

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №9 (171). С.10-18.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №9 (171). P. 10-18.

Научная статья

УДК 621.7.011

doi: 10.30987/2223-4608-2025-8-10-18

Современные тренды и перспективы развития обработки металлов давлением

Виктор Алексеевич Дёмин, д.т.н.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

va_demin@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Переходники трубопроводных систем являются весьма востребованными деталями в узлах двигателей. В трубопроводных системах, работающих в агрессивных средах данные, детали требуют применения специальных цветных сплавов, отличающихся высокой прочностью. Их изготовление весьма затруднительно. Одним из вариантов их получения является горячая штамповка элементов труб в условиях медленного формоизменения. В статье исследована операция формообразования внутреннего утолщения на тонкостенной конической корпусной заготовке. Целью формирования утолщения является подготовка торца переходника для трубопроводных систем, представляющего из себя усеченный тонкостенный под дальнейшую сварку с другими элементами трубопроводных систем. Формирование толщеного края предполагается производить частичной осадкой торца заготовки. Выполнено моделирование данной операции в программном комплексе DEFORM, в ходе которого произведена оценка влияния режимов обработки и геометрии рабочего инструмента на энергосиловые параметры процесса. Предполагается, что материалом заготовки является титановый сплав ВТ6. Применяемый материал предполагает реализацию процесса высадки в горячих условиях в скоростных условиях формообразования, обеспечивающих минимальные силы и оптимальное напряжённое состояние заготовки. При высадке важно учитывать параметры процесса, такие как давление, температура и скорость, чтобы минимизировать или избежать повреждения заготовки. Выполнен ряд опытов, в ходе которых установлено влияние угла конусности, рабочего хода инструмента, скорости деформирования контактного трения. Выявлено, что при рассматриваемой схеме деформирования наибольшее влияние оказывает изменение угла конусности заготовки на силу, что очевидно связано с изменением кинематики течения материала при больших углах конусности. Представлены результаты моделирования процессов обработки металлов давлением. Среди рассмотренных задач: изотермическая осадка кольцевой заготовки, горячая объемная штамповка корпусных заготовок из сплава ВТ6, прошивка листового металла вращающимся пуансоном, трехвалковая винтовая прокатка с углами подачи 12 и 20 °, горячая толстолистовая вытяжка сферической крышки. Показано, что использование метода конечных элементов в решение задач обработки металлов давлением позволяет учесть большее количество факторов, влияющих на процесс обработки, то есть получить более точное решение, но его можно использовать для конкретной заготовки и оснастки. Особую ценность имеют решения новых технологических задач, по которым нет ни экспериментальных, ни теоретических данных. Большое внимание уделено возможности применения гипотезы Кирхгофа-Лява к операциям листовой штамповки. Основное внимание в статье уделено горячей толстолистовой вытяжке сферических деталей. Решена задача горячей вытяжки сферической крышки контейнера из стали 10, толщиной 8 мм. Температура нагрева заготовки 1000 °. Моделирование проводили в 2D и 3D, также рассмотрены варианты с тетраэдрической и гексаэдрической сеткой. Сделан вывод, что максимальная точность расчетов получена для моделирования в 3D с тетраэдрической сеткой. Проведено моделирование отклонения формы поковки от заданной чертежом детали. Показано, для получения максимальной точности необходимо штамповать с минимально допустимой температурой в зоне фланца заготовки.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, моделирование, QForm, горячая листовая штамповка

Для цитирования: Ларин С.Н., Пасынков А.А. Горячее деформирование торцевых элементов корпусных конических заготовок // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 9 (171). С. 10–18
doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-10-18

Current trends and prospects in metal forming development

Viktor A. Demin, D. Eng.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
va_demin@bk.ru

Abstract. Metal forming simulation data are presented. Among the tasks being viewed are the following: isothermal yield of a ring blank, drop die forging of body parts made of VT6 alloy, sheet metal piercing with a rotating plug, three-roll screw rolling with feed angles of 12 and 20 degrees, hot thick-gauge stretching of a spheroidal lid. It is shown that the use of the finite element method in solving metal forming problems makes it possible to take into account a greater number of factors affecting metal treatment, that is, to obtain a more accurate solution, which can be used for specific blanks and fitting-outs. Solutions to new process tasks, which did not have any experimental or theoretical data of particular value before, are given. Much attention is paid to the possibility of applying the Kirchhoff-Lyav hypothesis to sheet-metal forming operations. The main focus of the article is on hot thick-sheet stretching of spherical parts. The problem of hot stretch of a spheroidal container lid made of steel 10, 8 mm thick has been solved. The heating temperature of the material blank is 1000 °. The simulation was carried out in 2D and 3D, and metal treatment with tetrahedral and hexahedral grids were also viewed. It is concluded that the maximum accuracy of calculations is obtained for 3D modeling with a tetrahedral grid. The deviation of the forging shape from the detailed drawing is optimized. It is shown that maximum accuracy requires stamping with the minimum allowable temperature in the flange area of the blank.

