

Моделирование технологических процессов свободной ковки крупных слитков с помощью QForm3D

Мордвинцев П.С., 6 курс

Московский Государственный Университет им. Н.Э. Баумана
Кафедра «Машины и технология обработки материалов давлением»
Научный руководитель: к.т.н. Колосков М.М.

Получение высококачественных поковок свободной ковки зависит от правильного проектирования и выполнения технологического процесса, а также от организации работы технологического контроля. Предложенные примеры компьютерного моделирования показывают возможности QForm3D при проектировании нагрева слитка и свободнойковки с определением величин подач, обжимов, кантовок поковки, периодичности ее подогрева на этапе разработки технологии.

Введение

Известно из литературы [1], что качество поковок определяет точность их геометрических форм и размеров, механические свойства, структуру и отсутствие поверхностных и внутренних дефектов. Получение высококачественных поковок зависит от правильного проектирования и выполнения технологического процессаковки, а также от организации работы технологического контроля, в задачу которого входит не только выявление, но и предупреждение брака. Наряду с производственными операциями в технологические карты вносят операции контроля, которые разрабатывают технологи, проектирующие технологический процесс. Правильная разработка технологического процесса обеспечивает наилучшие режимы обработки с учётом свойств деформируемых материалов, что исключает нарушение их сплошности или получение неоднородной структуры, ухудшающие механические свойства поковок. В производственных условиях причинами брака могут быть дефекты исходного материала и отклонения от установочного технологического процесса.

Приёмка поковок послековки перед термообработкой производится по наружному осмотру и размерам отделом технического контроля завода-изготовителя. По требованию потребителя или в заказе на поковки могут быть назначены дополнительные испытания при сдаче поковок (проверка на флокены, ультразвуковой и перископический контроль, величина остаточных напряжений, предел текучести при рабочих температурах, макро- и микроанализ структуры и др.). Бывает, что на этапе приёма выявляются скрытые внутренние дефекты поковки. Они не удовлетворяют потребностям заказчика, и поковка, на которую затрачены значительное время и средства и которая может весить десятки тонн, идет в брак.

С появлением систем численного моделирования стало возможным заранее предсказать поведение металла по всему объёму как во время выполнения кузнечных операций, так и во время нагрева слитка и его подогревов в ходековки. При этом возможно детальное проектирование технологического процесса с точным описанием величин подач, обжима, кантовок поковки, периодичности ее подогрева. Всё это успешно реализуется благодаря компьютерному моделированию с помощью QForm3D при проектировании технологии свободнойковки.

1. Моделирование операции нагрева слитка

Целью моделирования является температурный контроль процесса нагрева перед началом деформирования, контроль величины возникающих напряжений при нагреве, расчёт поля температур в слитке перед моделированием кузнечных операций.

Для наглядного представления распределения характерных полей внутри слитка при его нагреве по соответствующему реальному режиму предприятия «БумМаш» (Рис. 1) целесообразно задать несколько характерных точек (трассируемые точки, Рис. 2) на поверхности, в центре слитка и построить графики изменения температуры в этих точках, а также проследить изменение напряжений и перемещений по времени.

Исходные данные:

Вес биллетированного слитка (биллета): 17000 кг

Диаметр биллета 1060 мм

Длина биллета 2500 мм

Материал 40ХМ

Для получения температурного распределения по сечению и последующего моделирования протяжки проведён расчёт нагрева биллетированного слитка (Рис. 3) по заданному режиму.

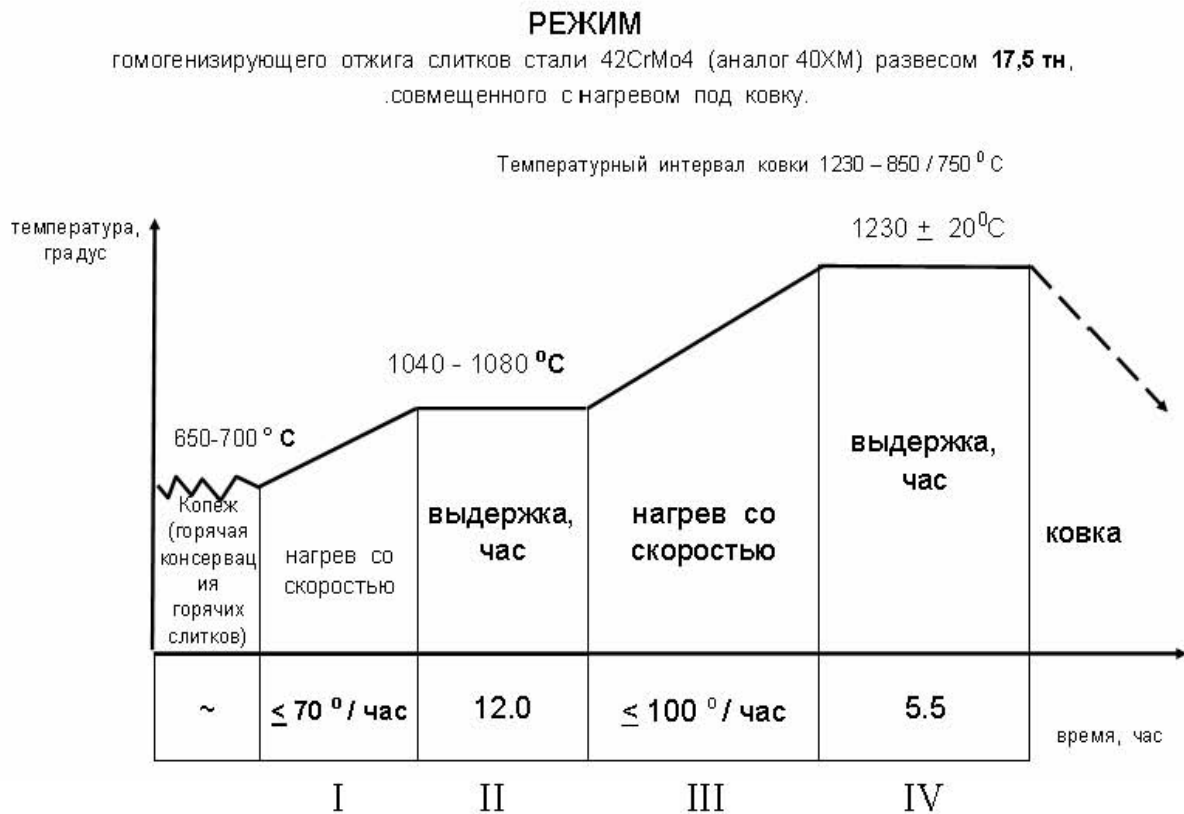


Рис. 1. Схема режима нагрева биллета

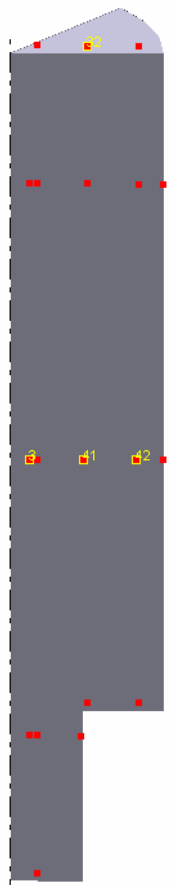


Рис. 2. Трассируемые точки:
3 – сердцевина биллета; 32 –
торец биллета; 41 – средняя
часть биллета; 42 – вблизи
поверхности биллета;

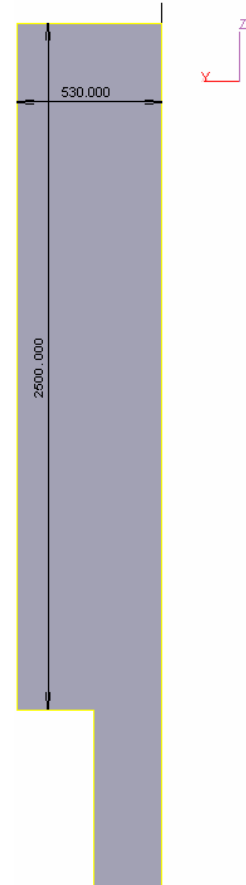


Рис. 3. Сечение нагреваемого
биллетированного слитка
(биллета). Размеры нанесены
автоматически

На рис. 4 показаны результаты моделирования I и III периодов нагрева в виде заливки и изолиний. Для II и IV периодов нагрева на рис. 5 показаны графики изменения температуры в трассируемых точках.

График на рис. 5 а показывает, что для гомогенизации процесс нагрева может быть закончен при достижении 27000 сек., т.е. при достижении температуры 1040 градусов.

