

14. Johnson G.R., Cook W.H. // Proc. 7-th Intern. Symp. on Ballistics. Hague, Netherlands, 1983. P. 541—547.
15. Zeng Z., Zhang Y., Jonsson S. // Mater. and Design. 2009. Vol. 30. P. 3105—3111.
16. Zeng Z., Jonsson S., Zhang Y. // Mater. Sci. Eng. A. 2009. Vol. 505. P. 116—119.
17. Zeng Z., Jonsson S., Roven H.J. // Acta Mater. 2009. Vol. 57. P. 5822—5833.
18. Nemat-Nasser S., Guo W.G., Cheng J.Y. // Ibid. 1999. Vol. 47. P. 3705—3720.
19. Satish V., Kailas Y.V., Prasad R.K., Biswas S.K. // Metal. Mater. Trans. A. 1994. Vol. 25A. P. 1425—1434.
20. Потапов И.Н. Технология винтовой прокатки. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Металлургия, 1990.
21. Wang M., Yang H., Sun Z.C., Guo L.G. // J. Mater. Proc. Technol. 2009. Vol. 209. P. 3384—3395.
22. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением М.: Металлургия, 2001.
23. Humphreys F., Hatherly M. Recrystallization and Related Annealing Phenom. 2-nd ed. Oxford: Elsevier, 2004.

УДК 621.771 : 669.716

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2013 г. И.Л. Константинов, И.Ю. Губанов, Ю.В. Горохов

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Проведено исследование возможности применения моделирования технологического процесса объемной изотермической штамповки поковок сложной формы из алюминиевого сплава AMg6 с помощью компьютерной программы DEFORM-3D. Для моделирования использовали следующие граничные условия. Скорость деформации составляла 0,03 мм/с, сопротивление деформации — 60 МПа, коэффициент трения — 0,1. Показано, что компьютерная модель корректно описывает реальный технологический процесс объемной изотермической штамповки, что позволяет рекомендовать эту программу для проектирования технологического процесса получения штампованных поковок сложной формы из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: моделирование, объемная изотермическая штамповка, скорость деформации, алюминиевые сплавы.

Isothermal bulk forming of AMg6 aluminum alloy blanks to produce irregular shape parts has been investigated with DEFORM-3D software. The following boundary conditions were used for the simulation: strain rate of 0.03 mm/s, strain resistance of 60 MPa, friction coefficient of 0.1. The computer model is shown to describe correctly real fabrication process of isothermal bulk forming, thus allowing us to recommend this program for designing the fabrication process to produce die forgings of irregular shape from aluminum alloys.

Key words: simulation, isothermal bulk forming, strain rate, aluminum alloys.

Получение штампованных поковок сложной формы из алюминиевых сплавов по традиционной технологии характеризуется большой трудоемкостью

и низким коэффициентом использования металла. Кроме того, этот технологический процесс требует создания больших усилий, особенно на за-

Константинов И.Л. – канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением СФУ (660025, г. Красноярск, пр. Красноярский рабочий, 95). Тел.: (391) 206-37-31. E-mail: ilcon@mail.ru.

Губанов И.Ю. – ст. преподаватель той же кафедры.

Горохов Ю.В. – канд. техн. наук, доцент той же кафедры.

ключительной стадии штамповки, когда происходит заполнение сложных элементов рельефа, таких как тонкие ребра, острые углы и т.д.

Известно [1], что деформируемость сплавов можно повысить использованием при штамповке режимов сверхпластичности (сочетание высокой температуры и низкой скорости деформации), и тогда ее называют объемной изотермической штамповкой. Последняя представляет собой процесс деформирования заготовок в штамповом инструменте, в ходе которого заготовка и инструмент нагреты до температуры горячей штамповки материала. Этот метод имеет ряд преимуществ перед традиционной горячей объемной штамповкой, которые заключаются в следующем:

- температура по сечению поковки распределяется равномерно;
- усилие деформирования уменьшается из-за меньшего значения скорости деформации и снижения контактного трения;
- пластичность материала повышается благодаря более полному протеканию процессов разупрочнения;
- деформации по объему распределяются равномерно;
- форма штампованной поковки максимально приближена к форме готовой детали.

