

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ШТАМПОВАННОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ СПЛАВА АК4-1 ДЛЯ ПОРШНЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

© 2020 г. **И.Л. Константинов, Д.Г. Потапов, С.Б. Сидельников, Д.С. Ворошилов,
Ю.В. Горохов, В.П. Катрюк**

Сибирский федеральный университет (СФУ), г. Красноярск, Россия

ООО «Красноярский металлургический завод», г. Красноярск, Россия

Статья поступила в редакцию 05.03.20 г., доработана 10.07.20 г., подписана в печать 17.07.20 г.

Аннотация: Проведено моделирование процесса горячей объемной штамповки поковки из алюминиевого сплава АК4-1 для поршня двигателя внутреннего сгорания (ДВС) беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с помощью программного комплекса Deform-3D. Объектом исследований служил поршень ДВС, устанавливаемый на один из типов БПЛА российского производства. При моделировании использовались следующие параметры: температура оснастки и заготовки составляла 450 °С, скорость движения пуансона – 5 мм/с, показатель трения по Зибелю – 0,4. В качестве модели материала была выбрана жесткопластическая среда. Количество элементов (6000) было выбрано таким образом, чтобы в наименьшем сечении поковки их умещалось не менее 3. На примере штампованной поковки поршня показано, что с помощью компьютерного моделирования с использованием программы Deform-3D можно разрабатывать технологию горячей объемной штамповки заготовок из алюминиевых сплавов для изготовления поршней для ДВС БПЛА. При этом компьютерное моделирование позволяет произвести оценку энергосиловых параметров процесса горячей объемной штамповки, изучить характер деформации заготовки при штамповке, внести необходимые корректировки в виртуальный технологический процесс, а также разработать конструкцию штампового инструмента, что дает возможность при проектировании реального процесса подобрать наиболее эффективные технологические решения. Изложенная методика компьютерного моделирования может быть рекомендована для анализа и проектирования технологии изготовления других штампованных поволок из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: горячая объемная штамповка, алюминиевые сплавы, компьютерное моделирование, Deform-3D, штамп, поршень двигателя внутреннего сгорания.

Константинов И.Л. – канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением (ОМД) СФУ (660025, г. Красноярск, пр-т им. газеты «Красноярский рабочий», 95). E-mail: ilcon@mail.ru.

Потапов Д.Г. – специалист отдела главного технолога ООО «Красноярский металлургический завод» (660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 42). E-mail: potap_tuz@mail.ru.

Сидельников С.Б. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой ОМД СФУ. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Ворошилов Д.С. – канд. техн. наук, доцент кафедры ОМД СФУ. E-mail: sibdrug@mail.ru.

Горохов Ю.В. – докт. техн. наук, профессор кафедры ОМД СФУ. E-mail: 160949@list.ru.

Катрюк В.П. – ст. преподаватель кафедры общей металлургии СФУ. E-mail: vkatryuk@sfu-kras.ru.

Для цитирования: Константинов И.Л., Потапов Д.Г., Сидельников С.Б., Ворошилов Д.С., Горохов Ю.В., Катрюк В.П. Компьютерное моделирование процесса получения штампованной заготовки из сплава АК4-1 для поршня двигателя внутреннего сгорания. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2020. No. 6. С. 24–31. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-6-24-31.

Computer simulation of the technology for AK4-1 alloy die forging production for an internal combustion engine piston

I.L. Konstantinov, D.G. Potapov, S.B. Sidelnikov, D.S. Voroshilov, Yu.V. Gorokhov, V.P. Katryuk

Siberian Federal University (SibFU), Krasnoyarsk, Russia

LLC «Krasnoyarskii metallurgicheskii zavod», Krasnoyarsk, Russia

Received 05.03.2020, revised 10.07.2020, accepted for publication 17.07.2020

Abstract: The process of hot die forging of AK4-1 aluminum alloy billets for the piston of an internal combustion engine (ICE) for an unmanned aerial vehicle (UAV) was simulated using the Deform-3D software package. The object of research was an ICE piston mounted on one

of the UAV types of Russian production. Simulation was performed using the following parameters: tooling and billet temperature was 450 °C, ambient temperature was 20 °C, punch speed was 5 mm/s, and Siebel friction index was 0.4. Rigid plastic medium was chosen as a material model. The number of elements (6000) was selected so that at least 3 elements fit in the narrowest section of the part. Thus, as illustrated by the piston die forging, computer simulation in the Deform-3D software makes it possible to develop hot die forging processes for making aluminum alloy billets for UAV ICE pistons. At the same time, computer simulation can be used to evaluate the power parameters of the hot die forging process, study the nature of billet forming in die forging, make necessary adjustments to the virtual process, and develop the design of a die forging tool in order to select the most effective process solutions when designing a real process. The described computer simulation technique can be extended to other aluminum alloy die forgings.