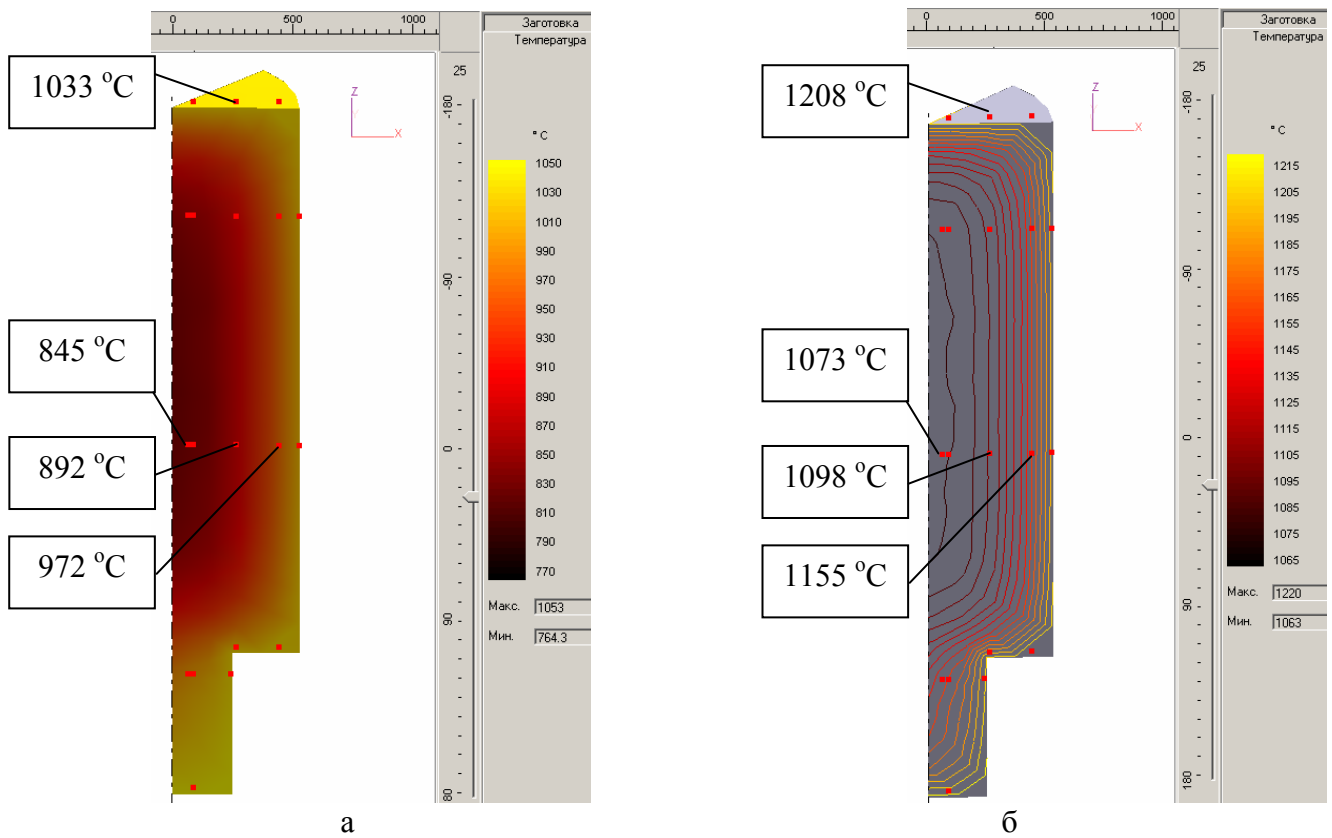
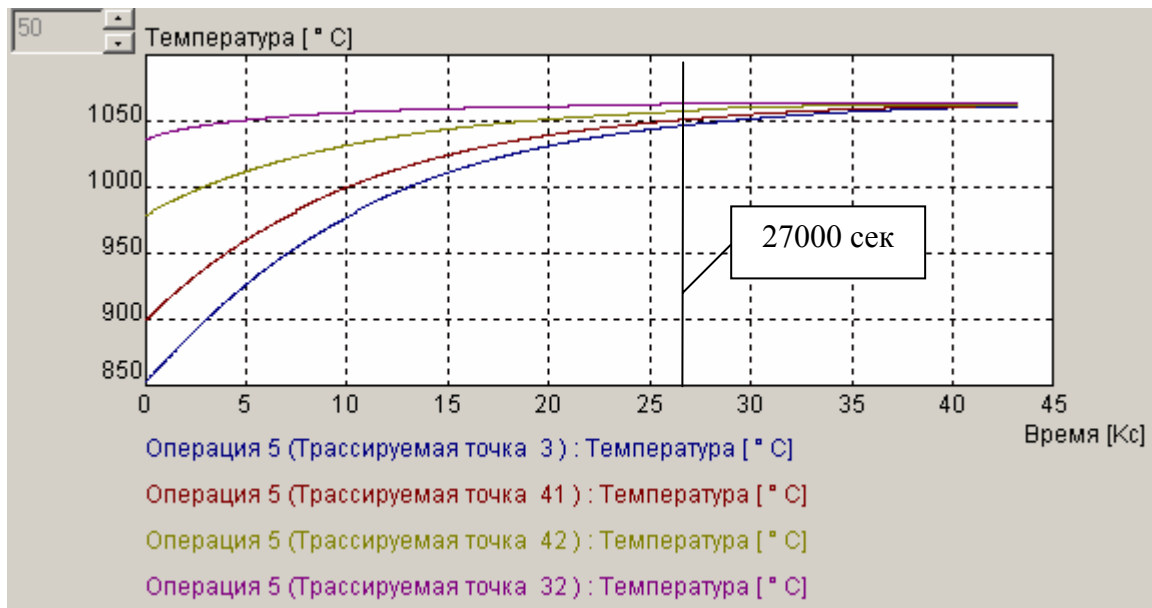
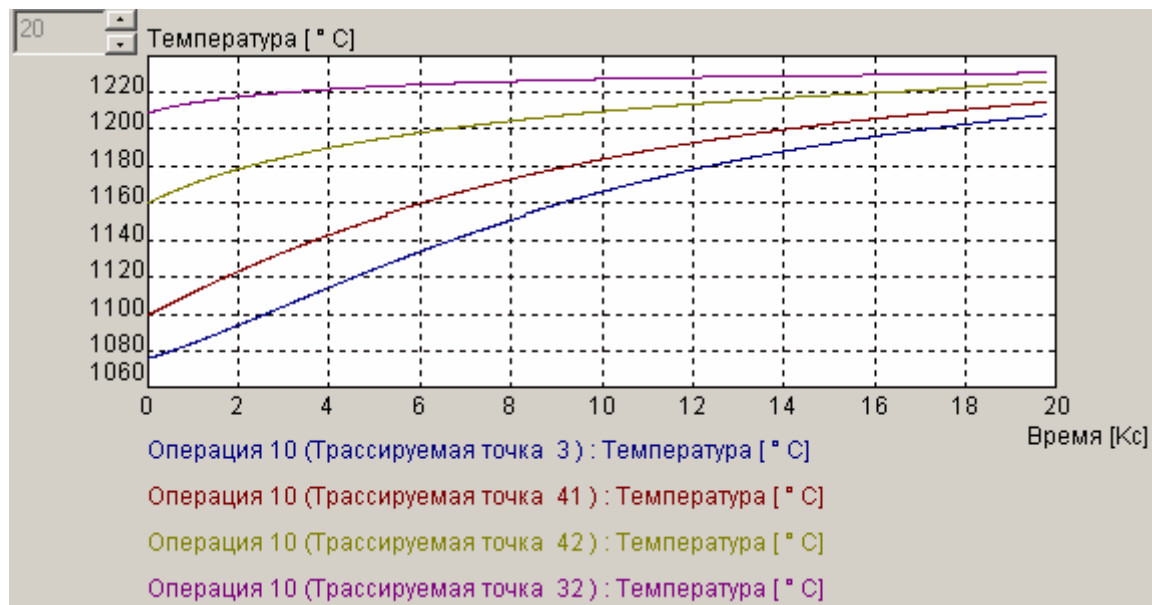


Рис. 4. Сечение билета в конце периодов нагрева с заданной интенсивностью изменения температуры, показана температура в трассируемых точках: а – I период нагрева, б – III период нагрева



а



б

Рис. 5. Графики изменения температуры периодов выдержки: а – II период, б – IV период. Номера трассируемых точек показаны на рис. 2

Программа позволяет определять распределение напряжений, возникающих в процессе нагрева билета (Рис. 6, 7, 8).