Следует добавить, что штамповку алюминиевых сплавов в изотермических условиях обычно применяют для безуклонной штамповки, например: поковок поршней для двигателей внутреннего сгорания, дизельных двигателей, панелей с оребрением и пр. Полученные поковки характеризуются повышенной точностью размеров, а объем последующей механической обработки для изготовления из них деталей снижается на 25—30 %.

Ключевым моментом любого производства является рациональная разработка технологического процесса. Как правило, традиционные технологии проектирования позволяют получить результаты лишь через достаточно длительное время, проходя опробования и доводки. В настоящее время в обработке металлов давлением в этих целях активно используют компьютерное моделирование, которое значительно сокращает временные затраты. Например, при горячей объемной штамповке технолог может тщательно контролировать процесс, проследить за формоизменением материала, увидеть возможные дефекты (складки, зажимы, утяжины, незаполнения и пр.). Кроме того, появляется возможность

получить информацию о напряженно-деформированном состоянии заготовки, распределении температуры по ее объему, макро- и микроструктуре, напряжениях в инструменте, величине усилия деформирования и пр.

Цель данной статьи — исследование возможности применения компьютерного моделирования при разработке технологического процесса объемной изотермической штамповки поковки сложной формы на примере панели из сплава АМгб.

Для моделирования процессов пластического деформирования металлов в последнее время широко используются программы QFORM («КванторФорм», Россия) и DEFORM («Scientific Forming Technologies Corporation», США), которые основаны на методе конечных элементов. При подготовке данных для моделирования по этим программам необходимы сведения о сопротивлении деформации материала заготовки, характеристиках применяемой смазки, а также технических параметрах деформирующего оборудования.

Программа QFORM применяется для моделирования, анализа и оптимизации объемной штамповки и предназначена для технологов и конструкторов штампов. Она построена по принципу работы с технологическими цепочками. При этом все операции — от заготовительных (например, высадки, вальцовки и пр.) до непосредственно переходов штамповки и далее до обрезки облоя, калибровки и термообработки — моделируются с автоматической передачей данных, осуществляемой без участия пользователя. Программа успешно используется на заводах авиационного и энергетического машиностроения, например при изготовлении лопаток авиационных и энергетических турбин.

Программа DEFORM-3D, разработанная в 1993 г., также предназначена для анализа трехмерного течения металла при различных процессах обработки металлов давлением и является модулем специализированного программного комплекса DEFORM, позволяющего моделировать практически все процессы ОМД, а также термо- и механообработки. С ее помощью можно прогнозировать характер формоизменения металлов при обработке давлением, за счет чего существенно снижаются затраты на экспериментальное исследование. Эффективность применения DEFORM-3D при решении задач ОМД подтверждена многими исследователями как на промышленных предприятиях, так и в научно-исследовательских институтах и технических университе-

тах по всему миру. Это достигается за счет сочетания высокой универсальности программы при решении широкого круга технологических задач с возможностью использования различных видов движения инструмента, условий трения, моделей пластичности материала и реологических характеристик с простым и удобным в работе интерфейсом.

Автоматический генератор сеток программы DEFORM-3D позволяет создать сетку конечных элементов, размеры которых в отдельных частях модели будут различаться в зависимости от специфики анализируемого процесса, что значительно снижает объем поставленной задачи и требования к аппаратным средствам для ее решения. Важной особенностью DEFORM-3D является то, что пользователь может настраивать плотность сетки и соотношение размеров конечных элементов, работая в ручном режиме управления. Другим достоинством программы является возможность построения геометрических моделей заготовок и инструмента без посторонних CAD-систем. И наконец, программа DEFORM-3D кроме формоизменяющих операций позволяет моделировать разделительные операции и механообработку, т.е. проводить полный анализ металлообработки, начиная с раздела металла на заготовки и заканчивая окончательной механообработкой. Перечисленные характеристики программы DEFORM-3D и послужили основанием для ее использования в настоящей работе.

В качестве объекта для исследования был выбран технологический процесс изготовления штампованной поковки «стойка», описанный в работе [2]. На рис. 1 представлены ее чертеж и объемная модель, которая была построена с помощью пакета трехмерного проектирования Solidworks.

