

УДК 621.777.001.57

Мороз Б. С.  
Попов М. Е.  
Гоноченко С. В.

## ВОЗМОЖНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕССОВАНИЯ С УЧЕТОМ НАПРАВЛЕНИЯ СИЛ ТРЕНИЯ

Повышение конкурентоспособности продукции в настоящее время является важнейшей задачей всех отраслей промышленности. Прессование с активным действием сил трения (АДСТ) является одним из способов, позволяющих уменьшить неравномерность деформаций в получаемых изделиях из высокопрочных алюминиевых сплавов и повысить производительность оборудования [1], но к настоящему времени недостаточно используется в металлургии.

Несмотря на имеющиеся в литературе общие рекомендации по выбору режимов прессования с АДСТ, в ней имеется недостаточная информация об обосновании рационального выбора типоразмера пресса, размера заготовок, кинематических режимов прессования. Проведение дополнительных экспериментальных исследований на промышленном оборудовании требует высвобождения его из рабочего процесса, оснащения специальным устройством [2] и существенных материальных затрат. Поэтому целесообразно решение таких задач с привлечением математического моделирования.

Целью настоящего исследования является установление возможности математического моделирования прессования с активным действием сил трения (АДСТ) при различных значениях кинематического коэффициента  $K_V$  и диаметрах контейнера для определения оптимальных температурно-скоростных режимов прессования и области наиболее эффективного использования этого способа для получения изделий.

Для решения таких задач в обработке металлов давлением в большинстве случаев применяют специальные программы, основанные на методе конечных элементов и используемые в основном для моделирования процессов осуществляемых с невысокими степенями деформации.

В последние годы конечно-элементные программы все чаще применяют для решения отдельных задач прямого прессования профилей с целью уточнения формы и размеров элементов матриц, обеспечивающих получение качественных профилей заданных размеров и геометрической формы [3]. При выполнении расчетов из-за специфики процесса (большие степени деформации, большие объемы заготовок, сложные конфигурации поперечных сечений профилей, максимальные значения трения на поверхностях контакта заготовки с инструментом) ограничивают величину степени деформации, длину исходной заготовки, принимают допущение о независимости размеров очага деформации от длины прессуемой заготовки. Для выполнения таких расчетов также используют различные программные продукты, в том числе и предназначенные для анализа процессов объемной штамповки, т. к. схема напряженного состояния металла при выдавливании и прессовании в очаге пластической деформации одинакова – всестороннее неравномерное сжатие. Поэтому настоящее исследование проведено с помощью программы «QForm-2D» [4], позволившей получить достоверные результаты о характере течения металла в контейнере, его напряженном, температурном состоянии и силовых параметрах в зависимости от способа прессования [5–7] и получить новые сведения об особенностях обратного прессования [8, 9].

В работе [10] обобщены некоторые результаты экспериментов о характере течения металла в контейнере, силовых и скоростных показателях процесса прессования с АДСТ, проведенных в лабораторных условиях и на промышленных прессах силой 24,5 и 30,1 МН. В ней показано, что эффективность влияния АДСТ зависит не только от кинематических, температурно-скоростных условий прессования, но и от диаметра прессуемой заготовки. Установлено, что с увеличением коэффициента вытяжки снижается положительное влияние

АДСТ на деформированное состояние получаемых изделий, а наибольший эффект АДСТ проявляется при невысоких его значениях [1]. Поэтому и для сравнения результатов расчета с данными работы [10] в настоящем исследовании принят коэффициент вытяжки ( $\lambda$ ) равным 10.

Для моделирования процесса приняты размеры заготовок, которые обычно прессуют на промышленных прессах номинальной силой от 7,35 до 49 МН. Для возможности сравнения результатов расчета с данными прессования на прессе номинальной силой 8,32 МН [2] наименьший диаметр контейнера принят равным 110 мм.