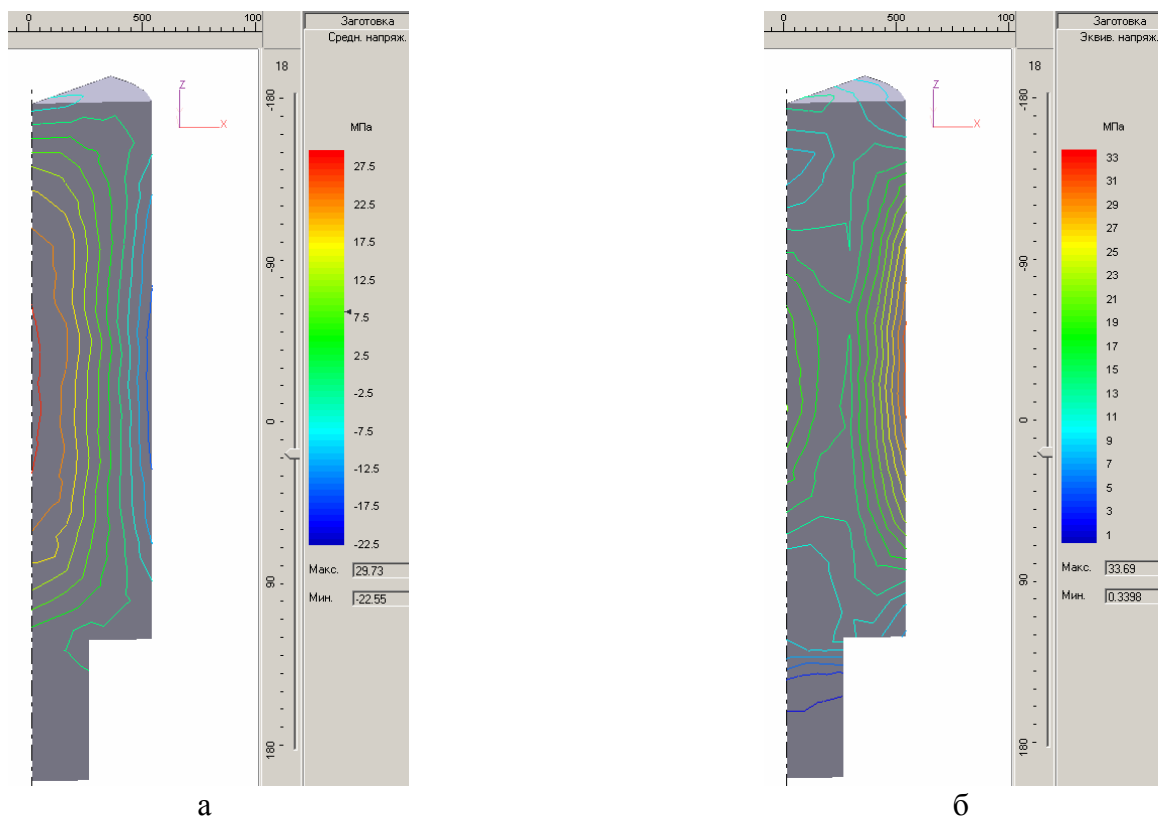


Рис. 6. Распределение напряжений и смещений по сечению в конце операции выдержки с постоянной температурой, период IV: а – среднее напряжение; б – эквивалентное напряжение

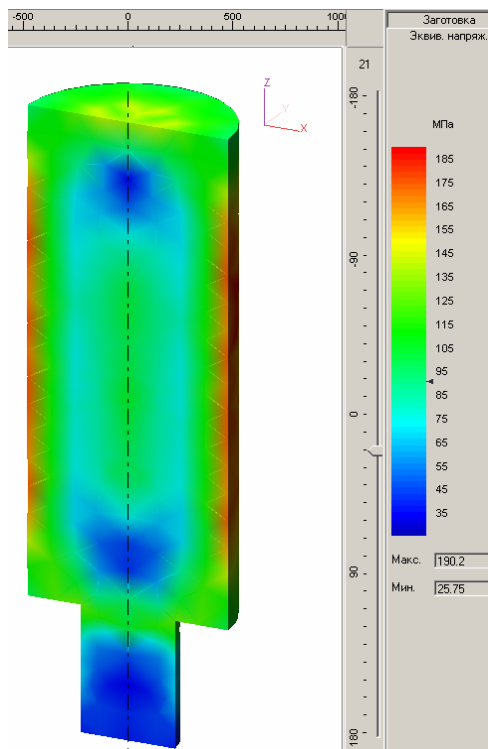


Рис. 7. Поле эквивалентных напряжений в конце операции нагрева с заданной интенсивностью изменения температуры. Период нагрева III

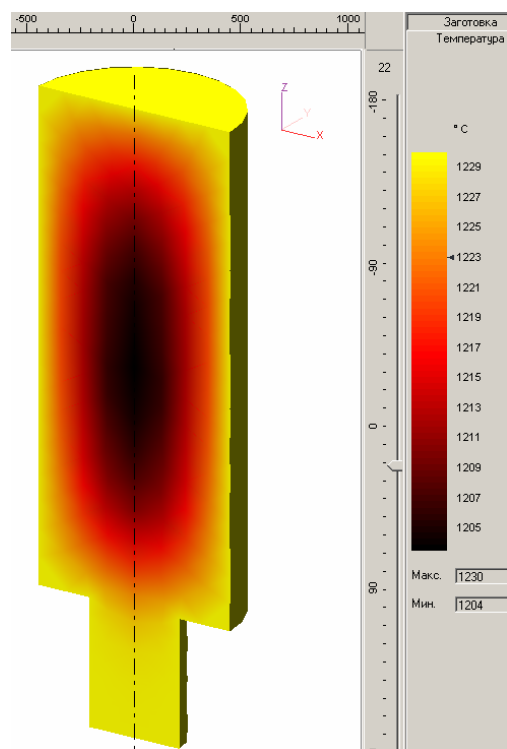


Рис. 8. Распределение температурного поля по сечению в конце операции выдержки. Период нагрева IV

2. Операция осадки

Моделирование операции осадки проводилось с использованием гидравлического пресса ПА-1345 (номинальная скорость – 150 мм/сек, максимальная сила – 500 МН) и нагретого биллетированного слитка (Рис. 8). Максимальное отношение диаметра осаживаемой заготовки к высоте составляет величину 2.3 (Рис. 2), что является максимально допустимым значением, при котором поковка не теряет устойчивости в процессе деформирования. Т.к. геометрия инструментов и заготовки является симметричной, то для моделирования процесса в программе QForm использовался только сектор в целях ускорения времени компьютерного расчёта.

Распределение температурного поля рассчитано для начала моделирования операции осадки. Учитывается охлаждение на воздухе при транспортировке и от контакта с инструментом (Рис. 9). Конечная форма изображена на рис. 10.

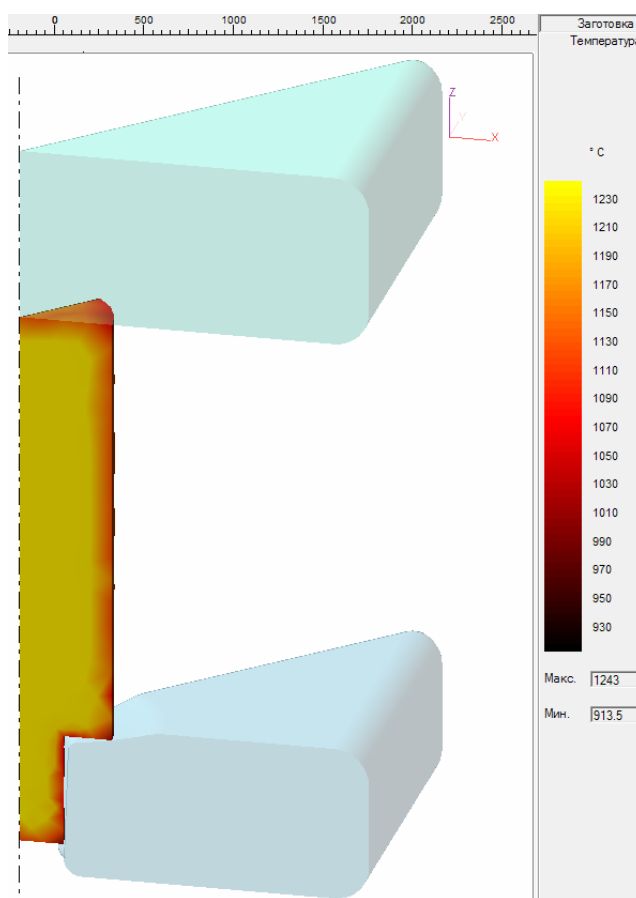


Рис. 9. Начало моделирования операции осадки, использование в расчёте только геометрического сектора для экономии времени моделирования. Показано распределение температуры по сечению в начале деформирования после охлаждения на воздухе и в инструменте

