

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРЕССОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ QForm

Дорофеев А.С.

Донской государственной технической университет
Кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением»
Научный руководитель д.т.н., проф. Мороз Б.С.

Приведены результаты моделирования процессов горячего прессования прямым, обратным способами и прессования с активным действием сил трения с коэффициентами вытяжки 10. Установлено, что при расчете сил трения по формуле $F_t = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \cdot (1 - e^{-1.7(\sigma_m / \bar{\sigma})})$

программа с большой достоверностью рассчитывает течение металла в контейнере при прессовании прутков, напряженно-деформированное состояние заготовки, теплообмен между прессуемой заготовкой, контейнером и пресс-шайбой, отражает реальное соотношение полных сил деформирования и их составляющих.

Анализ опубликованных материалов позволяет отметить значительный прогресс в применении конечно-элементных программ DEFORM, MSC.SuperForge, LS-DYNA, LASTRAN/SHAPE, QForm, SPLEN, РАПИД и др. для моделирования различных технологических процессов обработки металлов давлением: объемной штамповки, вальцовки, выдавливания, листовой штамповки.

Прессование имеет такую же схему напряженно-деформированного состояния, как и выдавливание. Но в отличие от последнего ему характерен ряд особенностей: большие степени деформации; большие объемы заготовок; большие длины изделий; различные величины и направления сил трения, в том числе и максимальные значения при прессовании без смазки; различные варианты прессования сплошных и полых изделий; прессование из сплошного слитка полых изделий (форкамерные, камерные матрицы); прессование из полых слитков полых изделий (неподвижная, подвижная, свободно-подвижная иглы). Эти особенности, а также более узкая область процесса прессования в обработке давлением усложняют и удорожают решение задачи математического моделирования процесса. Однако в последнее десятилетие значительно возросло количество публикаций, в которых рассматривается возможность привлечения математического моделирования для анализа процесса прессования. Моделирование прессования осуществляют с помощью программ DEFORM, FORGE 2 и 3, HyperXtrude, Alma, QForm, SPLEN и др., базирующихся на методе конечных элементов (МКЭ). В большинстве работ при моделировании процесса принимаются заготовки небольшой длины ($L < 2D$), рассматривается лишь часть процесса, а также моделируется процесс с небольшими коэффициентами вытяжки [1].

Кафедра «МиТОМД» ДГТУ имеет программу QForm, предназначенную для моделирования процессов объемной штамповки. Целью настоящего исследования является оценка возможности применения программы QForm для моделирования различных способов прессования. Критериями оценки являлись: характер течения металла, силовые режимы деформации, распределение напряжений, интенсивности деформации и температур в прессуемой заготовке.

С целью получения большей информации о возможностях программы QForm в решении задач прессования и сравнения полученных результатов с экспериментом выполнено моделирование для трех способов: прямого (рис. 1, а), обратного (рис. 1, б) и прессования с активным действием сил трения (АДСТ) (рис. 1, в) [2].

Скорость перемещения заготовки относительно контейнера оценивалась кинематическим коэффициентом K_V [3]:

$$K_V = V_k / V_n,$$

где V_n и V_k – абсолютные скорости перемещения пресс-штемпеля и контейнера соответственно.

При прямом прессовании силы трения между заготовкой и контейнером направлены против движения пресс-штемпеля, при обратном прессовании они действуют только в очаге пластической деформации и направлены в сторону истечения металла [4], при прессовании с АДСТ – на всей поверхности контакта заготовки с контейнером и направлены также в сторону истечения металла [3].