Keywords: metal forming, simulation, QForm, hot sheet stamping

For citation: Demin V.A. Current trends and prospects in metal forming development / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 10–18. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-10-18

Одним из основных направлений развития обработки металлов давлением является широкое применение математического методов моделирования процессов штамповки. Это позволяет существенно сократить сроки проектирования новых технологических процессов и избежать длительных сроков на доработку технологии и оснастки для получения требуемого качества заготовки.

В настоящее время, в основном, применяют два подхода для решения поставленной

задачи. Это решение поставленной задачи аналитически или численными методами.

В качестве применения аналитического метода решения поставленной задачи можно привести работу [1], в которой рассмотрен расчет изотермической осадки кольцевой заготовки. Решение выполнено с использованием энергетического метода. Схема осадки представлена на рис. 1. Оценку повреждаемости материала заготовки осуществляли по энергетическому и деформационному уравнению.

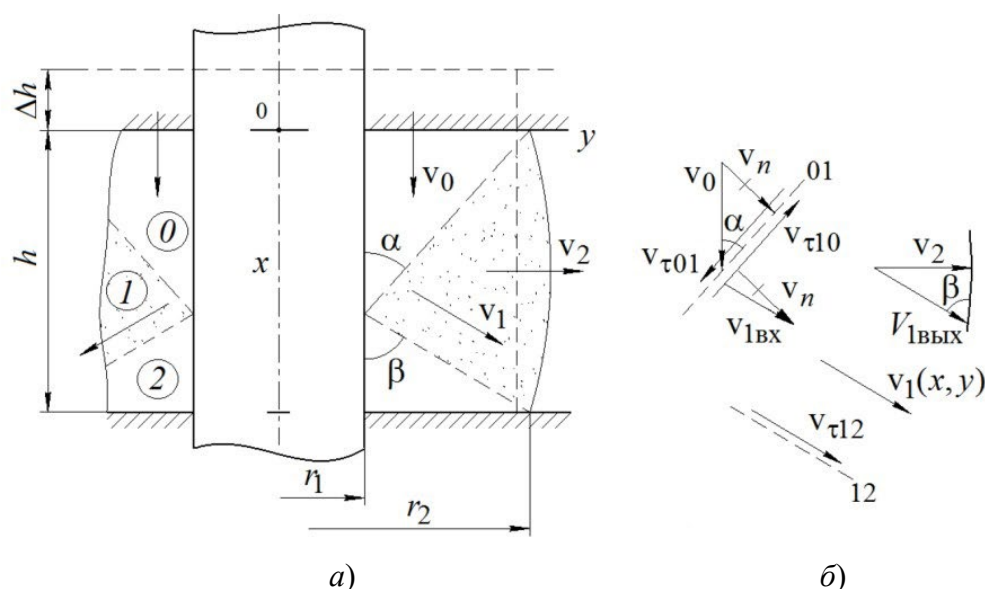


Рис. 1. Схема осадки:

а – поле; б – план скоростей перемещений материала заготовки

Fig. 1. Stretching scheme:

а – field; б – plan of the speeds of movement of the material blank

В результате решения поставленной задачи определили, что для горячей осадки при малых скоростях деформирования происходит снижение давления, и повреждаемость деформируемого материала может зависеть от скорости операции или только от степени формоизменения

Выполненное решение работает в достаточно широком диапазоне переменных параметров процесса штамповки, но при существенном упрощении поставленной задачи.

В работе [2] приведены примеры решения различных задач листовой штамповки с использованием программ QFORM, ANSYS/LS-DYNA, AutoForm. Использование численных методов позволяет получать более точное решение, но для конкретного технологического процесса с фиксированными размерами и механическими характеристиками.

В статье [3], с использованием программы Deform, проведено исследование горячей объемной штамповки корпусных заготовок из сплава ВТ6 в изотермических условиях. Решение пригодно для поковок, которые деформируются по схеме, представленной на рис. 2. Следует отметить и в этом случае решение пригодно для конкретной операции и заготовки, из сплава ВТ6.