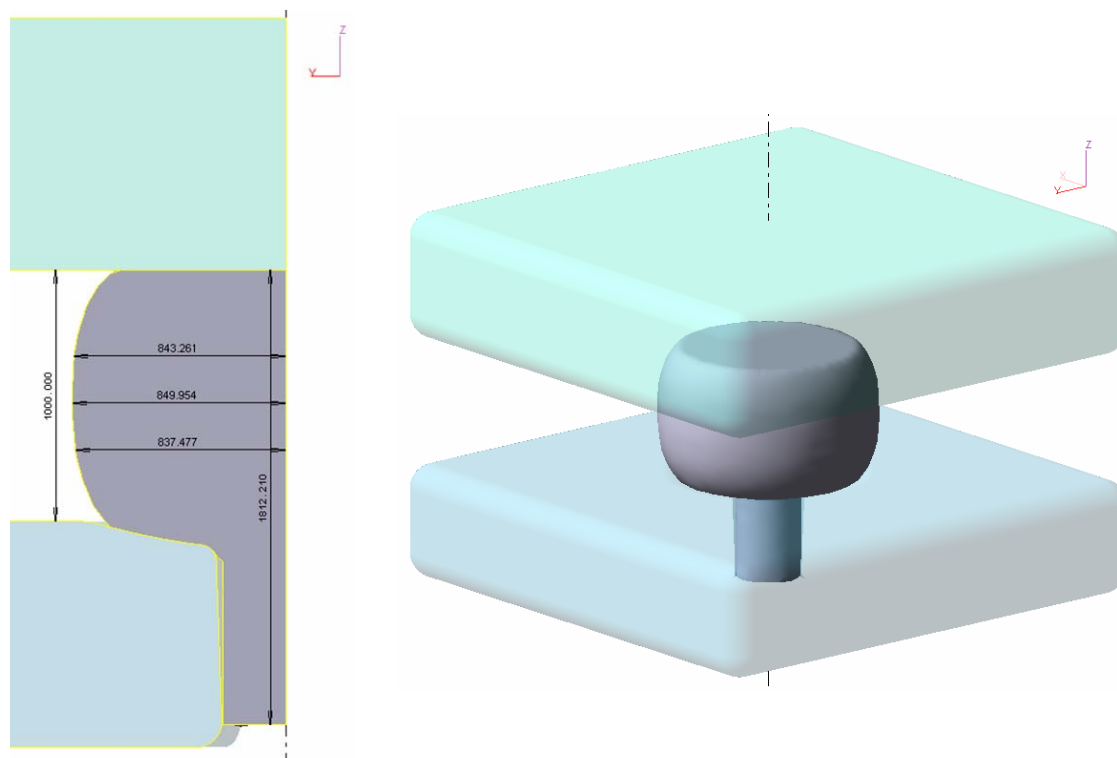


Рис. 10. Форма осаженной поковки, размеры нанесены автоматически с помощью инструмента «Визир»

3. Протяжка в фасонных бойках

Назначением протяжки является удлинение заготовки за счёт уменьшения площади поперечного сечения. Протяжка способствует устранению внутренних дефектов (пустот) и улучшает механические свойства металла. Для обеспечения при протяжке равномерной деформации по сечению и длине, а также для более полного устранения дефектов необходимо соблюдать технологические условия относительной подачи заготовки, обжима, кантовки и т.д. В прошлом эти параметры рассчитывались, исходя из соответствующих рекомендаций и опыта технолога. Программный комплекс QForm3D моделирует необходимые режимы свободнойковки.

Цель моделирования – определение рациональных обжатий, углов кантовки и подачи слитка при протяжке в фасонных бойках; определение температуры окончания выноса и необходимости подогрева. Чем меньше число переходов, тем интенсивнее процесс протяжки и тем выше технико-экономические показатели работы оборудования, основанные на оптимальных энергосиловых параметрах.

Так как операции биллетировки, закатки цапфы, отрубки поддона являются подготовительными и дают сравнительно небольшую степень деформации основной массы, в проведённом расчёте ими решено пренебречь.

Исходные данные:

Материал заготовки – 40ХМ

Охлаждение на воздухе – 120 сек

Температура инструментов – 300°С

Гидравлический пресс ПА-1345:

- Номинальная скорость – 150 мм/сек
- Максимальная сила – 500 МН

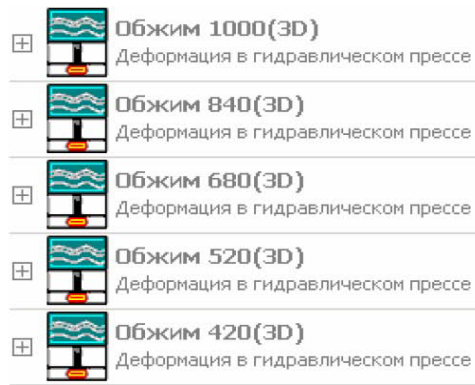


Рис. 11. Отображение назначенной цепочки операций протяжки в программе QForm

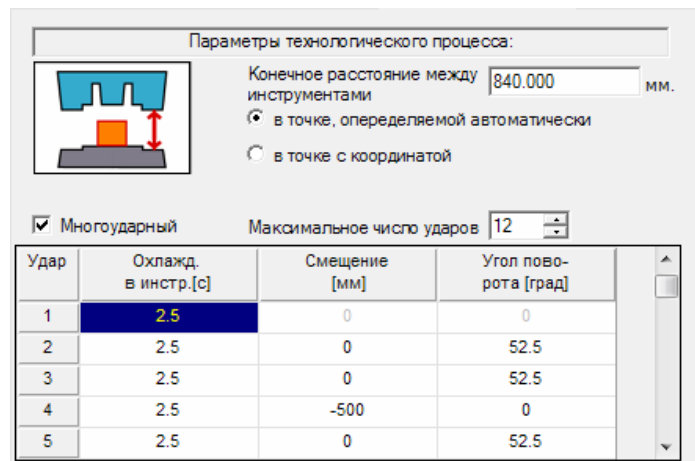


Рис. 12. Изображение окна ввода исходных данных. Количество обжимов (ударов), подача (смещение), время охлаждения и поворот заготовки между ударами задаются в виде таблицы на этапе ввода исходных данных. Показано на примере операции «Обжим 840»

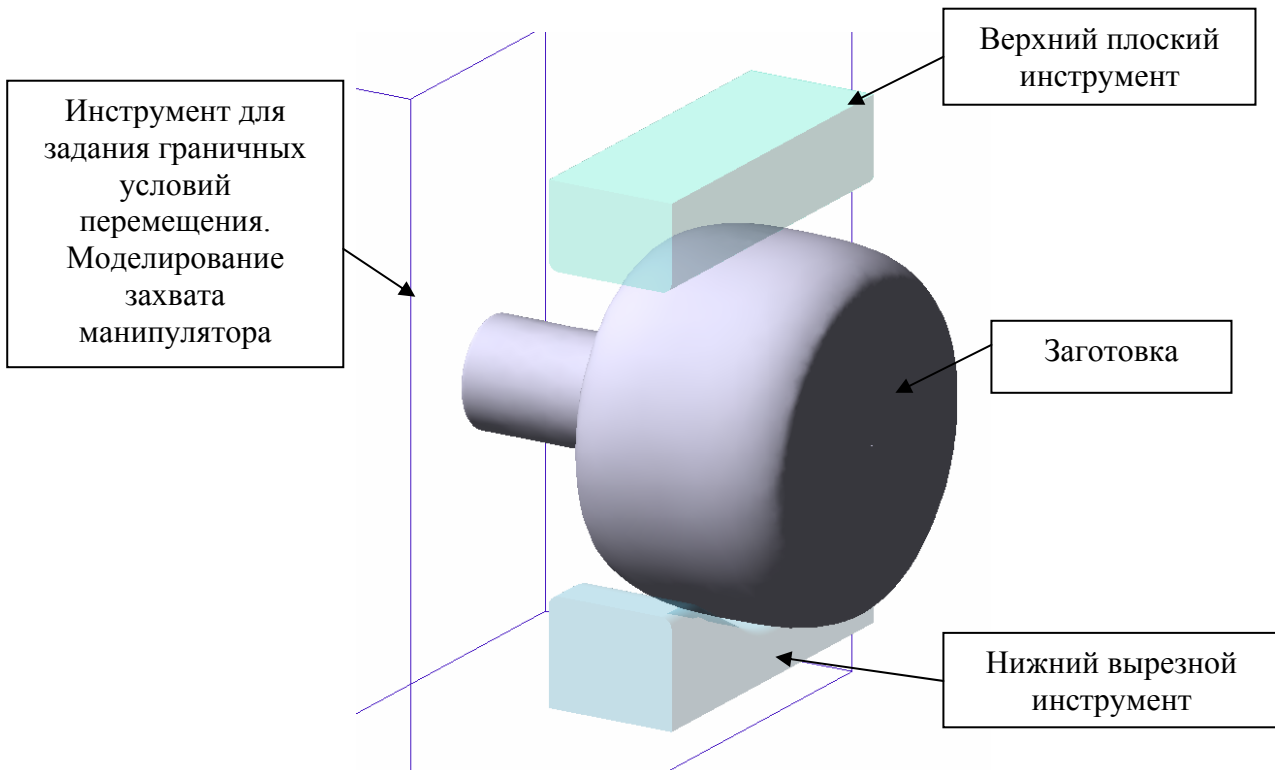


Рис. 13. Графическое окно в начале моделирования первого обжатия протяжки

Проведено два варианта моделирования процесса протяжки крупных слитков с принципиально различной технологической схемой (последовательностью обжатий, подачи и кантовок). При моделировании вариантов использовалась геометрия инструментов, показанная на рис. 14.