Покровку «стойка» можно отнести к одноплоскостным панелям, которые благодаря высоким конструкционным прочностям и надежности находят широкое применение в различных отраслях промышленности, например авиа- и приборостроении, строительстве и т.д. Причем максимальной жесткостью в сочетании с высоким коэффициентом использования металла обладают детали со сложным рельефом поверхности, элементами которого являются, например, высокие тонкие ребра.

Традиционная технология получения подобных деталей включает несколько операций штамповки, обрезку облоя, травление и т.д. Но даже многопереходность при горячей объемной штамповке не позволяет сформировать у штампованной поковки

тонкие ребра, и их получение осуществляют механической обработкой, что, естественно, увеличивает количество отходов и значительно повышает трудоемкость изготовления деталей.

В работе [2] для получения штампованной поковки «стойка» была использована объемная изотермическая штамповка в закрытом штампе, которая требует точной разделки на заготовки, а они, в свою очередь, могут иметь плоскую форму. Поэтому была разработана конструкция комбинированного штампа совмещенного действия, в котором на одной позиции производится операция вырубki, одновременно служащая для получения заготовки, и последующая штамповка. Его схема приведена на рис. 2.

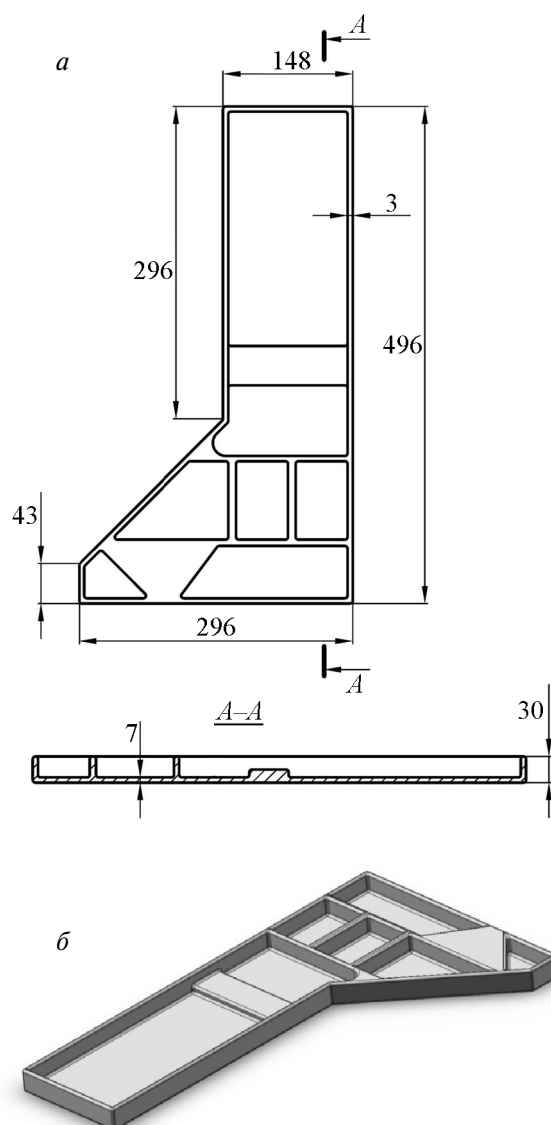


Рис. 1. Чертеж детали «стойка» (а) и трехмерная модель штампованной поковки для этой детали (б)

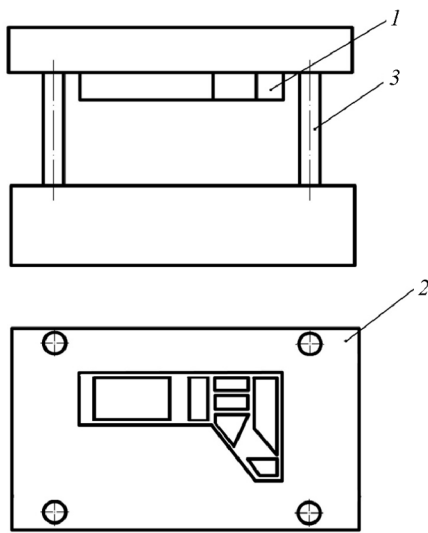


Рис. 2. Схема совмещенного штампа для изотермической штамповки

1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – направляющие колонки

Принцип работы штампа заключается в следующем. Плоскую заготовку, например толстый лист (плиту), помещают на матрицу. При смыкании штампа сначала происходит вырубка, после которой заготовка проваливается на дно матрицы, а затем при дальнейшем движении пуансон осуществляет вдавливание металла в гравюру матрицы. Таким образом, пуансон выполняет двойную функцию: сначала служит для вырубki, а затем для штамповки. Для поддержания постоянной температуры процесса штамп помещают в изотермический блок (на схеме не показан), устанавливаемый на стол прессы.