Keywords: hot die forging, aluminum alloys, computer simulation, Deform-3D, die set, internal combustion engine piston.

Konstantinov I.L. – Cand. Sci. (Eng.), Assistant prof., Department of metal forming, Siberian Federal University (SibFU) (660025, Russia, Krasnoyarsk, pr. Krasnoyarskiy rabochiy, 95). E-mail: ilcon@mail.ru.

Potapov D.G. – Specialist of the Chief technologist department, LLC «Krasnoyarskii metallurgicheskii zavod» (660111, Russia, Krasnoyarsk, Pogranichnikov str., 42). E-mail: potap_tuz@mail.ru.

Sidelnikov S.B. – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of metal forming, SibFU. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Voroshilov D.S. – Cand. Sci. (Eng.), Assistant prof., Department of metal forming, SibFU. E-mail: sibdrug@mail.ru.

Gorokhov Yu.V. – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of metal forming, SibFU. E-mail: 160949@list.ru.

Katryuk V.P. – Senior lecturer, Department of common metallurgy, SibFU. E-mail: vkatryuk@sfu-kras.ru.

For citation: Konstantinov I.L., Potapov D.G., Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Gorokhov Yu.V., Katryuk V.P. Computer simulation of the technology for AK4-1 alloy die forging production for an internal combustion engine piston. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2020. No. 6. P. 24–31 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2020-6-24-31.

Введение

В последнее время трудно назвать сферы человеческой деятельности, которые бы не применяли или не планировали использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В перечень отраслей, решающих свои задачи с помощью этих устройств, входят аэрофотосъемка, геологоразведка, управление городским хозяйством, доставка грузов, мониторинг различных объектов, охрана природы, сельское хозяйство, реклама, спасательные работы и т.д. [1].

Важной частью БПЛА является его двигатель. Для наиболее сложных задач на беспилотники устанавливаются двигатели внутреннего сгорания (ДВС), обеспечивающие эти устройства высокой надежностью. Недостаточное количество отечественных авиадвигателей малой мощности вынуждает российских разработчиков БПЛА использовать импортную продукцию или самостоятельно создавать аналоги. Одной из самых ответственных деталей ДВС является поршень, разработка и изготовление которого для БПЛА является сложной задачей, так как комплекс свойств, которыми должна обладать эта деталь, трудно получить для металлических материалов.

При эксплуатации к поршню ДВС предъявляются следующие основные требования:

- функционировать при высоких температурах и давлениях газов в сочетании с надежным уплотнением канала цилиндра двигателя;
- отвечать требованиям пары трения ци-

линдр—поршень при минимуме механических потерь и износа контактных поверхностей;

- выдерживать механическое воздействие от нагрузки со стороны камеры сгорания и реакции от шатуна;

- минимально нагружать кривошипно-шатунный механизм инерционными силами при возвратно-поступательном движении с высокой скоростью.

Учитывая, что идеальный поршень должен быть легким и абсолютно жестким, а испытываемые им нагрузки не должны его деформировать, то аналогичные требования предъявляются к его материалам [2, 3].

Для изготовления поршней ДВС чаще всего применяются алюминиевые сплавы, обладающие низкой плотностью, высокой теплопроводностью, хорошими антифрикционными свойствами, а также малыми значениями коэффициента трения в паре с чугунными или стальными гильзами. Поршни отечественного производства обычно вытачивают из литых заготовок алюминиевого сплава АК12, относящегося к силуминам и характеризующегося хорошей коррозионной стойкостью, а также повышенным уровнем литейных и механических свойств.

Хотя литейное производство и является самым распространенным способом изготовления поршней ДВС, однако оно имеет ряд серьезных недостатков, главным из которых является круп-

нозернистая структура материала, вызывающая резкое снижение механических свойств, а также способствующая появлению литейных дефектов, таких как поры, трещины, шлаковые включения и т.д. Перечисленные дефекты способны привести к разрушению поршня, что выведет из строя всю камеру сгорания двигателя, не говоря о том, что БПЛА с неисправным двигателем упадет и разрушится, что приведет к большим финансовым потерям. Кроме того, отливка поршней характеризуется невысоким коэффициентом использования металла из-за необходимости закладывать большую часть металла на литниково-питательную систему и припуски под механическую обработку.