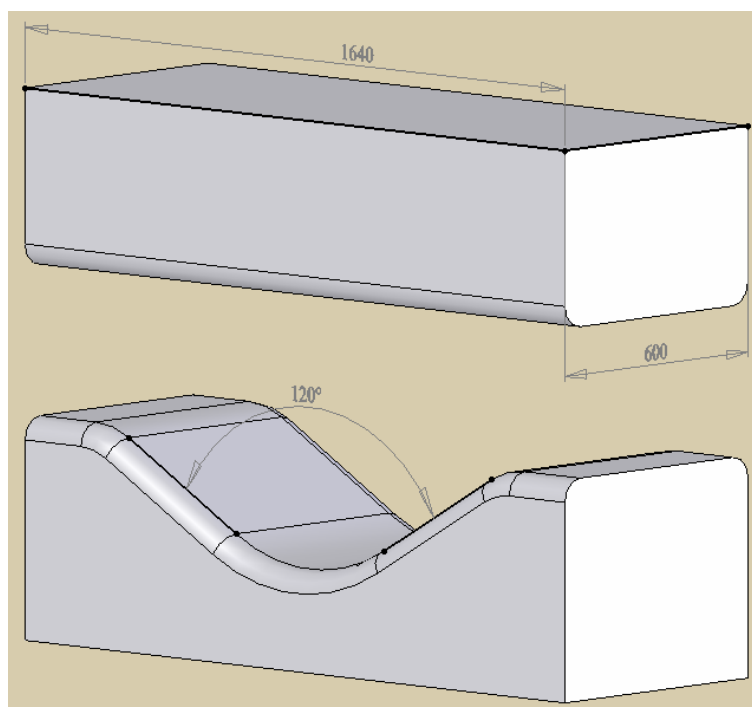


Рис. 14. Геометрия комбинированных бойков, угол выреза нижнего инструмента составляет 120 градусов

Вариант 1: Моделирование технологической операции свободнойковки полными проходами по все длине поковки при обжатии на определённую величину с постоянной подачей $L_0 = 500$ мм и кантовкой после прохода на угол $\lambda = 90^\circ$.

QForm3D позволяет наблюдать формоизменение заготовки и все необходимые параметры напряжённо-деформированного состояния в любой момент расчёта, не останавливая его. Смещение заготовки и её кантовка задаются в виде таблицы (Рис. 15). Ниже в виде таблицы представляется форма заготовки после каждого обжатия для расчёта операции «Обжим 1000» (Рис. 16). Включён режим отображения синим цветом контакта инструмента и заготовки. Возможно моделирование с использованием других значений угла поворота в зависимости от конкретной ситуации, например, ковка «по гребешкам».

Удар	Охлажд. на возд.[с]	Охлажд. в инстр.[с]	Смещение [мм]	Угол поворота [град]
1	15	2.5	0	0
2	0	2.5	-500	0
3	0	2.5	500	90
4	0	2.5	-500	0
5	0	2.5	500	90

Рис. 15. Табличное задание подачи (смещения) и кантовки заготовки на примере первых 4-х обжатий. Вариант 1

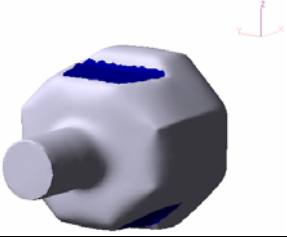
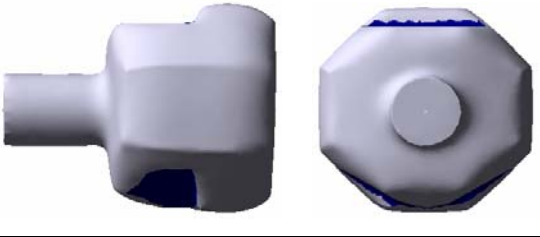
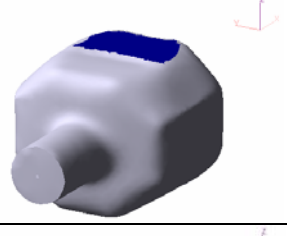
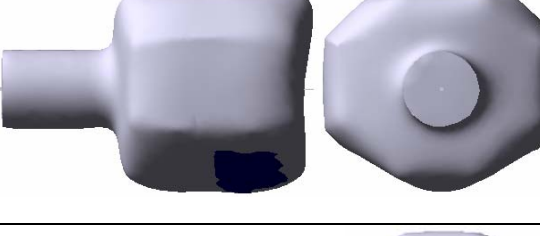
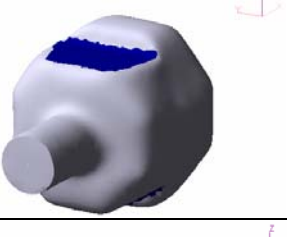
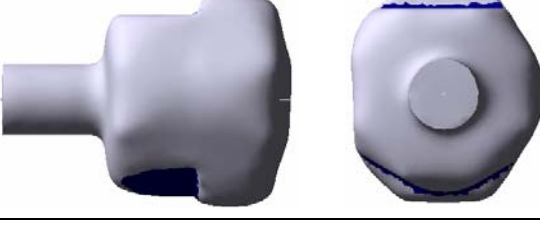
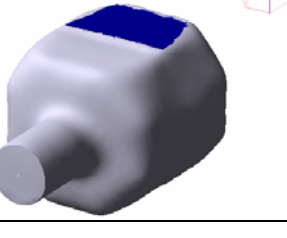
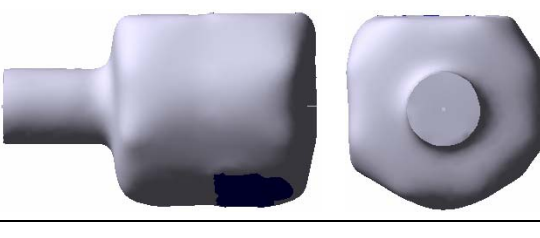
Номер обжатия	Форма заготовки	Стандартные виды
1 обжатие Смещение: 0		
2 обжатие Смещение: -500		
3 обжатие Смещение: 500 Угол поворота 90°		
4 обжатие Смещение: -500		

Рис. 16. Формоизменение и смещение заготовки между обжатиями операции «Обжим 1000», Синим цветом обозначен контакт инструмента с заготовкой. Вариант 1

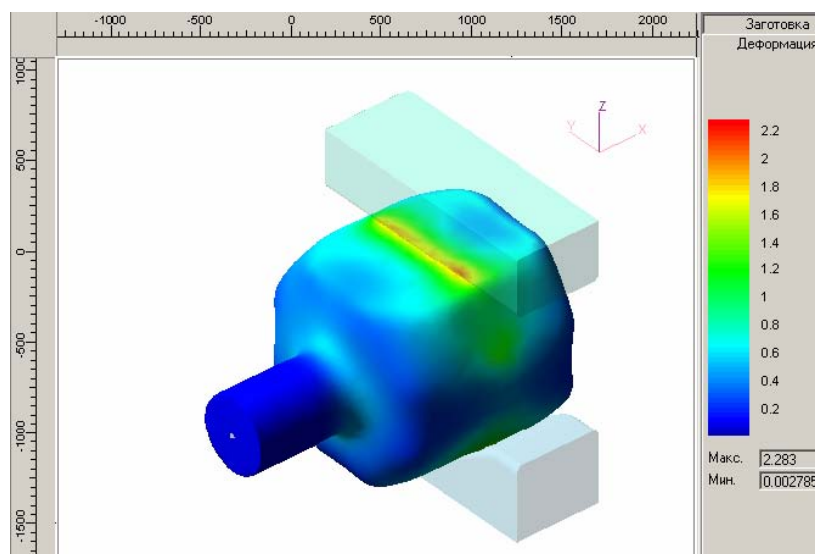


Рис. 17. Распределение деформации в конце операции «Обжим 1000»

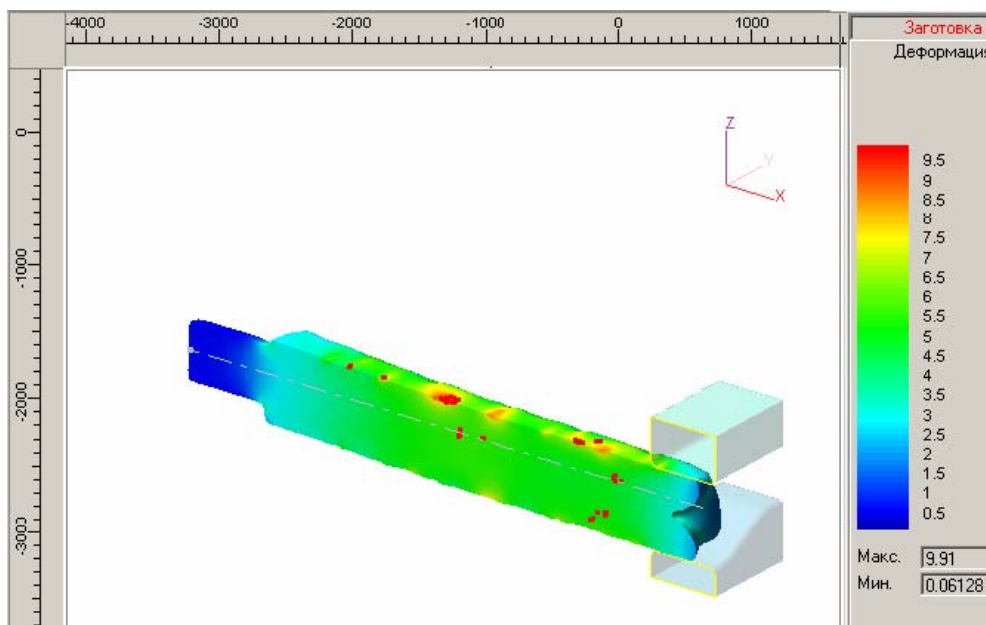


Рис. 18. Сечение поковки вертикальной плоскостью в конце операции «Обжим 420». Показано распределение поля деформации

По распределению деформации можно судить о степени проработки структуры поковки (Рис. 17, 18).