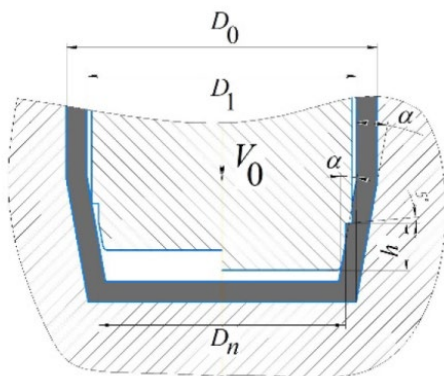


Рис. 2. Схема операции

Fig. 2. Operation diagram

Особенностью данной работы является то, что с использованием методов планирования эксперимента, проводится математический эксперимент. Это позволяет провести «эксперимент» не в трех точках каждой позиции плана, как рекомендовано в [4], а существенно увеличить количество параллельных

опытов, в каждой точке плана эксперимента. В результате получено уравнение регрессии, учитывающее возможное изменение коэффициента трения, высоты формообразующего участка и скорость перемещения пуансона.

На сегодняшний день наиболее актуально создание и эксплуатация российских программ, например, таких как QForm. Программа позволяет моделировать базовые процессы обработки металлов давлением:

- Ковка. Горячая объемная штамповка. Холодная объемная штамповка.
- Листовая штамповка – дополнение к базовому модулю.
- Прессование профилей.
- Раскатка колец.
- Термообработка – моделирование процессов изменения микроструктуры в процессе термомеханической обработки сталей, никелевых, титановых, алюминиевых и других сплавов.
- Винтовая прокатка – дополнение к базовому модулю.
- Продольная и реверсивная прокатка – дополнение к базовому модулю.

Наиболее полно программный комплекс QForm представлен в работе [4]. Основное внимание уделено особенностям конечно-элементного моделирования процессов горячей объемной штамповки иковки. Подробно рассматривается механизм пластической деформации металлов, основные положения метода конечных элементов, механика пластической деформации и температурные эффекты сопровождающие процесс штамповки. Освещены особенности применения метода конечных элементов в программе QForm.

Наиболее эффективно применение математического моделирования для изучения новых процессов обработки металлов давлением. В качестве примера можно привести работу [5], в которой рассмотрен процесс получения отверстий вращающимся пуансоном. При вращении пуансона, за счет трения, происходит нагрев заготовки и происходит горячая объемная штамповка.

Этим способом получены отверстия в заготовках из сплава ХН62ВМЮТ-ВД, который не поддается обычному сверлению. В результате математического моделирования были найдены оптимальные частоты вращения

пуансона, около 15000 об/мин, которые позволяют получить в очаге деформации температуру близкую к 1600 °С.

На рис. 1 показано изменение температурного поля в процессе прошивки. На рис. 1,

представлено начало процесса (температура 1420 °С), на рис. 1, б – середина процесса (температура 1579 °С), на рис. 1, в – конец процесса (температура 1488 °С).