Условия моделирования для принятых диаметров контейнера ( $D_K$ ) были одинаковыми: сплав Д16; диаметры заготовок  $D_3 = 107, 214$  и  $321$  мм;  $D_K = 110, 220$  и  $330$  мм; отношение длины заготовки к ее диаметру  $L_3/D_3 = 2$ ; температуры заготовок и контейнера –  $t_3 = 380$  °С,  $t_K = 350$  °С;  $K_V = 1,05; 1,2; 1,4$ ; скорость прессования составляла 3 мм/сек. Величина кинематического коэффициента ( $K_V$ ) определяется отношением скорости перемещения контейнера ( $V_K$ ) к скорости перемещения пресс-штемпеля ( $V_{II}$ ), т. е. относительная скорость перемещения контейнера и пресс-штемпеля в направлении истечения металла.

При моделировании были выполнены условия геометрического подобия линейных размеров, площадей и объемов заготовок, граничных и температурных условий, степени деформации, но скорость прессования во всех случаях принята одинаковой. Это позволило оценить возможность учета программой масштабного фактора.

Сравнение экспериментальной диаграммы процесса, проведенного на временно модернизированном гидравлическом прессе силой 8,32 МН (рис. 1, а) с расчетной диаграммой (рис. 1, б), показывает хорошую качественную и количественную сходимость полной силы прессования, силы трения между заготовкой и контейнером, силы воспринимаемой пресс-шайбой и закономерности их изменения по ходу процесса. Расчетные значения этих сил, полученные моделированием процесса при аналогичных условиях, превышают данные эксперимента менее чем на 10 %. Характер течения металла в контейнере в обоих случаях аналогичен [5]. Это дало основание считать, что программу «QForm-2D» можно использовать для выполнения остальных расчетов.

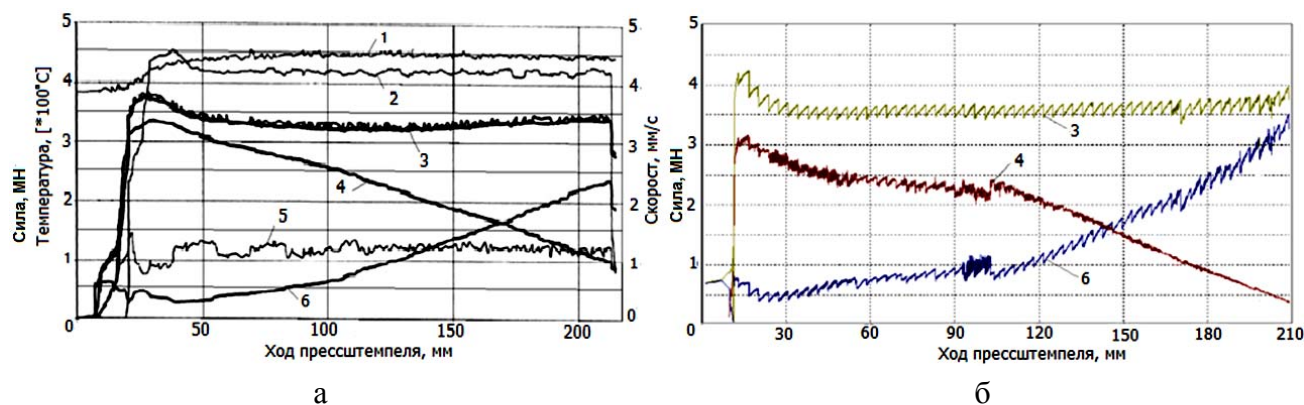


Рис. 1. Экспериментальная (а) и расчетная (б) диаграммы прессования с АДСТ заготовок из сплава 2024:

скорость прессования – 3 мм/с;  $K_V = 1,4$ ;  $L_3/D_K = 2,16$  (а); 1 – температура поверхности прутка в канале матрицы; 2 – скорость перемещения контейнера; 3 – полная сила прессования ( $P_{\Sigma}$ ); 4 – сила трения активного действия ( $T_A$ ) [5]; 5 – скорость перемещения пресс-шайбы в направлении, противоположном перемещению контейнера; 6 – сила, воспринимаемая пресс-шайбой

Диаграммы полных сил и их составляющих типичны для прессования с АДСТ заготовок длиной не более двух диаметров. На всех диаграммах имеют место: пик полной силы в начале истечения металла из канала матрицы и соответствующие ему максимальные значения силы активного трения и незначительная сила, воспринимаемая пресс-шайбой; постоянство полной силы прессования на квазистационарной стадии процесса; снижение активной силы трения и повышение силы воспринимаемой пресс-шайбой от начала к концу процесса.