Вариант 2: Моделирование технологической операции свободнойковки с обжатием на определённую величину, кантовкой на $\lambda = 52.5^\circ$, последующим обжатием до получения необходимой формы сечения, подача на $L_0 = 500$ мм.

Особенность протяжки комбинированными бойками состоит в том, что течение металла вдоль продольной оси заготовки под верхним плоским и нижним вырезным бойками не одинаково. Поэтому во избежание прогиба поковки в сторону вырезного бойка, который даёт меньшую вытяжку, наиболее целесообразно при протяжке подавать поковку под бойки на величину L_0 , обжимать на заданный размер, кантовать на определённый угол λ , снова обжимать и т.д. до получения необходимой формы сечения, затем производить следующую подачу и повторять процесс. Получить из заготовки диаметром D_0 поковку диаметром d_k (диаметр окружности вписанной в сечение полученной поковки) можно с помощью бесконечно большого количества режимов протяжки. Однако рациональным режимом будет тот, который позволит получить поковки за минимальное число обжатий и минимальный суммарный угол кантовки [2].

В общем случае для протяжки каждой конкретной поковки должна существовать своя последовательность обжатий, подач и кантовок, приводящая к получению поковки заданных размеров за минимальное время. Целесообразно на каждой подаче протяжку с диаметра D_0 до диаметра d_0 разбить на ряд подобных циклов (циклом называется такая последовательность кантовок, которая позволяет для определённого диапазона относительных обжатий получить в сечении поковки заданный многоугольник). Повторение цикла должно всегда приводить к тому же многоугольнику, для чего необходимо, чтобы все обжатия внутри цикла осуществлялись до одного диаметра d_i .

Исходя из изложенных рекомендаций [3], выполнено моделирование технологического процесса с постоянной подачей $L_0 = 500$ мм и углом кантовки $\lambda = 52.5^\circ$ протяжки в комбинированных бойках с углом выреза 120° .

После серии обжимов по заданной технологической схеме (Рис. 11) получена

геометрическая форма (Рис. 20, 21) и соответствующее распределение деформации по сечению (Рис. 22).

Удар	Охлажд. в INSTR.[с]	Смещение [мм]	Угол поворота [град]
1	2.5	0	0
2	2.5	0	52.5
3	2.5	0	52.5
4	2.5	-500	0

Рис. 19. Количество обжатий (ударов), время охлаждения, подача (смещение) и поворот заготовки между ударами задаются в виде таблицы на этапе ввода исходных данных операции «Обжим 420». Показано для первых 4-х обжатий

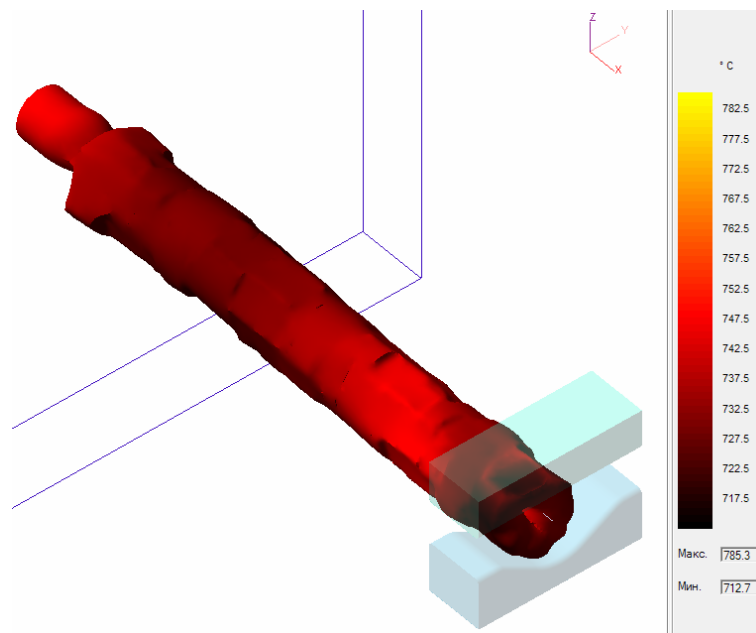


Рис. 20. Поле температуры в конце операции «Обжим 420». По распределению температуры можно судить о необходимости подогрева поковки

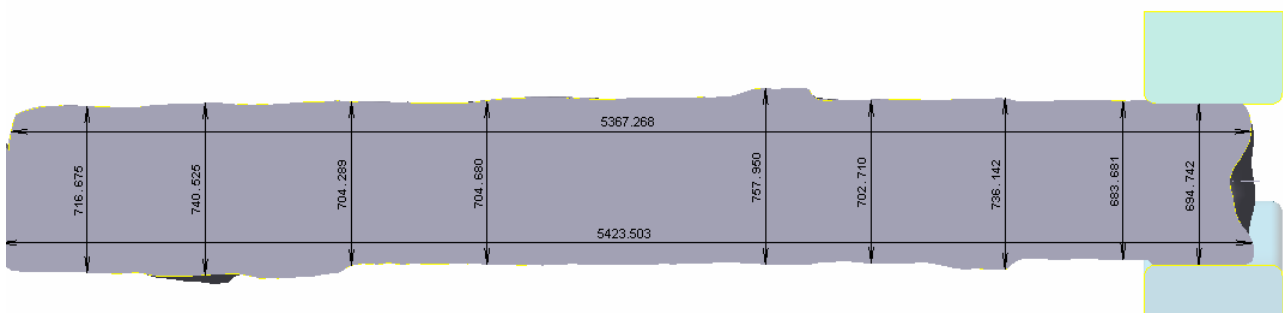


Рис. 21. Сечение поковки в конце операции «Обжим 420»

Распределение деформации (Рис. 22) показывает достижение требуемой проработки структуры по всему сечению поковки, что является важнейшей целью операции протяжки.