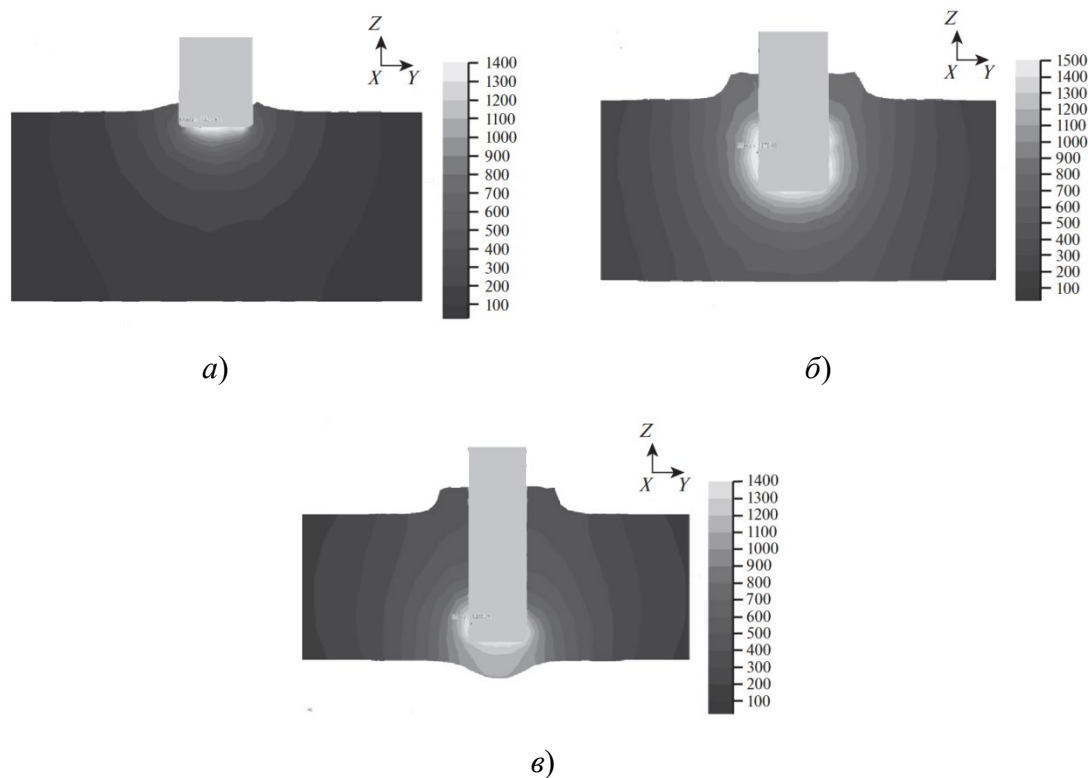


Рис. 3. Изменение температурного поля в процессе прошивки

Fig. 3. Temperature field change during the mold punching

В работе [6] приведено исследование трехвалковой винтовой прокатки с применением QForm для моделирования процессов обработки металлов давлением. Моделирование позволило провести оценку деформированного, кинематического и теплового состояния заготовки.

Моделирование провели для конкретного стана МИСИС-100 и углах подачи валков 12 и 20 °. В качестве заготовки был заложен пруток из стали 45. Скорость вращения валков 90 об/мин. Трение задано по Зибелю, фактор трения не варьировался и равнялся трем. В результате получено поле накопленной деформации по объему поковки (рис. 4). Изменение накопленной деформации по длине заготовки для различных углов подачи валов в 12 и 20 °, приведено на рис. 5.

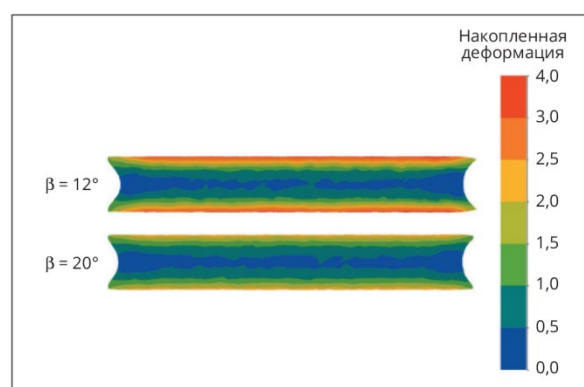


Рис. 4. Поле распределения накопленной деформации в заготовке после прокатки при углах подачи валков $\beta = 12^\circ$ и $\beta = 20^\circ$

Fig. 4. The distribution field of accumulated deformation in the blank after rolling at the angles of a roller feed $\beta = 12^\circ$ и $\beta = 20^\circ$

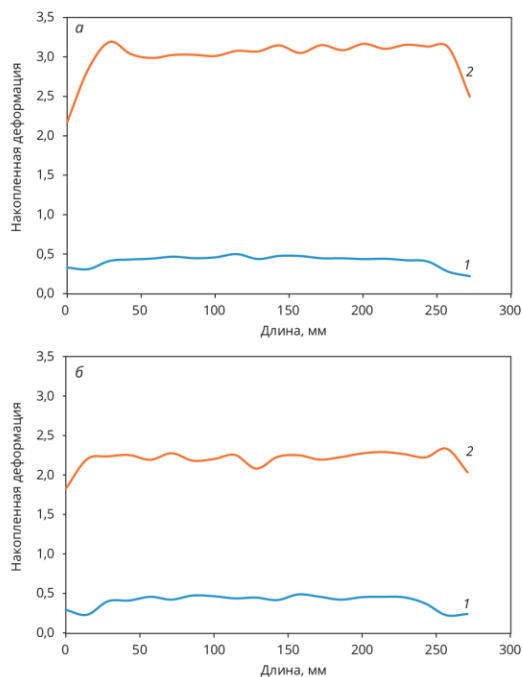


Рис. 5. Изменение накопленной деформации по длине заготовки в центре (1) и на поверхности (2) при прокатке с углом подачи валков 12° (а) и 20° (б)

Fig. 5. Change of accumulated deformation along the length of the blank in the center (1) and on the surface (2) during rolling with a roll feed angle of 12° (a) and 20° (b)

Компьютерное моделирование трехвалковой винтовой прокатки позволило получить снижение на 33 % среднеквадратического отклонения накопленной деформации и получить поковки с более однородной структурой. Изменение угла подачи валков уменьшает диапазон изменения температуры в объеме заготовки. Это особенно актуально для материалов с небольшим диапазоном ковочных температур. Однако следует отметить, что полученные результаты актуальны для стали 45, и углов подачи валков с 12 до 20° .

В последнее время российская компания ООО «КванторФорм», разработчик программы QForm, приступила к разработке программного модуля «Толстолистовая штамповка».