Из сказанного следует, что поршень ДВС БПЛА целесообразно изготавливать способом, лишенным многих недостатков литейного производства, например горячей объемной штамповкой. При этом, согласно результатам работ [4–12], наиболее подходящим видом штамповки для изготовления заготовок поршня ДВС из алюминиевого сплава следует считать объемную изотермическую штамповку в закрытом штампе. Этот вид горячей обработки давлением позволяет получать сложные по конфигурации штампованные поковки с высокой точностью размеров, как правило, за один переход. Штампованные заготовки отличает высокий уровень механических свойств, а сам процесс характеризуется высокими значениями коэффициента использования металла.

Однако процедура разработки технологического процесса горячей объемной штамповки сложнее, чем технологии литья. В первую очередь это объясняется тем, что при штамповке необходимо создать условия для заполнения полости ручьев штампа в твердом состоянии пластическим течением, в отличие от заполнения литейной формы жидким металлом. В ряде работ показано [13–22], что для разработки технологии объемной изотермической штамповки эффективно использование компьютерного моделирования, которое позволяет решить следующие основные задачи:

- создать чертеж штампованной поковки, максимально приближенной по форме и размерам к получаемой детали;
- выбрать схему штамповки и спроектировать штамповый инструмент;
- определить энергосиловые параметры процесса штамповки и изучить особенности формоизменения заготовки при деформировании.

Целью настоящей работы являлось компьютерное моделирование технологии горячей объемной штамповки заготовки поршня ДВС для БПЛА из сплава АК4-1. Для ее достижения решали следующие задачи:

- выполнить компьютерное моделирование технологического процесса горячей объемной штамповки поковки поршня;
- разработать конструкцию штампового инструмента;
- провести оценку энергосиловых параметров процесса горячей объемной штамповки;
- изучить характер формоизменения заготовки при штамповке.

Методика проведения исследований

Материалом для поршня ДВС БПЛА был выбран алюминиевый жаропрочный термически упрочняемый сплав АК4-1, который хорошо деформируется в горячем состоянии, обладает низким коэффициентом термического расширения. Поэтому его применяют для деталей двигателей, работающих при высоких температурах, в том числе и поршней. Химический состав сплава АК4-1 согласно ГОСТ 4784-97 приведен ниже, мас. %:

Al.....	Основа	Cu.....	1,9–2,7
Fe.....	0,8–1,4	Ni.....	0,8–1,4
Si.....	0,35	Mg.....	1,2–1,8
Mn.....	0,2	Zn.....	0,3
Ti.....	0,02–0,1	Примеси.....	0,1

В качестве объекта компьютерного моделирования был выбран поршень ДВС, устанавливаемый на один из типов БПЛА российского производства. Чертеж поршня и его внешний вид в виде компьютерной модели представлены на рис. 1.

Для компьютерного моделирования использовали программу SolidWorks и программный комплекс Deform-3D. Учитывая, что в базе данных программы Deform-3D отсутствует сплав АК4-1, то для расчетов из источника [22] в ручном режиме вводились реологические свойства отечественного сплава АК6, также широко применяемого для изготовления поршней ДВС и близкого по своим механическим свойствам к сплаву АК4-1.