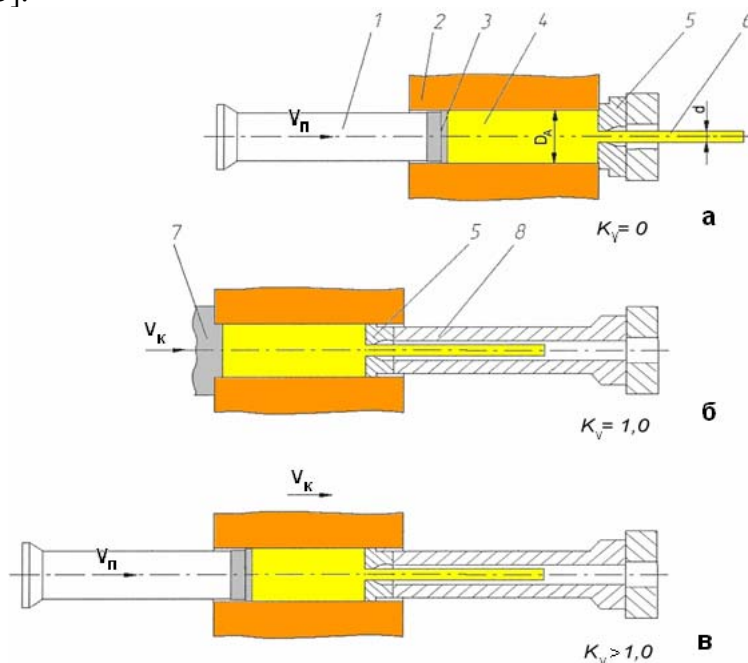


Рис. 1. Схемы прессования: а) прямое; б) обратное; в) с активным действием сил трения: 1 – пресс-штемпель; 2 – контейнер; 3 – пресс-шайба; 4 – заготовка; 5 – матрица; 6 – изделие; 7 – пробка; 8 – полый пресс-штемпель

Анализ обратного прессования и прессования с АДСТ выполнен в следующих условиях: материал заготовок – сплав Д16 (АА2024); диаметр контейнера $D_k=110$ мм; размеры заготовок $D \times L=107 \times 270$ мм; скорости прессования 2 и 3 мм/с; $K_v=1,0$ и $K_v=1,2$; коэффициент вытяжки $\lambda =10$. Моделирование прямого прессования проведено в условиях, приведенных в работе [5].

По данным, полученным методом линии скольжения [4], высота очага пластической деформации (ОПД) при прямом прессовании без смазки инструмента и заготовки (граничные условия на всех контактных поверхностях $\tau_k = 0,5\sigma_T$), $\lambda =10$ и плоской матрице составляет 80мм. Согласно данным, полученным моделированием, она равна примерно 76мм.

Деформированная координатная сетка (сетка Лагранжа) имеет характерные для прямого прессования зоны: пережим металла у пресс-шайбы, застойную (мертвую) зону у матрицы и зону интенсивных сдвигов в периферийной области заготовки.

Расчетный график изменения полной силы аналогичен известным [2,4]. Величина максимального усилия на 5% меньше рассчитанного в работе [5]. Программа позволила рассчитать составляющие полной силы, которые в учебной литературе не приводятся.

Накопленная деформация на оси заготовки по ходу процесса возрастает с 0,5 у входа в ОПД до 4,5 на входе в канал матрицы (в 9 раз) и с 9 до 18 (в 2 раза) в периферийной области прутка. Её величина и неравномерность возрастает в осевом и поперечном сечении прутка от начала к концу процесса и от оси прутка к его периферии, что согласуется с известными представлениями о процессе.

Сопротивление деформации в объёме заготовки вне ОПД незначительно растёт в

направлении от пресс-шайбы к матрице (с 40 до 48 МПа), т.е. напряженное состояние заготовки близко к однородному. На входе металла в ОПД его значения на оси заготовки растут с 45 МПа в начале процесса до 57 МПа в конце. В радиальном направлении их величины возрастают до 50 МПа в начале процесса и до 61 МПа в конце. В работе [5] сопротивление деформации в ОПД, рассчитанное для этих условий, составило примерно такую же величину - 56,3 МПа.

На основании приведенных результатов полученные моделированием данные о прямом прессовании можно считать достоверными.

Согласно данным Л. А. Шофмана высота ОПД при обратном прессовании из контейнера диаметром 110мм равна 33мм, по результатам моделирования – составила около 40мм.

Картина течения металла, полученная моделированием, типичная для обратного прессования: очаг деформации примыкает к матрице, а остальной объем заготовки остается практически недеформированным [2,4].

В отличие от известных представлений о процессе расчетом подтверждены данные работы [8], что $L/D > 2,0$ существенная часть процесса протекает при неполностью распрессованной в контейнере заготовке за счет значительной величины силы трения между заготовкой и контейнером (74%) и при малом усилии на пресс-шайбе (рис.2) [2]. С уменьшением длины заготовки сила трения уменьшается, но возрастает сила, воспринимаемая пресс-шайбой. Закономерность снижения силы и ее величина на этом этапе близки к результатам, полученным при моделировании прессования с АДСТ. В момент полной распрессовки заготовки ($L/D \approx 1,6$) сила трения резко падает и до конца процесса составляет примерно 15% полной силы. Это подтверждает известное положение [4]. Следует отметить, что выполненное моделирование обратного прессования позволило также получить составляющие полной силы и закономерность их изменения, которые практически отсутствуют в учебной и классической литературе.