Так как в данном случае совмещены 2 операции — разделительная и формоизменяющая, то и компьютерная модель процесса была разделена на 2 стадии, которые последовательно моделировались в пакете DEFORM-3D. На рис. 3 представлены компьютерные модели штампа и выполняемых на нем операций вырубki и штамповки.

Для моделирования были выбраны режимы штамповки, использованные в работе [2]. Скорость деформирования составляла 0,03 мм/с, что для этой поковки соответствует интервалу скоростей деформации $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \div 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Температура нагрева заготовки была 420 °С, при которой сопротивление деформации равнялось 60 МПа. Учитывая низкую скорость деформации и то, что данный температурный режим для сплава АМгб соответствует горячей деформации, было принято, что упрочнения материала при деформации не происходит. И наконец, коэффициент трения, как и в работе [2], составлял 0,1.

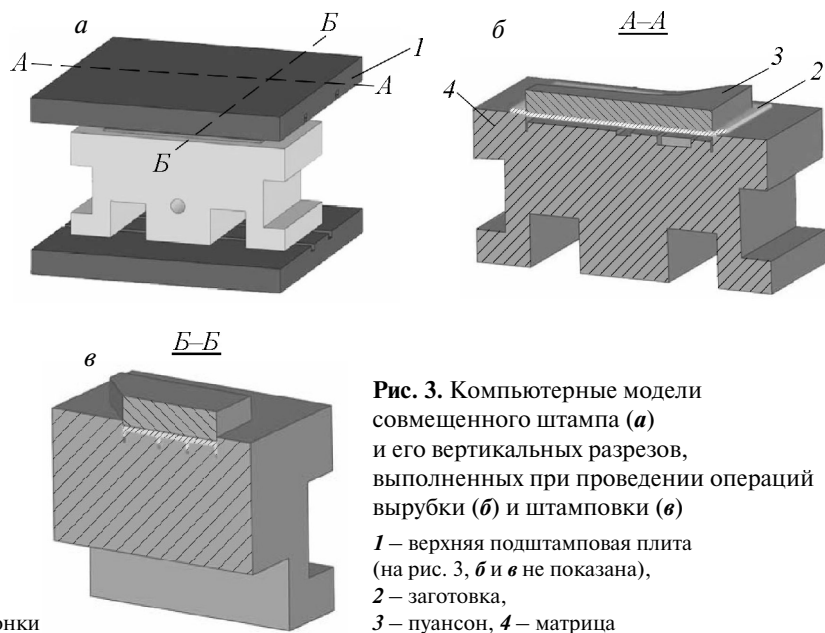


Рис. 3. Компьютерные модели совмещенного штампа (а) и его вертикальных разрезов, выполненных при проведении операций вырубki (б) и штамповки (в)

1 – верхняя подштамповая плита (на рис. 3, б и в не показана), 2 – заготовка, 3 – пуансон, 4 – матрица

Программа позволила поэтапно проследить формоизменение заготовки. На рис. 4, а показана форма поковки после деформирования в течение времени $\tau = 92 \text{ с}$ (усилие штамповки в этот момент составляло $P_{\text{ш}} = 13,1 \text{ МН}$), а рис. 4, б иллюстрирует полное оформление гравюры штампа на заключительной стадии штамповки ($\tau = 120 \text{ с}$ и $P_{\text{ш}} = 19,8 \text{ МН}$).