На сегодняшний день существуют и другие программы, например AutoForm, RAM-Stamp, для моделирования листовой штамповки. Все они моделируют процесс без учета нагрева заготовки и базируются на гипотезах Кирхгофа-Лява, которые являются

обобщением гипотезы плоских сечений теории балок в сопротивлении материалов. В учебном пособии [7] указано, что основные уравнения для анализа процессов листовой штамповки выведены с использованием технической теории оболочек, которая тоже основана на гипотезах Кирхгофа-Лява и радиусы кривизны срединной поверхности R значительно больше толщины заготовки s . В книге [8], сказано «закон плоских сечений не соблюдается, полученные на основе выводы оказываются весьма точными (если, конечно, $h/l \ll 1$), где h – максимальный размер поперечного сечения; l – длина стержня.

В соответствии с ограничениями на исходные размеры заготовки принимается в качестве заготовки поверхность нулевой толщины. Когда при построении модели штамповки в пакетах AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks происходит преобразование в лист, фактически заменяют лист на поверхность с нулевой толщиной.

Для листовой штамповки в последние годы принято, что гипотезы Кирхгофа-Лява выполняются при соотношении $R/s > 5$. Поэтому лучше использовать программу QForm для задач, когда $R/s < 5$, так как в этой программе мы можем увеличить количество элементов по толщине. При этом необходимо учитывать, что для решения поставленной задачи этой программой необходимо использовать минимум пять элементов по толщине, что, соответственно, приводит к существенному увеличению конечных элементов и времени счета.

В работе [9] рассмотрены возможности интенсификации горячей листовой штамповки днищ. Сделан вывод о том, что создание градиента температур по поверхности заготовки позволяет получить более равномерное распределение относительной деформации по толщине. Это позволяет снизить вес заготовки, обеспечить стабильность конструктивной прочности изделия. Сегодня из-за утонения заготовки в процессе штамповки, при выборе толщины заготовки к заданной толщине детали,

добавляется 15 %. Поэтому получение детали с минимальной относительной деформацией по толщине является актуальной задачей.

На рис. 6 представлено моделирование горячей листовой штамповки для сферической крышки контейнера.

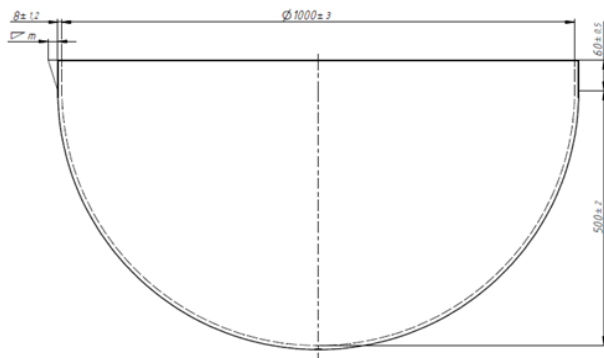


Рис. 6. Крышка контейнера

Fig. 6. Container lid

Крышка изготавливается из стали 10, толщиной 8 мм. Заготовка имеет диаметр 1500 мм. Нагрев заготовки проводился до температуры 1000 С°. Расчетный коэффициент вытяжки 1,5. Количество элементов по толщине 8.

Было проведено моделирование в 2D и 3D, промоделированы варианты с тетраэдрической и гексаэдрической сеткой, а также с нагревом всей заготовки и только поверхности, находящейся под прижимом.

Рассмотрим вытяжку при полном нагреве заготовки. Нагрев заготовки моделировали для газовой печи. Моделирование распределения температуры по детали показало, что под прижимом температура снижалась с 1000 до 600 С°. Это потребовало использование кривых упрочнения для достаточно широкого диапазона температур. С учетом того, что в дальнейшем будем нагревать только фланец, использовали кривые упрочнения в диапазоне от 30 до 1000 С°.

В результате получили следующее изменение относительной деформации по толщине (рис. 7).

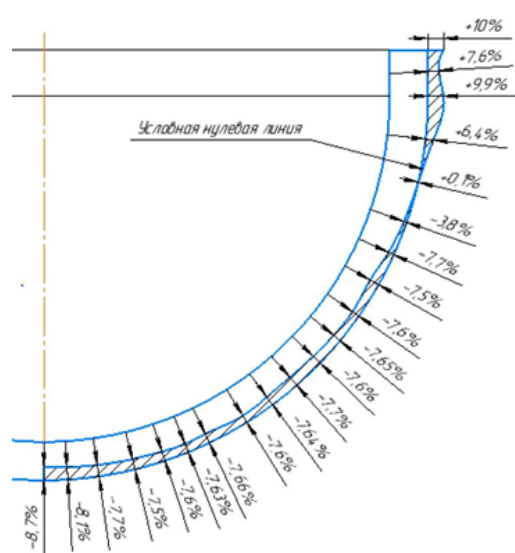


Рис. 7. Моделирование 2D при нагреве всей заготовки

Fig. 7. 2D modeling during heating of the entire blank

Результаты моделирования показывают, что максимальное утонение заготовки происходит в центре сферы и равняется 8,7 %, что не соответствует результатам замеров подобных оболочек на производстве (рис. 8).