Сопоставление результатов расчетных данных с экспериментом (рис. 3) показывает близкую качественную и количественную сходимость графиков полной силы обратного прессования: максимальная величина расчетной силы на 10% превышает данные эксперимента, что свидетельствует о близкой их сходимости.

Несмотря на активное действие сил трения на значительной части процесса и неполную распрессовку заготовки напряженное состояние ее вне ОПД практически неизменно: по оси заготовки сопротивление деформации до ОПД равно 70 МПа. После полной распрессовки заготовки его величина растет в направлении ОПД с 65 до 70 МПа. В ОПД по оси заготовки оно возрастает в направлении матрицы с 75 до 90 МПа и неизменно по ходу процесса. В радиальном направлении оно возрастает от 100 МПа в начале процесса до 105 МПа в конце.

Накопленная деформация по оси заготовки возрастает при АДСТ с 0,5 на входе в ОПД до 3,0 (в 6 раз) на выходе из него. После полной распрессовки заготовки в контейнере – с 1,0 до 2,5 (в 2,5 раза) соответственно. В периферийной области прутка она возрастает с 6,5 в начале процесса до 19 (почти в 3 раза) - в конце.

При прессовании с АДСТ высота ОПД составляет примерно 35мм ($\approx 0,3D_k$) и согласуется с опубликованными данными [3]. Объемный эффект активного действия сил трения при прессовании с $K_v = 1,2$ проявляется значительно в меньшей мере, чем при более высокой относительной скорости контейнера [3]. И тем не менее заметно изменение координатной сетки за счет действия активного трения по сравнению с обратным способом, т.е. программа учитывает изменение направления сил трения между заготовкой и контейнером.

Рассчитанные силовые параметры процесса и полученные экспериментом по величине сил и характеру их изменения по ходу процесса очень близки (рис 4,5). На рис. 4 более заметны скачки рассчитываемых значений сил, чем на рис. 2, что свидетельствует о необходимости установления причин их появления. Но, несмотря на это, расхождение расчетных и экспериментальных значений полной силы прессования не превышает 5%. Величина АДСТ достигает 80% полной силы, что меньше значения полученного в эксперименте на примерно на 10%. Значительная часть процесса (до $L/D \approx 1,1$) идет при неполной распрессовке заготовки в

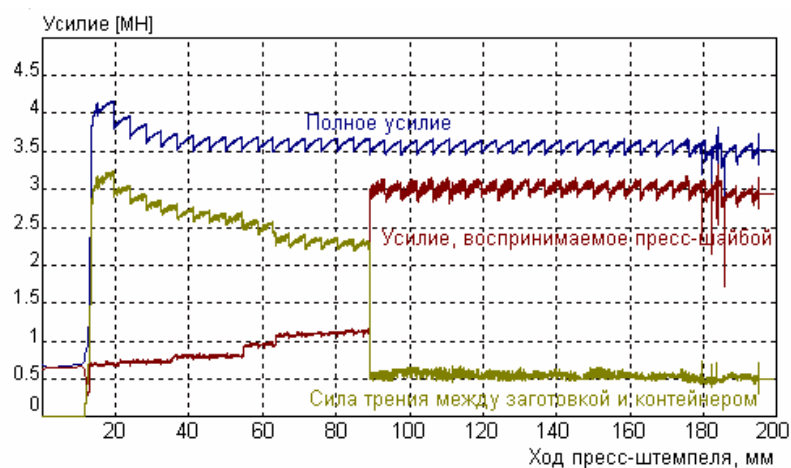


Рис. 2. График изменения усилий при обратном прессовании сплава AA2024 (данные расчета)



Рис. 3. График изменения усилий, температуры и скорости при обратном прессовании сплава AA2024 (эксперимент)

контейнере. Это согласуется с данными работы [7] о наличии критической поверхности контакта заготовки с контейнером, при превышении которой во время распрессовки заготовки невозможно начать процесс прессования с АДСТ в заданных скоростных условиях.

Из сравнения рис. 4 и 5 следует, что расчетные и экспериментальные величины сил и характер их изменения на этапе распрессовки заготовки несколько отличаются. Это объясняется тем, что при моделировании процесса скорости контейнера и пресс-штемпеля были неизменными, а в эксперименте распрессовку проводили в неподвижном контейнере.

Значения сопротивления деформации в объеме заготовки выше, чем при обратном прессовании. Вне ОПД они возрастают по ходу процесса на оси заготовки с 80 до 90 МПа, в ОПД - изменяются незначительно и составляют около 90 МПа, в радиальном направлении растут от 90 до 110 МПа и не изменяются по ходу процесса. Можно полагать, что это следствие активного действия сил трения в течение всего процесса. Характер распределения средних напряжений в заготовке аналогичен полученному методом визиопластичности [3].