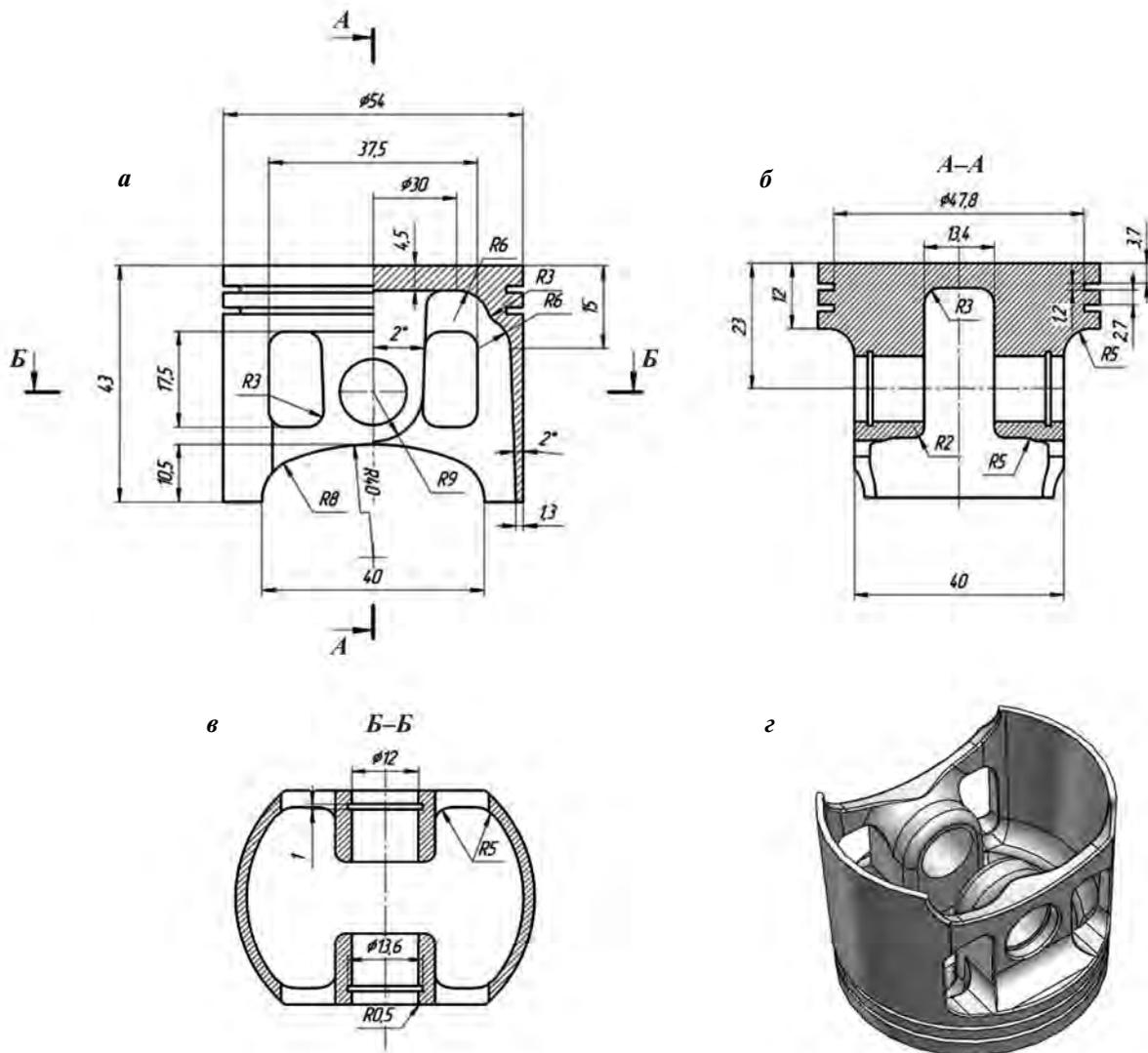


Рис. 1. Чертеж поршня ДВС для БПЛА (а–г) и его компьютерная модель (г)
 Fig. 1. Drawing of ICE piston for UAV (a–g) and its computer model (g)

Результаты и их обсуждение

При проектировании штампованной поковки учитывалось, что необходимость ее обработки зависит от требований к чистоте в определенном месте и сложности поверхности. Например, обрабатывать внутренние и внешние поверхности сферической формы очень сложно и трудоемко, поэтому их обычно стараются сразу получить в штампе без последующей механической обработки детали.

В поршне сложной поверхностью, трудно поддающейся механической обработке, является его внутренняя полость, которую будет формировать пуансон, следовательно, припуск на ее размеры не назначался.

Для упрощения конфигурации штамповки был назначен напуск металла на боковые плоскости наружной поверхности поршня, без которого форма поковки значительно усложнится, а штамповый инструмент для ее оформления будет иметь дополнительные концентраторы напряжений, что неизбежно приведет к уменьшению срока его эксплуатации. Было предположено, что отходы металла при механической обработке в данном случае приведут к меньшим потерям, чем затраты на изготовление вышедшего из строя инструмента. Чертеж штампованной поковки «поршень» представлен на рис. 2.

Для штамповки поршня в качестве заготовки был выбран полуфабрикат в виде прессованного