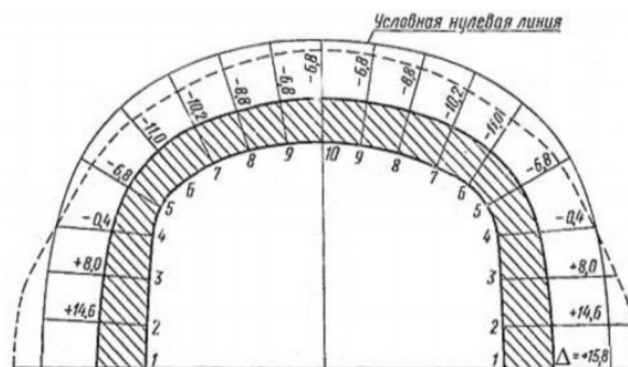


Рис. 8. Характерное относительное изменение толщины стенки днищ при горячей листовой штамповке

Fig. 8. Characteristic relative change in the wall thickness of the bottoms during hot sheet stamping

Приведем пример моделирования в 3D с тетраэдрической и гексаэдрической сеткой. В результате моделирования в 3D с гексаэдрической сеткой получили результат, показанный на рис. 9.

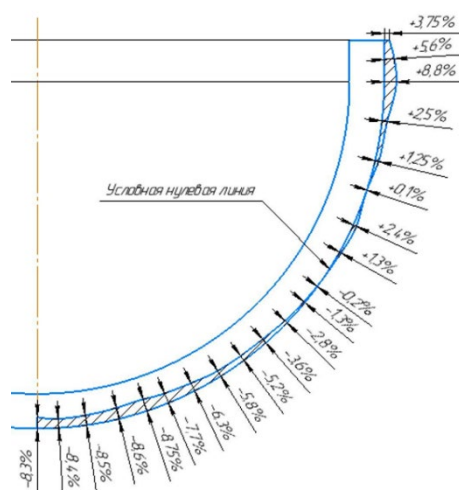


Рис. 9. Моделирование 3D с тетраэдрической сеткой при нагреве всей заготовки

Fig. 9. 3D modeling with a tetrahedral grid when the blank is heated entirely

В данном случае минимальная относительная деформация по толщине получена не по центру сферы, что лучше соответствует результатам, полученным на производстве. Однако смущает минимальное увеличение толщины на краю фланца. Здесь должно быть максимальное увеличение толщины заготовки.

Результаты моделирования 3D относительной деформации по толщине с гексаэдрической сеткой при нагреве всей заготовки показаны на рис. 10.

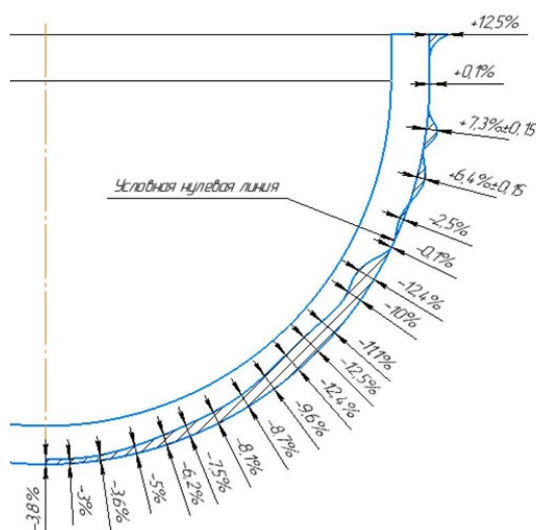


Рис. 10. Моделирование 3D с гексаэдрической сеткой при нагреве всей заготовки

Fig. 10. 3D modeling with a hexahedral grid when the blank is heated entirely

Анализ результатов моделирования показывает, что в данном случае максимальное утонение заготовки существенно сместилось от центра сферы и нет увеличения толщины на фланце. Поэтому можно сделать вывод, что лучшие результаты получены для моделирования 3D с тетраэдрической сеткой.

Рассмотрим вытяжку с нагревом только части заготовки, которая при штамповке находится под прижимом. Снова будем моделироваться в 2D и 3D варианты с тетраэдрической и гексаэдрической сеткой.

Представим два варианта местного нагрева: индукционный нагрев и газовой горелкой. Индукционный нагрев позволяет уменьшить время нагрева, что приведет к повышению производительности и уменьшению потерь на окалину. Но при нагреве происходит коробление заготовки, увеличивается зазор между заготовкой и индуктором, что приводит к существенному снижению КПД. Поэтому расчет проведен при нагреве кольцевой газовой горелкой. При этом учитывалось, что в QForm есть модуль нагрева и охлаждения спрейерами, моделирующими горелки.