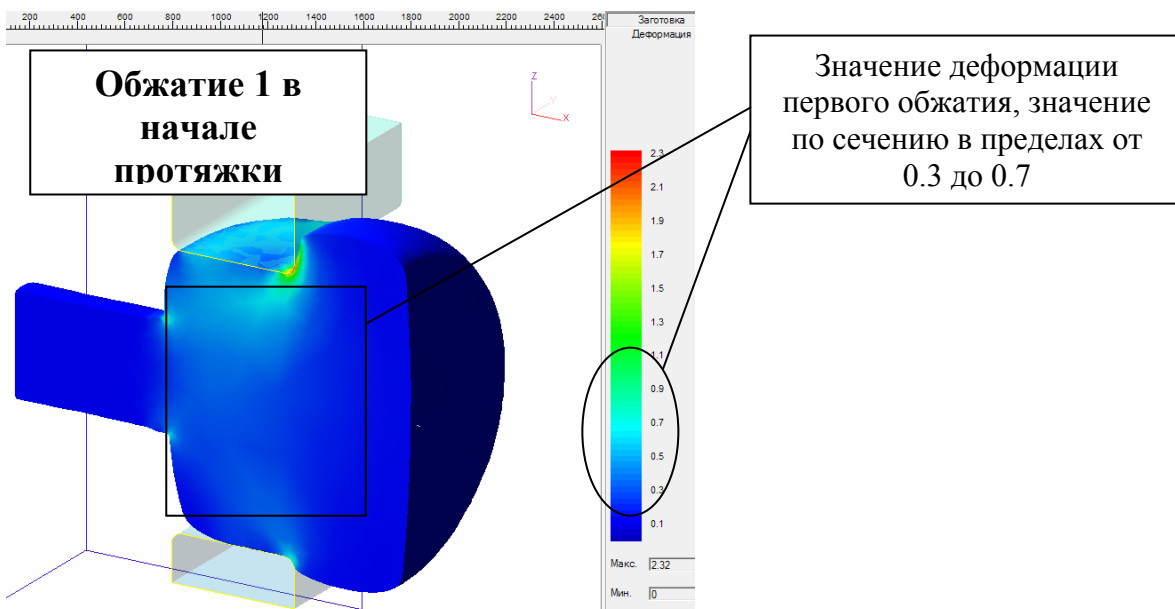
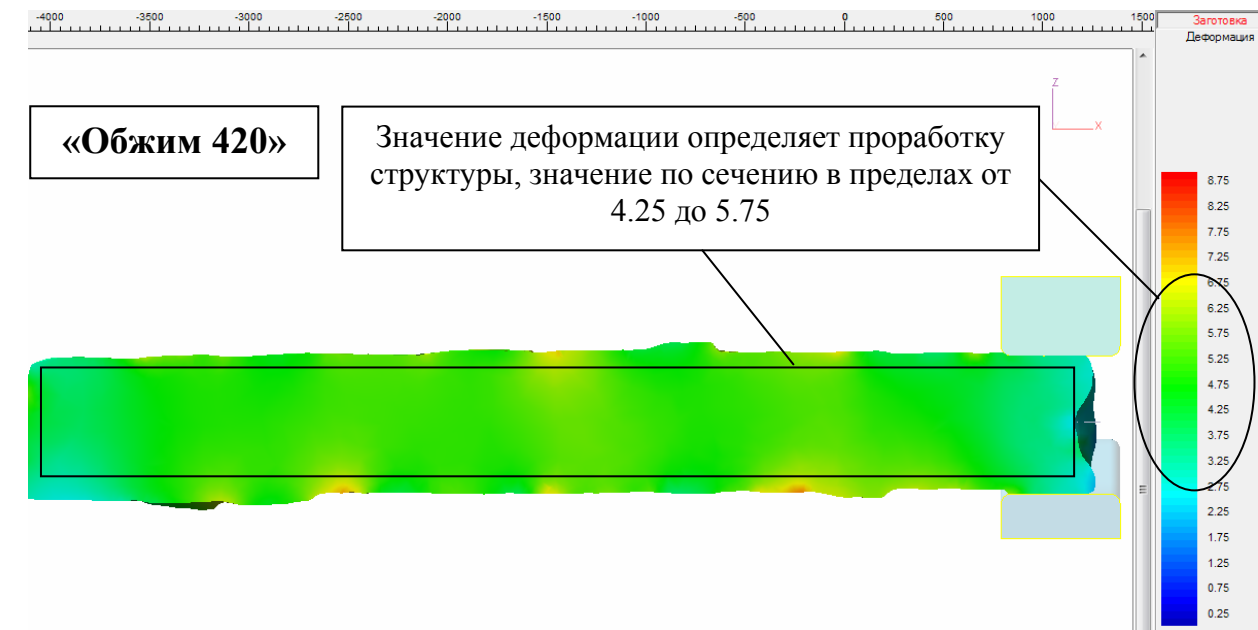


Рис. 22. Распределение деформации по сечению поковки в конце операции «Обжим 420» и, для сравнения, на первом обжатии всей технологической цепочки

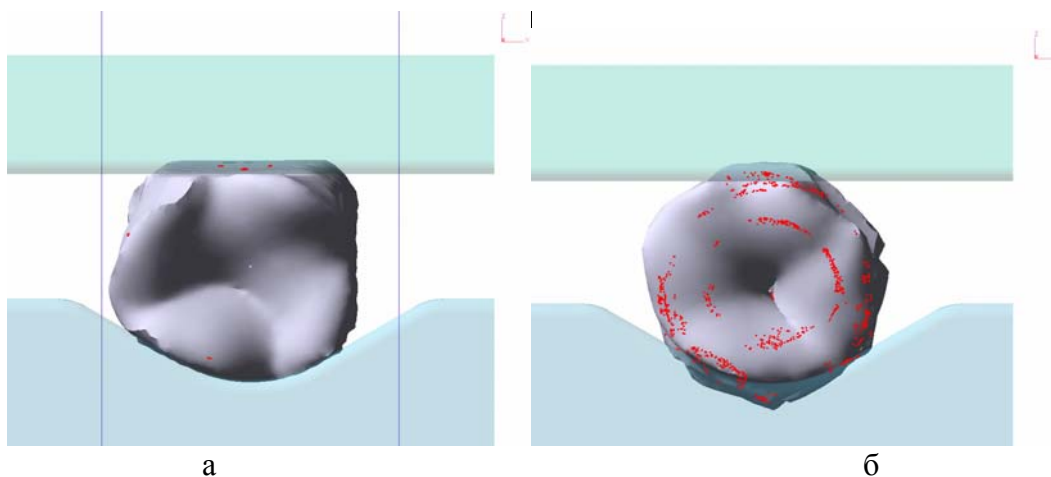


Рис. 23. Сравнение конечной формы поковки для двух рассмотренных вариантов моделирования технологии: а – вариант 1; б – вариант 2

Рациональным режимом свободнойковки является тот, который позволит получить поковку требуемого сечения и длины за минимальное число обжатий и минимальный суммарный угол кантовки. Исходя из полученных результатов моделирования, оптимальная форма сечения (близкая к окружности) получается при технологическом режиме варианта 2.

4. Определение степени деформации (укова) как параметра оценки распространения деформации внутри слитка, проработка дефектов

Большие величины обжима при протяжке способствуют проникновению деформаций до оси заготовки и повышению плотности металла в центральных зонах с заваркой осевых рыхлостей и дефектов, однако, величины обжима определяются запасом пластичности сталей. С помощью QForm3D можно определять проковывание различных по форме и размерам дефектов.

Цель вариантов моделирования – соотнесение степени деформации (укова) слитка для операций свободнойковки и проработки дефектов макроструктуры различной величины по центру слитка (пористость, рыхлость).

Для моделирования дефектов использовалась геометрия с предварительно сделанными сферическими полостями разного диаметра (Рис. 24 а) и продольной полостью по оси слитка (Рис. 24 б), тем самым, наблюдая степень деформации и изменение геометрии полости, определим величину укова и возможность устранения дефекта с определённым размером.

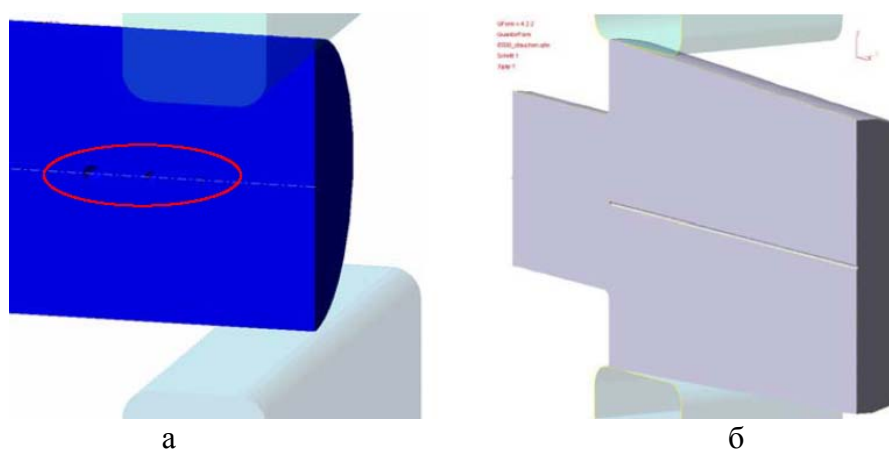


Рис. 24. Виды дефектов для моделирования: а – сферические полости разного диаметра внутри слитка, б – продольная полость внутри слитка

Вариант 1: сферические полости разного диаметра внутри слитка (Рис. 24 а)