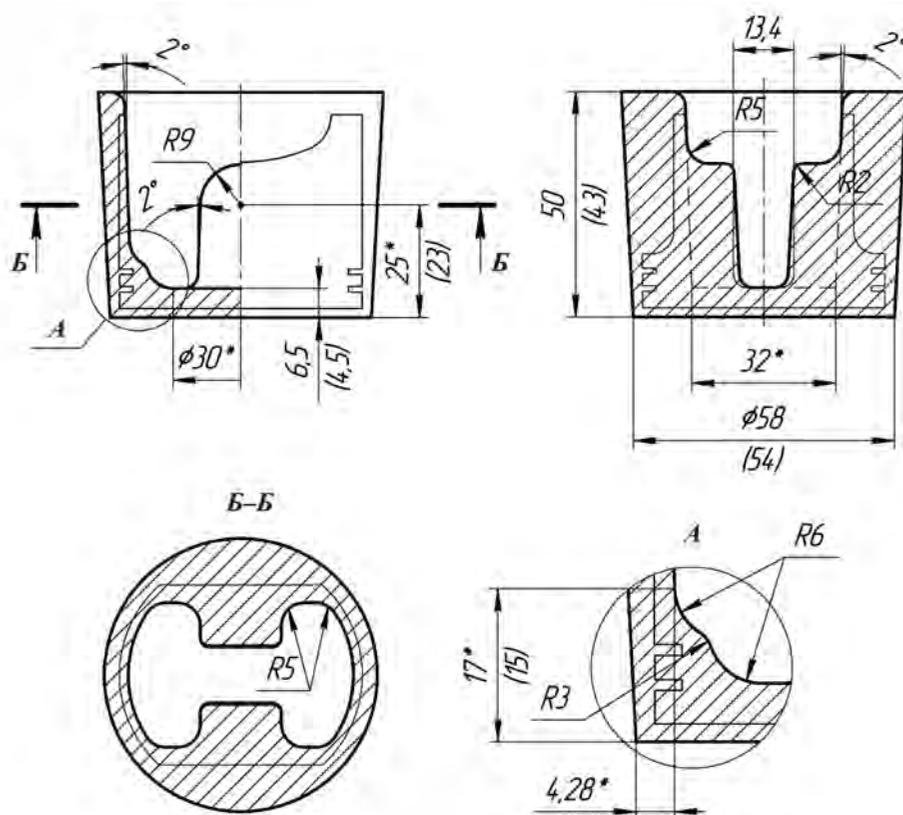


Рис. 2. Чертеж штампованной поковки «поршень» из сплава АК4-1

Размеры, отмеченные *, являются справочными, служат для построения чертежа штампованной поковки и не подлежат технологическому контролю. Размеры в скобках относятся к чистой детали

Fig. 2. Drawing of «piston» die forging made of AK4-1 alloy

Dimensions marked by * are given for reference. They are used to draw a die forging and not subject to in-process inspection. Dimensions in brackets refer to a finished part

прутка круглого сечения. После этого с помощью компьютерной программы SolidWorks сначала создавали трехмерные модели штампованной поковки «поршень», а затем и закрытого штампа, после чего их загружали в препроцессор компьютерной вычислительной системы Deform-3D в виде файлов формата stl. На рис. 3 представлены сборочный чертеж и модели деталей штампа и заготовки.

После этого вводили температурные, скоростные и силовые режимы штамповки. Температура оснастки и заготовки составляла 450 °С, а окружающей среды — 20 °С, скорость движения пуансона — 5 мм/с, показатель трения по Зибелю — 0,4. В качестве модели материала была выбрана жесткопластическая среда. Количество элементов было назначено таким образом, чтобы в самом узком сечении детали умещалось не менее 3 элементов. В случае с моделированием штамповки поршня было выбрано 6000 элементов, учитывая небольшие габариты поковки. После задания всех параметров

формировалась база данных и проводился расчет формоизменения металла и силы (*P*) процесса штамповки.

На рис. 4 представлена модель формоизменения заготовки, соответствующая 139-му шагу расчета.

Анализ распределения температуры металла по объему поковки (рис. 5) показал, что ее максимальное значение при деформации достигает 466 °С, что не превышает максимально допустимое для данного сплава значение, а следовательно, перегрев металла при штамповке отсутствует и условия нагрева заготовки выбраны правильно.

В результате моделирования также были рассчитаны силовые параметры процесса штамповки (рис. 6). Для поэтапной иллюстрации переходов на рисунке также показано изменение формы заготовки в ходе штамповки. На графике видно, что максимальная сила при штамповке составила 0,38–0,4 МН. На основании этих данных можно выбрать оборудование, прибавив запас порядка