Результаты моделирования вытяжки сферической детали в 2D с нагревом только фланца заготовки показаны на рис. 11.

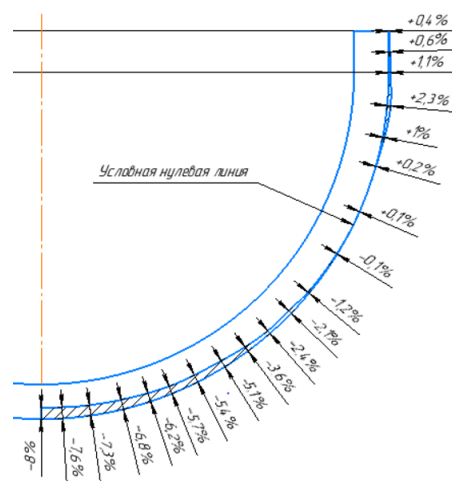


Рис. 11. Моделирование 2D при нагреве фланца заготовки

Fig. 11. 2D modeling during heating of the blank flange

В данном случае, как и при нагреве всей заготовки, максимальное утонение находится в центре сферы, что не соответствует физике процесса.

Моделирование горячей вытяжки сферической детали в 3D. Так как в QForm есть модуль моделирования нагрева спрейерами, то было проведено моделирование нагрева на участке от 1280 до 1500 мм. Была создана группа спрейеров по круговому массиву в количестве 60 шт. Получено распределение температуры в заготовке и после штамповки.

Для моделирования 3D с тетраэдрической сеткой при нагреве только фланца заготовки, получено следующее распределение относительной деформации по толщине. Результат расчета показан на рис. 12.

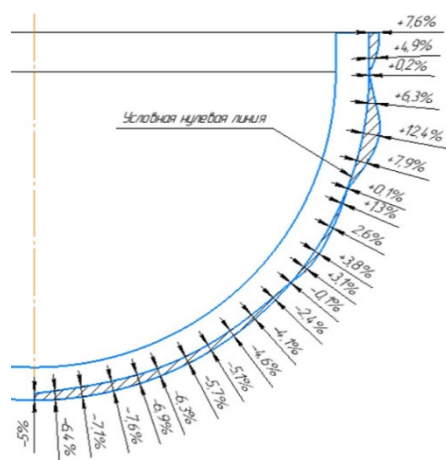


Рис. 12. Моделирование 3D с тетраэдрической сеткой при нагреве фланца заготовки

Fig. 12. 3D modeling with a tetrahedral grid during heating of the blank flange

Для гексаэдрической сетки результаты расчета показаны на рис. 13.

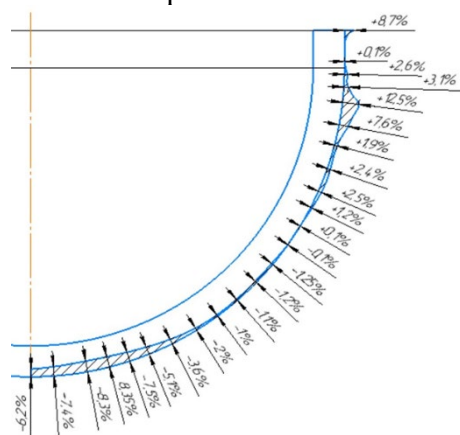


Рис. 13 Моделирование 3D с гексаэдрической сеткой при нагреве фланца заготовки

Fig. 13 3D modeling with a hexahedral grid during heating of the blank flange

Снова можно увидеть, что моделирование 3D с тетраэдрической сеткой дает результаты, которые лучше коррелируются с данными, полученными на производстве.

Одним из основных требований к поковкам подобного рода – это допуск на размеры, определяющие форму поковки. В данном случае максимальное допустимое отклонение формы 6 мм. Поэтому было проведено исследование для определения области нагрева и температуры, для обеспечения минимального отклонения формы поковки от заданной геометрии. Моделирование проводили для нагрева кольца с радиусами от 620 до 750 мм и температурах от 1000 до 500 °.

Получен результат: отклонение от формы уменьшается при снижении температуры нагрева, при температурах от 350...360 °, но составляет 8 мм, что недопустимо по техническим условиям на поковку.

В ходе последующего моделирования установлено, что при росте участка нагрева от 1180 до 1500 мм отклонение формы идёт в худшую сторону, а при нагреве до диаметра 1220 мм точность формы становится ближе к искомой. Поэтому при окончательном моделировании была уменьшена температура и варьировалась область нагрева на расстоянии около 1200 мм, что позволило получить качественную поковку.