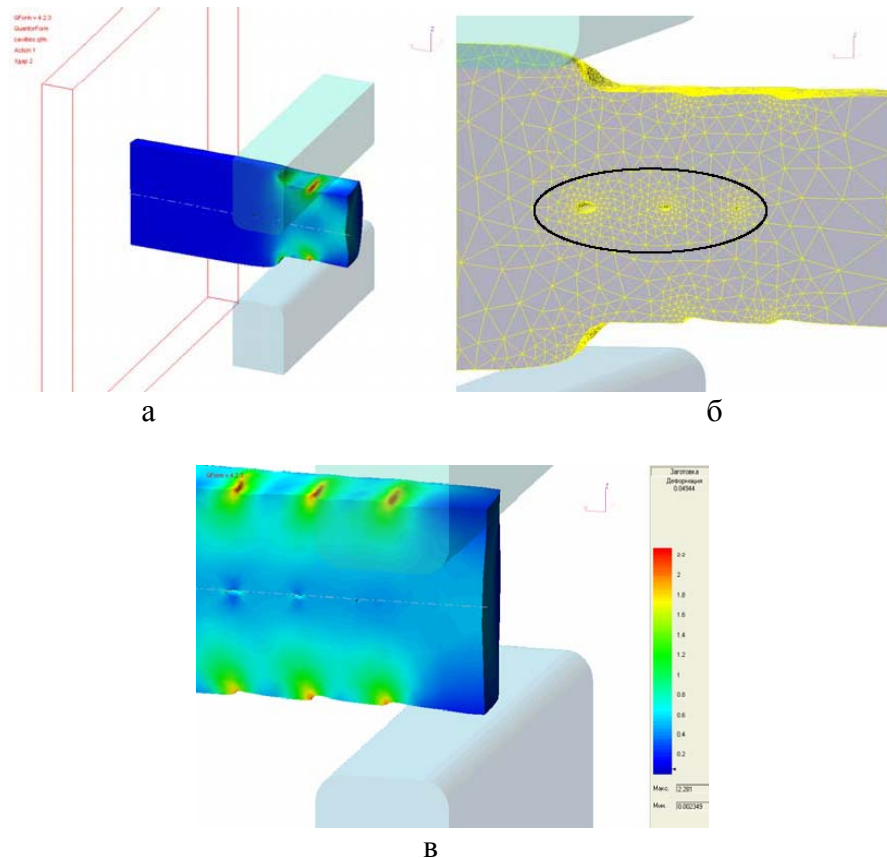
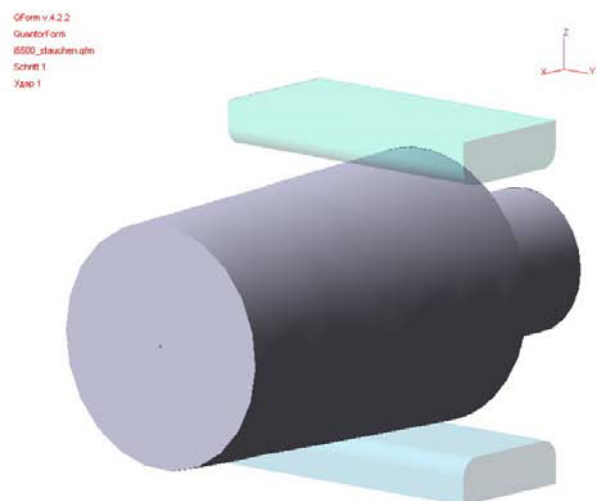


Рис. 25. Деформирование сферических полостей внутри слитка: а – моделирование захвата слитка; б – конечно-элементная сетка в местах закрытых полостей разной величины внутри поковки; в – распределение степени деформации на одном из обжатий ковки

Вариант 2: продольная полость внутри слитка (Рис. 24 б)

Исходные данные:
Оборудование – гидравлический пресс
Скорость – 0.08 м/с
Максимальная сила – 500 MN
Материал заготовки – 55NiCrMoV6
Начальная температура – 1200 °C
Температура инструмента – 300 °C
Охлаждение в инструменте – 60 сек



Р
Рис. 26. Слиток в начале первого обжатия

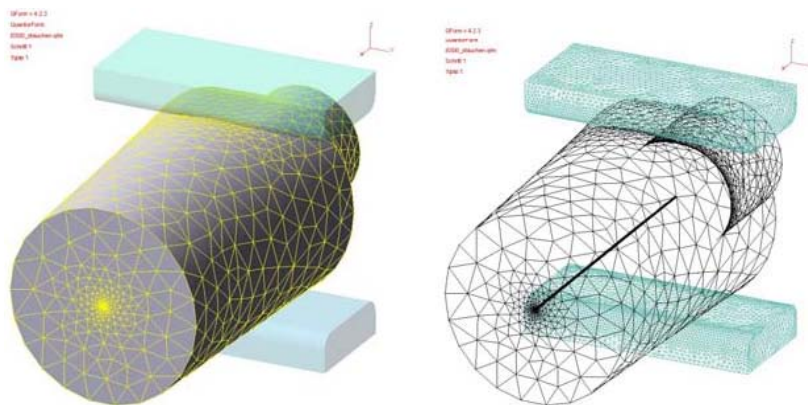


Рис. 27. Автоматическое сгущение сетки КЭ в местах сложной геометрии. Плотность сетки контролируется специальным алгоритмом адаптивного разбиения

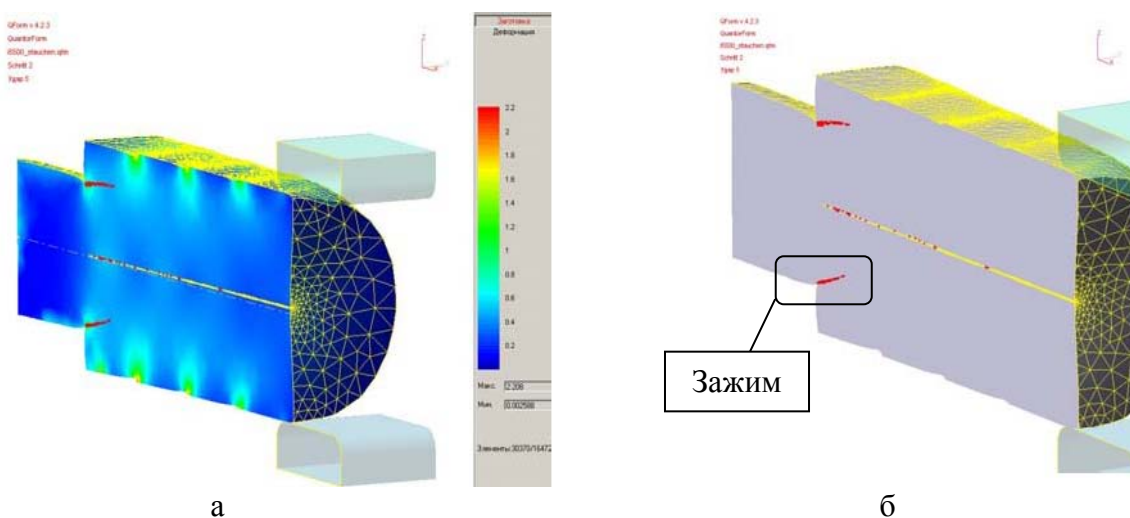


Рис. 28. Результаты моделирования: а – распределение поля деформации внутри поковки в виде заливки; б – продольная полость на этапе свободнойковки. Красными точками показываются места модификации сетки, в данном случае – «заковывания» дефекта макроструктуры

Исходя из полученного распределения степени деформации по сечению поковки и определения мест модификации сетки (Рис. 28), можно судить о проработке макроструктуры.

Образование зажима, определённое моделированием и помеченное красными точками в области захвата слитка (Рис. 28 б), указывает на неверно разработанную последовательность обжимов, подач и кантовок заготовки. Путем изменения технологического процесса с проверкой моделированием можно добиться устранения этого дефекта.

Заключение:

Выполнение компьютерного моделирования свободнойковки с помощью QForm3D позволяет определить величину подач, обжимов, кантовок поковки, необходимость ее подогрева на этапе разработки технологии. Предсказать степень проработки структуры и форму поковки после выполнения заданных кузнечных операций. Разработать рациональные режимы нагрева слитка.

- 1) Возможно моделирование нагрева больших слитков с разными режимами нагрева.
- 2) Возможно моделирование основных ковочных операций и оценка качества проработки слитка по степени деформации.

3) QForm3D позволяет отслеживать изменение степени деформации, тем самым обеспечивает контроль проработки структуры определённых участков поковки и возможность устранения различных дефектов.

4) Использование программы для подготовки техпроцессов свободнойковки крупных слитков позволяет снизить вероятность возникновения брака, что обеспечивается:

-возможностью проведения компьютерного эксперимента процессаковки с учетом остывания крупных поковок, тем самым подтверждая правильность и оптимальность разработанного техпроцесса;

-возможностью оценить количество и режимы подогрева поковки в ходековки;

-подготовкой описания последовательности обжатий, подач и кантовок поковки (на основных операцияхковки: протяжки, биллетировки и «проглажки») как рекомендаций для бригады кузнецов.

4) При разработке возможна оптимизация и выбор рациональной формы инструмента для выполнения некоторых операций.

5) Программа QForm3D особенно полезна при разработке новых технологийковки, а также при подготовке техпроцессов единичного изготовления крупногабаритных поковок энергетического машиностроения.

Список литературы

[1] – Е. И. Семёнов «Ковка и штамповка». Справочник. М. «Машиностроение». 1985 г. Т.2.

[2] – Журнал «Кузнечно-штамповочное производство», Технологияковки и объёмной штамповки. «Об улучшении технологии свободнойковки». П. В. Камнев, Л. Н. Петров, В. М. Чемоданов. УДК 621.73.042

[3] – Журнал «Кузнечно-штамповочное производство», Технологияковки и объёмной штамповки. «Оптимизация режимов протяжки поковок комбинированными бойками». А. В. Алтыкис, М. М. Колосков, В. А. Назарьян. УДК 621.73.042

[4] – QForm3D, конечно-элементная программа для расчёта процессов пластической деформации металлов и сплавов, ©1991-2008, ООО «КванторФорм», www.qform3d.com