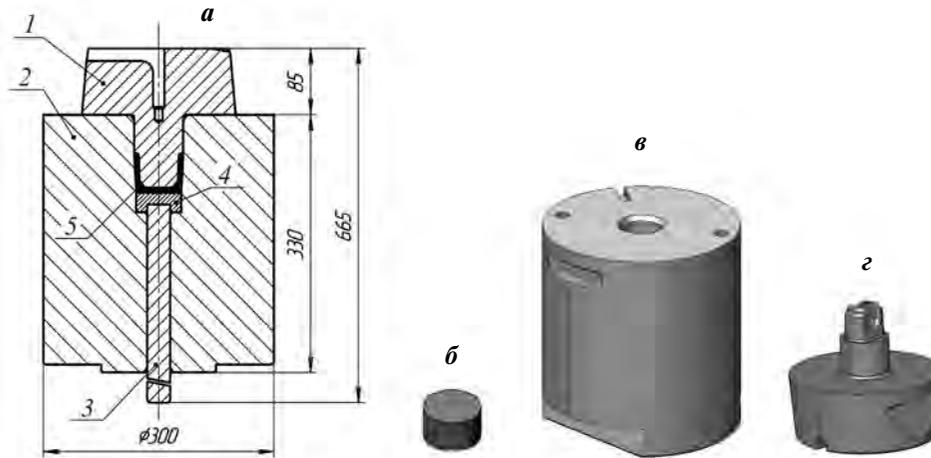


Рис. 3. Сборочный чертеж штампа (а) и модели заготовки (б), матрицы (в) и пуансона (z)

1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – выталкиватель, 4 – шайба выталкивателя, 5 – поковка

Fig. 3. Assembly drawing of die (a) and billet model (б), die (в) and punch (z)

1 – punch, 2 – die, 3 – ejector, 4 – ejector washer, 5 – forging

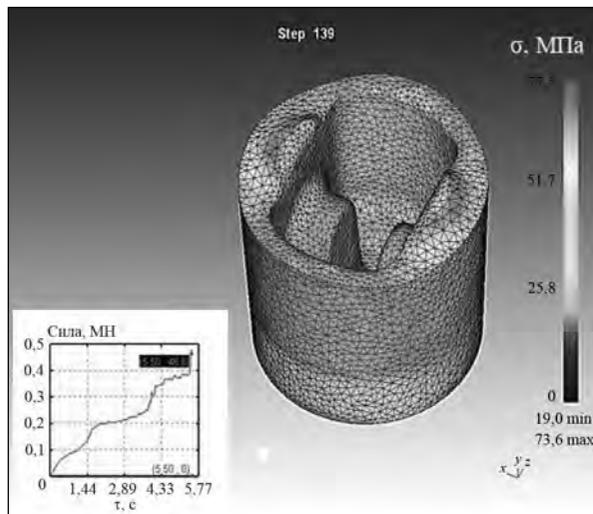


Рис. 4. Моделирование формоизменения металла в программе Deform-3D с распределением напряжений по объему заготовки

Fig. 4. Metal forming simulation in Deform-3D software with stress distribution over the billet volume

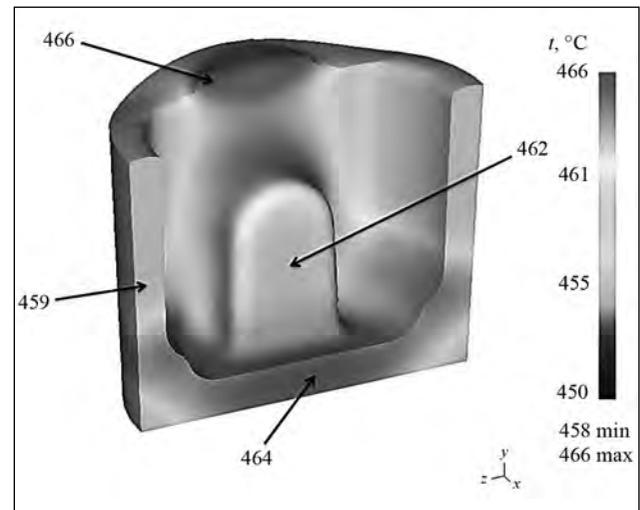


Рис. 5. Распределение температуры по объему металла поковки

Fig. 5. Temperature distribution over the forging metal

25 %. Следовательно, для штамповки поршня ДВС БПЛА в изотермических условиях подойдет пресс с усилием 0,5 МН и более.

Оборудованием для изотермической штамповки обычно служат гидравлические прессы, у которых скорость штамповки можно плавно регулировать, а очень низкие скорости, которые необходимы на заключительной стадии процесса, можно получать остановкой рабочего хода прессы и выдержкой под нагрузкой. Это приведет к переходу к режиму крип-штамповки, который позволяет

металлу течь с небольшой скоростью и дает возможность оформлять элементы поковки сложной геометрии.

