, 1984г.
11. Богоявленский К.Н., Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Имитационное моделирование при проектировании процессов штамповки жаропрочных сплавов в энергомашиностроении. Энергомашиностроение N 7, 1984 г.
12. Золотов А.М. Масленников Б.А. Применение сплайн-функций при исследовании неоднородных полей деформаций. Сборник трудов конференции. “Роль инженерной графики машинного проектирования в подготовке специалистов для народного хозяйства”, Л. ЛПИ 1984г.
13. Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Повышение качества поковок на основе диалога с ЭВМ при проектировании технологических процессов штамповки. Автомобильное производство N 11, 1984г.
14. Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Прогнозирование качества металла поковок в процессах объемной штамповки. “Ресурсосберегающая технология машиностроительного производства” Сборник трудов Л. ЛДНТП 1985г.
15. Волошинов Д.В. Золотов А.М. О пространственной композиции геометрических объектов при автоматизированном проектировании поверхностей деталей машин. “Автоматизация проектирования в машиностроении” Труды ЛПИ, Л., ЛПИ 1987г.
16. Аксенов Л.Б., Золотов А.М., Пегов А.Ю. Автоматизированное проектирование технологических процессов штамповки круглых в плане поковок. Уч. пособие Л. ЛПИ 1989г.
17. Золотов А.М., Шарапов Ю.М. Автоматизированное проектирование многопереходных процессов штамповки поковок типа тел вращения. Сборник трудов конференции “Автоматизированное проектирование прогрессивных процессовковки и горячей штамповки” Л. ЛДНТП 1989г.
18. Золотов А.М., Зуйков И.Л. Проектирование процессов горячей штамповки поковок повышенной точности. Сборник трудов конференции “Автоматизированное проектирование прогрессивных процессовковки и горячей штамповки” Л. ЛДНТП, 1989г.
19. Гецов Л.Б., Голубов К.Б., Золотов А.М., Совершенствование технологии штамповки лопаток из жаропрочных сплавов. Судостроительная промышленность вып.17 1989г.

20. Золотов А.М., Зуйков И.Л. Прогнозирование точности поковок с уменьшенными припусками при горячей штамповке. Сборник трудов конференции “Повышение качества изготовления изделий в машиностроении” Л., Политехник 1990г.
21. Аксенов Л.Б., Золотов А.М., Мальчиков В.С. Точная штамповка поковок энергетического машиностроения. Изготовление заготовок и деталей пластическим деформированием, Л., Политехника 1991г.
22. Аксенов Л.Б., Золотов А.М., Мальчиков В.С. Проектирование процессов горячей штамповки с использованием математического моделирования. Изготовление заготовок и деталей пластическим деформированием, Л., Политехника 1991г.
23. Аксенов Л.Б., Золотов А.М. Штамповка поковок с повышенными механическими свойствами. Изготовление заготовок и деталей пластическим деформированием, Л., Политехника 1991г.
24. Аксенов Л.Б., Вагин В.А., Золотов А.М., Мамутов В.С. Проектирование процессов и машин обработки давлением с использованием ЭВМ. Учебное пособие. С.П. ЛГТУ 1992г.
25. Золотов А.М., Рыбин Ю.И. Комплексная САПР многопереходных процессов горячей объемной штамповки. Сборник материалов конференции СПбГТУ, “Иновационные технологии” 1995 г.
26. Золотов А.М., Рыбин Ю.И. Комплексная система автоматизированного проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки. Сборник трудов Международной научно-технической российско-германской конференции “Пластическая и термическая обработка современных металлических материалов” 1995 г. С.-Петербург.
27. Золотов А.М., Рыбин Ю.И. Комплексная система технологического проектирования процессов горячей объемной штамповки. Современные материалы: технологии и исследования. Труды СПбГТУ N463, 1996
28. Золотов А.М., Рыбин Ю.И. Напряженно-деформированное состояние прессового штампа при циклических нагружениях. Современные материалы: технологии и исследования. Труды СПбГТУ №463, 1996
29. Золотов А.М., Рыбин Ю.И., Лоскутов В.Н. Моделирование методом конечных элементов неустановившегося процесса прокатки толстого листа. Современные материалы: технологии и исследования. Труды СПбГТУ №463, 1996
30. Золотов А.М., Рыбин Ю.И., Кархин В.А. Моделирование работы сварной конструкции с учетом остаточных напряжений. В сб. Международной научно-технической конференции "Высокие технологии в современном материаловедении" С.-Петербург 1997
31. Золотов А.М., Рыбин Ю.И. Моделирование пластического течения уплотняемых материалов. В сб. Международной научно-технической конференции "Высокие технологии в современном материаловедении" С.-Петербург 1997
32. Золотов А.М., Рыбин Ю.И., Павлов Н.Н. Прогнозирование эксплуатационных характеристик изделий, изготавливаемых методами обработки давлением. Материалы научно-технической конференции 16-17 июня 1997 г. «Фундаментальные исследования в технических университетах» С.-Пб. СПбГТУ.

33. Золотов А.М., Рыбин Ю.И. Кинетика формоизменения поковки турбинной лопатки при остывании после калибровки. Современные материалы: технологии и исследования. Труды СПбГТУ №473, 1998
34. Золотов А.М., Рыбин Ю.И. Лю Мин Анализ напряженно-деформированного состояния поковки турбинной лопатки при горячей калибровке. Современные материалы: технологии и исследования. Труды СПбГТУ №473, 1998
35. Золотов А.М., Рыбин Ю.И. Комплексная система проектирования многопереходных процессов пластического деформирования. В сб. Международная научно-техническая конференция «Высокие технологии в современном материаловедении». С.-Петербург 1999
36. Золотов А.М., Рыбин Ю.И., Елкин Н.М. Математическое моделирование как средство конструкторско-технологического проектирования В сб. Международная научно-техническая конференция «Высокие технологии в современном материаловедении». С.-Петербург 2001
37. Золотов А.М., Рыбин Ю.И. Кинетика формоизменения поковки после горячей калибровки. В сб. Международная научно-техническая конференция «Высокие технологии в современном материаловедении». С.-Петербург 2001
38. G. Hartke, A. Zolotov, P. Wolter Kommunikation im Qualitätsmanagement. Fachzeitschrift „QZ Qualität und Zuverlässigkeit“ 3/2001 Германия
39. Золотов А.М., Рудской А.И. Проектирование и прогнозирование качества процессов объемной штамповки на основе математического моделирования. В сб. трудов Юбилейной научно-технической конференции Академии инженерных наук РФ Северо-западное отделение. С.-П. СПбГТУ 2001
40. Золотов А.М. Основы проектирования технологии прецизионной многопереходной горячей пластической обработки с использованием компьютерного проектирования. Спб.: Изд-во СПбГПУ, 2002 ISBN 5-7422-0264-4
41. Агасьянц Г.А., Рыбин Ю.И. Золотов А.М. Математическое моделирование методом конечных элементов процессов продольной прокатки в неприводных валках. Металлообработка №3 (15)/2003г.

Лицензия ЛР №020593 от 07.08.97

Подписано в печать 31.10 2003

Объем в п.л. 2,25

Тираж 100

Заказ №

Отпечатано с готового оригинала-макета,
предоставленного автором,
в типографии издательства СПбГПУ
195220, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29