Анализ полученных решений показывает, существенное влияние принятых при моделировании допущений на результат. Поэтому необходимо очень осторожно обращаться с параметрами технологического процесса, применяемыми в моделировании, помня выражение, что «если заложить в мельницу лебеду, мука не получится».

При применении существующих программ для моделирования процессов обработки металлов давлением необходимо учитывать достаточно большую их стоимость, которая может достигать десятков миллионов рублей. Кроме этого, на предприятии должны быть высококвалифицированные кадры, умеющие правильно применить этот очень дорогой и сложный инструмент.

В связи с этим, в развитых странах существует практика покупки «временной» лицензии, которая позволяет при появлении новой

детали провести моделирование и сэкономить существенные средства.

Другим направлением применения компьютерного моделирования может быть создание малых предприятий, которые выполняли заказы по проектированию новых технологических процессов. Основной проблемой в этом случае, с точки зрения автора, это фактическое отсутствие ответственности за предложенное решение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Черняев А.В., Чудин В.Н.** Верхнеграничный расчет изотермической осадки кольцевой заготовки. Научно-технические технологии в машиностроении. 2025. № 2 (164). С. 23–29.
2. **Демин В.А.** Научно-технические технологии обработки давлением в машиностроении, авиации и транспорте. Научно-технические технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 13–20.
3. **Ларин С.Н., Бессмертная Ю.В.** Горячее деформирование корпусных заготовок в изотермических условиях. Научно-технические технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 21–28.
4. **Хертман К., Лецкий Э., Шефер В.** Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Москва. издательство Мир, 1977. 552 с.
5. **Конечно-элементное моделирование** технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие / [А.В. Власов и др.]: под ред. А.В. Власова. М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 383 с.
6. **Исследование влияния** технологических режимов термосверления отверстий в изделиях из труднодеформируемых материалов на износ инструмента. Забелян Д.М., Бурлаков И.А., Гордин Д.Э., Мангасарян Г.А., Гладков Ю.А. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 1. С. 83–90.
7. **Оценка деформированного**, кинематического и теплового состояния стальных заготовок при трехвалковой винтовой прокатке. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Воронников В.А., Скрипаленко М.Н., Юсупов В.С., Андреев В.А., Рогачев С.О., Куприков М.П., Гартвиг А.А., Гладков Ю.А. Сталь. 2024. № 6. С. 11–15
8. **Попов Е.А.** Основы теории листовой штамповки. Учебное пособие для вузов. М., «Машиностроение», 1977. 278 с.

9. **Работнов Ю.Н.** Механика деформируемого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.

10. **Демин В.А.** Интенсификация горячей листовой штамповки днищ. Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 9–14. 10.30987/2223-4608-2023-9-14

REFERENCES

1. Chernyaev A.V., Chudin V.N. Upper boundary calculation of isothermal yield of a ring blank. Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2025, No. 2 (164), pp. 23–29.
2. Demin V.A. Pressing hi-techs in mechanical engineering, aviation and transport. Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024, No. 6 (156), pp. 13–20.
3. Larin S.N., Bessmertnaya Yu.V. Hot forming of box-shaped material blanks under isothermal conditions. Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2024, No. 6 (156), pp. 21–28
4. Hertman K., Letsky E., Schafer V. Planning an experiment in the study of technological processes. Moscow, Izdatelstvo Mir, 1977, 552 p.
5. Finite element modeling of technological processes of forging and die forging: a textbook / [A.V. Vlasov et al.]: edited by A.V. Vlasov. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2019, 383 p.
6. Effect of thermal drilling modes for making holes in barely deformable materials exerted on tool wear. Zabelyan D.M., Burlakov I.A., Gordin D.E., Mangasaryan G.A., Gladkov Yu.A. Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2020, No. 1, pp. 83–90.
7. Evaluation of deformed, thermal and kinematic states of steel billets during three-high screw rolling. Romantsev B.A., Skripalenko M.M., Vorotnikov V.A., Skripalenko M.N., Yusupov V.S., Andreev V.A., Rogachev S.O., Kuprikov M.P., Hartwig A.A., Gladkov Yu.A. Steel. 2024, No. 6, pp. 11–15
8. Popov E.A. Fundamentals of sheet stamping theory. A textbook for universities. Moscow, «Mechanical Engineering», 1977, 278 p.
9. Rabochnov Yu.N. Mechanics of a deformable body. Moscow: Nauka, 1979, 744 p.
10. Demin V.A. Hot sheet stamping of bottoms. Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2023, No. 12 (150). pp. 9–14. 10.30987/2223-4608-2023-9-14

Статья поступила в редакцию 20.03.2025; одобрена после рецензирования 10.06.2025; принята к публикации 19.06.2025.

The article was submitted 20.03.2025; approved after reviewing 10.06.2025; assepted for publication 19.06.2025.