Важным параметром, влияющим на качество получаемой штамповки и энергосиловые параметры, является смазка. Согласно рекомендациям работ [3–10] при изотермической штамповке алюминиевых сплавов целесообразно применять смазку, представляющую собой пасту, содержащую мелкодисперсные графит и дисульфид молибдена.

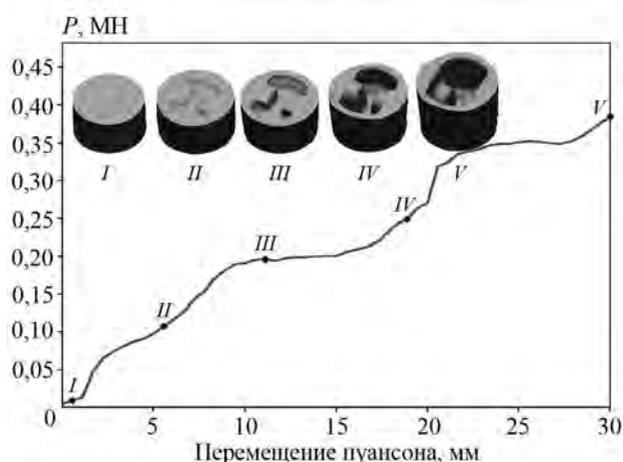


Рис. 6. Изменение силы штамповки и формы деформированного полуфабриката при моделировании процесса штамповки

I–V – номера точек на кривой нагружения, соответствующие каждой стадии штамповки

Fig. 6. Changes in forging force and as fabricated product shape when simulating the forging process

I–V – number of points on the loading curve that correspond to each forging stage

Заклучение

Таким образом, на примере штампованной поковки «поршень» показано, что с помощью компьютерного моделирования в программе Deform-3D можно разрабатывать процессы горячей объемной штамповки заготовок из алюминиевых сплавов для изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания беспилотных летательных аппаратов. При этом компьютерное моделирование позволяет:

- разработать конструкцию штампового инструмента;
- произвести оценку силовых параметров процесса горячей объемной штамповки;
- изучить характер формоизменения заготовки при штамповке и т.д.

Данная информация необходима для внесения корректировок в виртуальный технологический процесс, что даст возможность при проектировании реального процесса выбрать наиболее оптимальные технические решения.

Изложенная методика компьютерного моделирования может быть распространена не только на поршни двигателей внутреннего сгорания, но и на другие штампованные поковки из алюминиевых сплавов.

Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013.

Acknowledgments: The study was conducted as part of the government science task for Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Siberian Federal University», Project No. FSRZ-2020-0013.

Литература/References

1. Биард Р.У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: Теория и практика. М.: Техносфера, 2015.
Biard R.U., McLeyn T.U. Small unmanned aerial vehicles: theory and practice. Moscow: Tekhnosfera, 2015 (In Russ.).
2. Колонаков А.А., Кухаренко А.В., Деев В.Б., Абатурова А.А. Структура и химический состав поршневого сплава АК12ММгН, получаемого на разной шихте. *Изв. вузов. Цветная металлургия.* 2015. No. 3. С. 49–55. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-3-49-55.
Kolonakov A.A., Kukharensko A.V., Deev V.B., Abaturova A.A. Structure and chemical composition of the AK12MMgN piston alloy fabricated based on various charges. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 4. P. 428–433.
3. Садоха М.А. Определение технологических параметров производства отливок поршней высоконагруженных дизельных двигателей. *Литье и металлургия.* 2011. No. 3. С. 61–64.
Sadokha M.A. Investigation of technical parameters of chills for production of piston castings. *Litiyo i Metallurgiya.* 2011. No. 3. P. 61–64 (In Russ.).
4. Фиглин С.З., Бойцов В.В., Калпин Ю.Г., Каплин Ю.И. Изотермическое деформирование металлов. М.: Машиностроение, 1978.
Figlin S.Z., Boytsov V.V., Kalpin Yu.G., Kaplin Yu.I. Isothermal deformation of metals. Moscow: Mashinostroenie, 1978 (In Russ.).
5. Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А. Сверхпластичность: Материалы, теория, технологии. М.: КомКнига, 2005.
Chumachenko E.N., Smirnov O.M., Tsepin M.A. Superplasticity: Materials, theory, technology. Moscow: KomKniga, 2005 (In Russ.).
6. Лусунец Н.Л., Соломонов К.Н., Цепин М.А. Объемная штамповка алюминиевых заготовок. М.: Машиностроение, 2009.
Lisunets N.L., Solomonov K.N., Tsepin M.A. Die forging of aluminum billets. Moscow: Mashinostroenie, 2009 (In Russ.).
7. Wang G.-F., Wang H.-L., Liang J.-Y., Jia H.-H., Gu Y.-B. Research on quick superplastic forming technology of industrial AA5083 aluminum alloy for rail traffic. *Suxing Gongcheng Xuebao/J. Plasticity Eng.* 2019. Vol. 26. Iss. 2. P. 37–42. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2019.02.004.