Накопленная деформация по оси заготовки на входе в ОПД составляет 0,5 в начале процесса, 1,0 – в середине и 2,0 – в конце, что выше, чем при обратном прессовании. В периферийной части прутка она составляет соответственно 7, 11 и 16. Следовательно, активное действие трения повышает величину накопленной деформации в осевой области прутка и снижает её неравномерность в периферийной, что также согласуется с экспериментом [3].

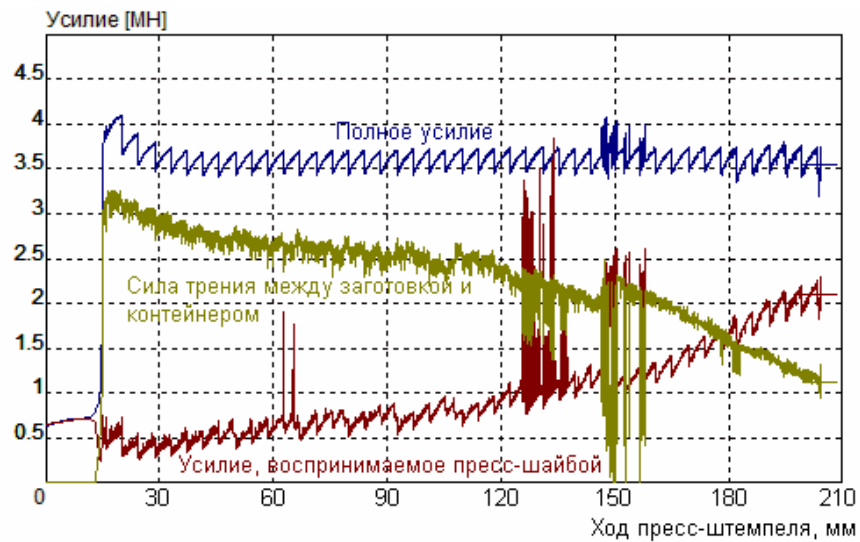


Рис. 4. График изменения усилий при прессовании с активным действием сил трения сплава AA2024 (данные расчета)

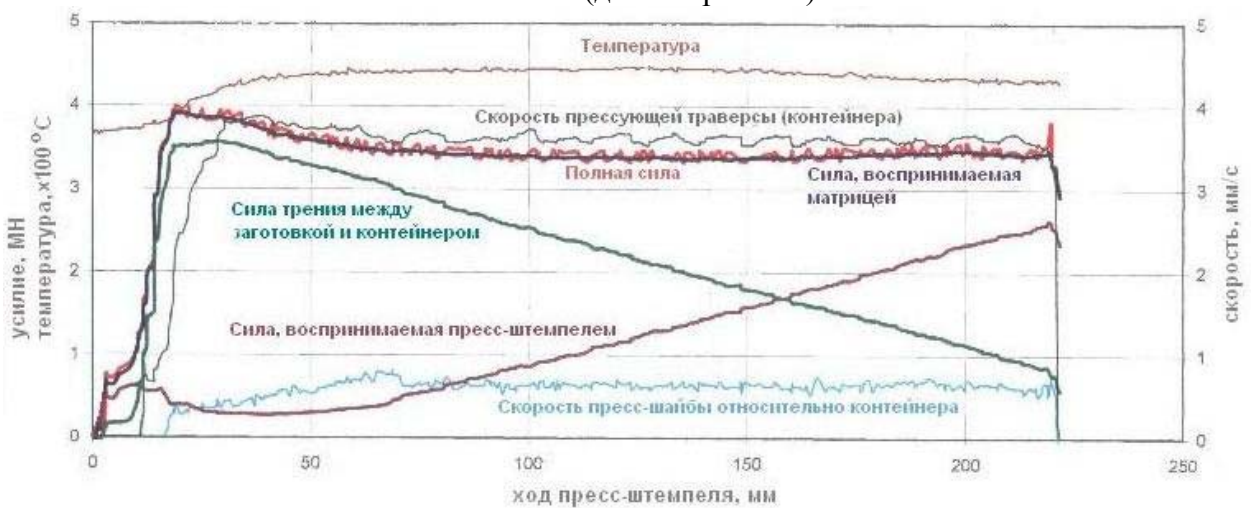


Рис. 5. График изменения усилий, температуры и скоростей инструмента при прессовании с АДСТ сплава AA2024 (эксперимент)

Закономерность изменения температуры в ОПД при моделировании прямого прессования приведена на рис. 6. Из него следует, что величина и закономерность изменения температур в ОПД в процессе прессования отличается от данных, приведенных в работе [5]. Это расхождение значений не превышает 2,5%. Максимальное изменение температуры металла у пояска матрицы, рассчитанное при моделировании прямого прессования прутка из сплава В95, составило 64°C, а полученное экспериментом - 90°C [5], что на 29% меньше.