Характер течения металла в контейнере во всех случаях также типичен для прессования в условиях АДСТ (рис. 2). Заметно, что влияние АДСТ на центральную часть заготовки с увеличением ее диаметра уменьшается, что согласуется с данными работы [10]. Искажение сеток увеличивается от начала к концу процесса, что свидетельствует о некоторой нестационарности процесса и согласуется с экспериментом [5]. Это подтверждает и величина накопленной деформации. В осевой части прутка во всех случаях прессования она достигает максимального значения уже в начале процесса и остается постоянной до конца процесса, а в периферийной части прутка она растет от начала к концу процесса, что объясняется увеличением сдвиговой деформации в этой области прутка и характерно для всех способов прессования. Но абсолютная величина сдвиговой деформации при рассматриваемом процессе ниже, чем при прямом и обратном прессовании.

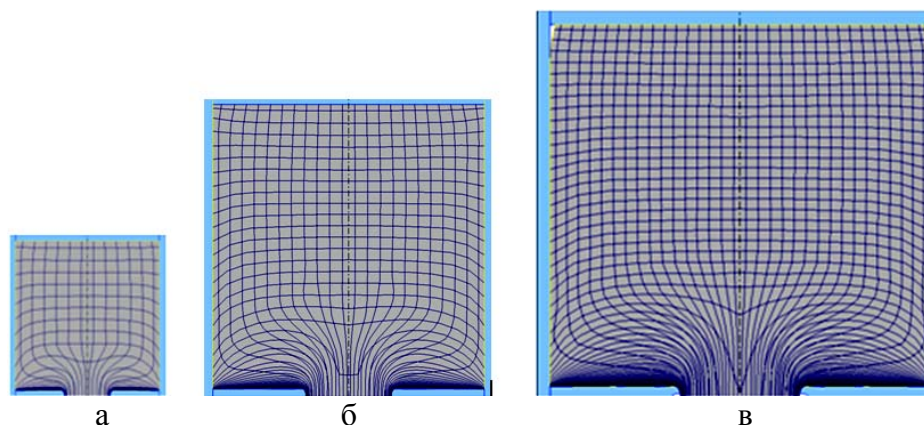


Рис. 2. Расчетные координатные сетки:

$K_V = 1,4$ ; а –  $D_K = 110$  мм; б –  $D_K = 220$  мм; в –  $D_K = 330$  мм

С увеличением кинематического коэффициента в заданных температурно-скоростных условиях прессования значения полной силы прессования, ее составляющих и их характер по ходу процесса существенно не изменяются. С увеличением диаметра заготовки все силы соответственно возрастают (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость исследуемых параметров прессования с АДСТ из контейнера диаметром 110, 220 и 330 мм

Диаметр контейнера, мм	$P_{\Sigma max}$ , МН	$T_{Amax}$ , МН	$T_A/P_{\Sigma}$ (max)	$P_{cc}$ , МН	$q_{cc}$ , МПа	$F_{K3}/W_3^*$	$T_{Amax}/F_{K3}^*$
110	4,1	3,05	0,76	3,6	379	1,0	1,0
220	15,8	11,8	0,75	13,5	355	0,50	0,98
330	34,0	25	0,74	28,0	328	0,33	0,96

\*Значения показателей получены делением их абсолютных значений на значения, относящиеся к диаметру контейнера, равного 110мм.  $P_{cc}$  – сила прессования на стационарной стадии.

Из приведенных в таблице данных следует, что с увеличением диаметра контейнера (следовательно, и прессуемой заготовки) возрастают максимальные значения полной силы прессования ( $P_{\Sigma max}$ ) и силы трения между заготовкой и контейнером ( $T_{Amax}$ ) и несколько снижется отношение  $T_{Amax}/P_{\Sigma max}$ . Но это снижение значительно меньше по сравнению с результатами лабораторных экспериментов при прессовании из контейнера диаметром 30 мм. Давление прессования ( $q_{cc}$ ) на стационарной стадии процесса с увеличением диаметра контейнера снижается, что обычно имеет место в процессах ОМД с увеличением размеров заготовок и также согласуется с данными работы [10].