На рис. 5 приведена зависимость усилия прессы от времени в процессе штамповки. Из графика следует, что оформлению таких элементов, как тонкие ребра, углы и т.д. (приблизительно после деформирования более 100 с), соответствует резкое повышение усилия прессы. По-видимому, на этой стадии штамповки деформирование следует проводить при

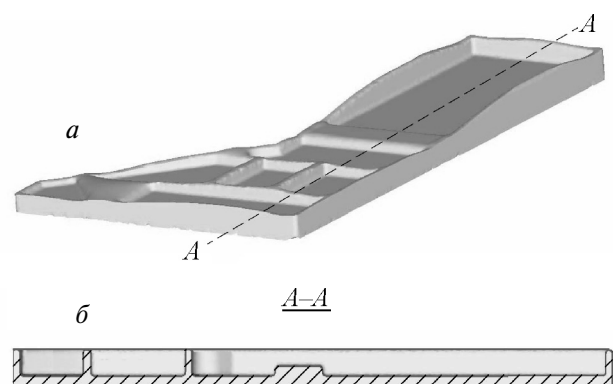


Рис. 4. Формоизменение поковки в процессе деформирования (а) и на заключительной стадии штамповки (б) а – $\tau = 92 \text{ с}$ и $P_{\text{ш}} = 13,1 \text{ МН}$, б – 120 с и $19,8 \text{ МН}$

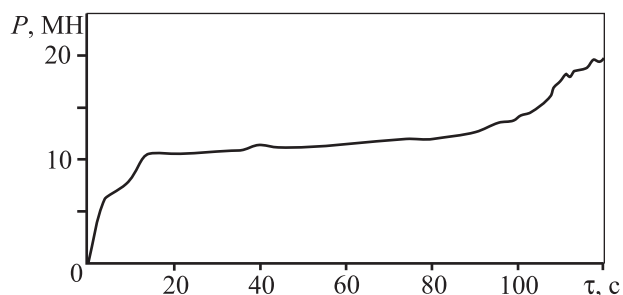


Рис. 5. Изменение усилия пресса во времени при штамповке

пониженных значениях $\dot{\epsilon}$, отвечающих оптимальному интервалу скорости сверхпластической деформации. Однако в промышленных штамповочных прессах они не попадают в диапазон скоростей рабочего хода пресса. Поэтому для снижения величины $\dot{\epsilon}$ целесообразно использовать такой прием, как остановка рабочего хода пресса и выдержка при постоянном давлении до полного оформления рельефа. Это важно особенно тогда, когда требуемое для полного заполнения штампа усилие приближается к номинальному усилию используемого пресса, как, например, в нашем случае, описанном выше, где применялся пресс с номинальным усилием 20 МН.

Программа позволяет также показывать в динамике картину изменения таких параметров про-

цесса, как интенсивность скоростей и деформаций, распределение скоростей деформации и температуры по объему поковки и т.д., что также очень важно для своевременной корректировки технологического процесса штамповки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что компьютерная программа DEFORM-3D корректно описывает реальный технологический процесс объемной изотермической штамповки алюминиевого сплава АМгб, что позволяет рекомендовать ее для проектирования технологий получения штампованных поковок сложной формы из алюминиевых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии (Синергетика: от прошлого к будущему). М.: КомКнига, 2005.
2. Константинов И.Л., Белокопытов В.И., Горохов Ю.В., Катрюк В.П. // Сб. матер. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. / Под ред. В.Е. Кислякова. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. Ч. 2. С. 221.

УДК 669.715

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ЛИТОГО СПЛАВА Al-0,55 мас.% Zr

© 2013 г. Н.А. Белов, А.Н. Алабин, А.А. Яковлев

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

С использованием программы Thermo-Calc изучено влияние температуры на фазовый состав литого алюминиевого сплава, содержащего 0,55 % Zr, 0,23 % Fe и 0,06 % Si, с целью обоснования оптимальных режимов отжига. Определен фазовый состав и рассчитаны равновесные значения состава алюминиевого твердого раствора в сплаве Al-0,55%Zr-0,23%Fe-0,06%Si при $t = 200 \div 650$ °С. Показано, что при использовании многоступенчатого отжига максимальные значения твердости и электропроводности достигаются при $t = 400 \div 450$ °С.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, термическая обработка, электропроводность, фазовый состав.

Белов Н. А. – докт. техн. наук, директор ИЦ «ИЛТМ» НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, В-49, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (495) 951-19-28. E-mail: nikolay-belov@yandex.ru.

Алабин А. Н. – канд. техн. наук, начальник отдела стратегических исследований ИЦ «ИЛТМ» НИТУ «МИСиС». E-mail: alex_alabin@mail.ru

Яковлев А. А. – магистрант кафедры технологии литейных процессов НИТУ «МИСиС». E-mail: yakovlevalexandr@mail.ru.