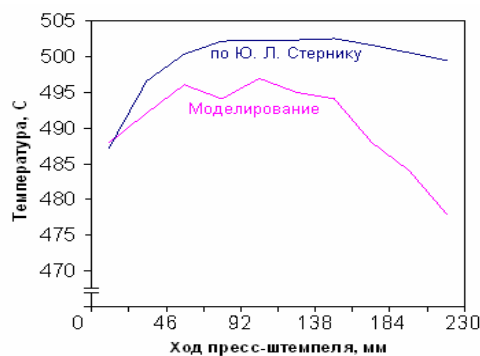


Рис. 6. Закономерности изменения температуры в ОПД при прямом прессовании сплава Д1

Расчет температуры заготовки с помощью программы QForm показывает, что повышение температуры при всех способах прессования происходит только в ОПД. Температура металла возрастает по мере приближения его к выходу из контейнера. Максимальные значения температур имеют место в области калибрующего пояса матрицы. Их величины составляют: для обратного прессования – 427 °С, при прессовании с АДСТ – 455 °С. Эти данные отличаются от экспериментальных (см. рис. 3 и 5) не более чем на 5 %. Следует отметить, что при всех расчетах в прутке после выхода его из канала матрицы наблюдается повышение температуры на 15-25%, что не соответствует действительности.

Таким образом, из приведенных результатов следует, что программа QForm позволяет получать достаточно достоверную информацию о течении, напряженно-деформированном состоянии металла, силовых параметрах прессования прутков с небольшими значениями коэффициента вытяжки.

Наряду с положительными результатами при моделировании прессования выявлены и проблемы:

1. Программа QForm 2D/3D не учитывает влияние направления сил трения на течение металла в контейнере.
2. Программы QForm не рассчитывают процессы прессования прутков и труб из заготовок длиной более полутора диаметров с коэффициентами вытяжки более 20.
3. При расчете температур максимальное их значение отмечается в прутке за пределами матрицы, что не соответствует действительности.
4. При моделировании прессования программа работает неустойчиво и не всегда позволяет рассчитать процесс до заданной величины пресс-остатка даже при небольших коэффициентах вытяжки.
5. Расчет процесса прессования требует большого времени счета.

Выводы

1. При всех рассмотренных способах прессования рассчитанные с помощью программы QForm течение металла, размеры очага пластической деформации и закономерность изменения полной силы прессования согласуются с известными теоретическими представлениями и результатами исследований, что позволяет использовать программу QForm с целью анализа напряженно-деформированного состояния металла при различных способах прессования прутков при небольших значениях коэффициента вытяжки.

2. Для моделирования процессов прессования профилей и труб различной сложности с реальными коэффициентами вытяжки необходима разработка специального пакета программ.

3. Использование программы при расчете прессования позволяет студентам более глубоко изучать особенности процесса.

Литература

1. Proceedings of the Eighth International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Orlando, Florida, May 18-21.-2004.-Vol. I.- P. 1-159, 209-285, 381-411.
2. Перлин И. Л., Райтбарг Л. Х. Теория прессования металлов.- М.: Metallurgia, 1975. – 447 с.
3. Бережной В. Л., Щерба В. Н., Батулин А. И. Прессование с активным действием сил трения.- М.: Metallurgia, 1988. – 296 с.
4. Шофман Л. А. Основы расчета процессов штамповки и прессования.- М.: Машгиз, 1965. – 440 с.
5. Стерник Ю. Л. Расчет температурного поля при прессовании. // Кузнечно-штамповочное производство.- 1966. - №7. С. 1-5.
6. Moroz V. S., Müller K. B., Berezovskij B. N. Simulation des Anfangsstadiums beim Strangpressen. Teil 1: Aluminium 76, 2000, № 11. - S. 898-907; Teil 2: №12. – S. 1060-1065.
7. Щерба В. Н., Данилин В. Н. Закономерности изменения напряжения трения при прессовании с подвижным контейнером. // Цветные металлы.- 1986. - №8. – С. 59 – 72.