С увеличением диаметра заготовки существенно снижается отношение площади поверхности контакта распрессованной заготовки с контейнером к ее объему ( $F_{K3}/W_3$ ), что приводит к меньшему влиянию АДСТ на объемное формоизменение заготовки при прессовании (см. рис. 1), но отношение ( $T_{Аmax}/F_{K3}$ ) – средняя величина напряжения сдвига при этом уменьшается несущественно. Последние данные можно объяснить невысокой скоростью деформирования, при которой с изменением объема очага пластической деформации скорость деформации и напряжение течения металла изменяются несущественно.

Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что конечно-элементная программа «QForm-2D» при небольших значениях коэффициента вытяжки достоверно отражает течение металла в контейнере в зависимости от стадии прессования при АДСТ, силовые характеристики процесса и напряженно-деформированное состояние прессуемой заготовки при увеличении диаметра контейнера, т. е. учитывает влияние масштабного фактора.

## ВЫВОДЫ

1. При прессовании с АДСТ конечно-элементная программа «QForm-2D» достоверно отражает основные параметры процесса с изменением кинематического коэффициента и размеров заготовок.

2. Полученные результаты дают основание считать возможным и целесообразным использовать программный комплекс «QForm-2D» для оптимизации прессования с АДСТ на основе моделирования процесса при невысоких коэффициентах вытяжки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бережной В. Л. Прессование с активным действием сил трения / В. Л. Бережной, В. Н. Щерба, А. И. Батулин. – М. : Металлургия, 1988. – 296 с.
2. Мороз Б. С. Оптимальный вариант модернизации оборудования для прессования с активным действием сил трения / Б. С. Мороз, К. Б. Мюллер // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2003. – № 4. – С. 42–48.
3. *Proceedings of the Eighth International Aluminum Extrusion Technology Seminar : May 18–21, 2004. – Orlando, Florida. – Vol. 1. – P.1–159, 209–295, 381–411.*
4. Стебунов С. А. QForm – программа, созданная для технологов / С. А. Стебунов, В. Н. Биба // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2004. – № 9. – С. 38–41.
5. *Results of an Investigation of Forward and Backward Extrusion with FEM Program QForm / B. Moroz, S. Stebunov, N. Biba, K. Mueller // Proceedings of the Eighth International Aluminum Extrusion Technology Seminar : May 18–21, 2004 : Orlando, Florida. – Vol. 1. – P. 285–292.*
6. Мороз Б. С. Некоторые результаты моделирования прессования с помощью конечно-элементной программы QForm // Совершенствование процессов и оборудования обработки металлов давлением в металлургии и машиностроении : тематич. сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2007. – С. 184–187.
7. Данилин В. Н. Моделирование течения металла и температурных полей при прессовании различными способами / В. Н. Данилин, М. А. Шаронов, Ф. В. Данилин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2006. – № 5. – С. 29–38.
8. Мороз Б. С. Численное моделирование обратного прессования / Б. С. Мороз, А. В. Быкодоров, Н. А. Андонян // Современные проблемы машиноведения и высоких технологий : тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию ДГТУ. – Ростов н/Д, 2005. – Т. 2. – С. 112–116.
9. Мороз Б. С. Некоторые особенности обратного прессования и возможность повышения его эффективности за счет трения активного действия / Б. С. Мороз // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 7. – С. 38–49.
10. Бережной В. Л. О некоторых возможностях влияния масштабного фактора на результаты прессования с активным трением / В. Л. Бережной, Б. С. Мороз, А. С. Пасхалов // Сб. статей. Обработка металлов давлением : РИСХМ : Ростов н/Д, 1979. – С. 141–147.

Мороз Б.С. – д-р техн. наук, проф. ДГТУ;  
Попов М. Е. – д-р техн. наук, проф. ДГТУ;  
Гоноченко С. В. – инженер ДГТУ.

ДГТУ – Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия.

E-mail: bmoroz@dstu.edu.ru