8. Wang G., Jia H., Gu Y., Liu Q. Research on quick superplastic forming technology of industrial aluminum alloys for rail traffic. *Defect and Diffusion Forum*. 2018. Vol. 385. P. 468—473. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.385.468.
9. Guofeng W., Chao S., Shufen L., Mo Y. Research on quick superplastic forming technology of aluminum alloy complex components. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2014. Vol. 45. Iss. 9. P. 854—859. DOI: 10.1002/mawe.201400294.
10. Bruschi S., Ghiotti A., Michieletto F. Hot tensile behavior of superplastic and commercial AA5083 sheets at high temperature and strain rate. *Key Eng. Mater.* 2013. Vol. 554-557. P. 63—70. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.63.
11. Wu X.-W., Wang Y., Liang H.-J., Li J., Ma Z.-L., Zhao S.-S., Feng S.-S., Yang H.-X. Research on high speed superplastic forming of aluminium alloy automotive panel. *Suxing Gongcheng Xuebao/J. Plasticity Eng.* 2012. Vol. 19. Iss. 1. P. 1—5. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2012.01.001.
12. Liu J., Tan M.-J., Jarfors A.E.W., Lim S.C.V., Fong K.-S., Castagne S. Greener manufacturing: Superplastic-like forming. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2012. Vol. 379. Iss. 1. No. 012034. DOI: 10.1088/1742-6596/379/1/012034.
13. Константинов И.Л., Губанов И.Ю., Клеменкова Д.В., Астрашабов И.О., Сидельников С.Б., Горохов Ю.В. Методология модернизации технологии горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов методом компьютерного моделирования. *Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова*. 2016. Т. 14. No. 1. С. 46—52. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-1-46-52. Konstantinov I.L., Gubanov I.Yu., Klemenkova D.V., Astrashabov I.O., Sidelnikov S.B., Gorokhov Yu.V. Computer-simulated upgrading procedures of the hot aluminum-alloy forging process technology. *MGTU im. G.I. Nosova*. 2016. Vol. 14. No. 1. P. 46—52 (In Russ.).
14. Горохов Ю.В., Константинов И.Л. Компьютерное моделирование процессов горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов. Ч. 1. *Известия ТулГУ*. 2017. No. 11. С. 101—109. Gorokhov Yu.V., Konstantinov I.L. Computer simulation of processes of hot forming of aluminum alloys. Pt. 1. *Izvestiya TulGU*. 2017. No. 11. P. 101—109 (In Russ.).
15. Константинов И.Л., Губанов И.Ю., Горохов Ю.В. Компьютерное моделирование технологического процесса изотермической штамповки сложнопрофильных панелей из алюминиевых сплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2013. No. 2. С. 46—50. DOI: 10.17073/0021-3438-2013-2-84-93. Konstantinov I.L., Gubanov I.Yu., Gorokhov Yu.V. Computer simulation of the production process for isothermal forging of profiled panels made of aluminum alloys. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2013. Vol. 54. No. 3. P. 220—223. DOI: 10.3103/S1067821213030085.
16. Константинов И.Л., Губанов И.Ю., Астрашабов И.О., Сидельников С.Б., Белан Н.А. Моделирование процесса горячей объемной штамповки поковок из алюминиевого сплава АК6. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2015. No. 1. С. 45—48. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-1-45-48. Konstantinov I.L., Gubanov I.Yu., Astrashabov I.O., Sidelnikov S.B., Belan N.A. Simulation of die forging of an AK6 aluminum alloy forged piece. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No.2. P. 177—180. DOI: 10.3103/S1067821215020108.
17. Vrolijk M., Lorenz D., Porzner H., Holecek M. Supporting lightweight design: virtual modeling of hot stamping with tailored properties and warm and hot formed aluminium. *Proc. Eng.* 2017. Vol. 183. P. 336—342. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.049.
18. Харсеев П.Е., Петров В.А. Выбор показателей напряженно-деформированного состояния для построения диаграмм пластичности посредством компьютерного моделирования. *Технология легких сплавов*. 2015. No. 2. С. 131—137. Kharseev P.E., Petrov V.A. The choice of stress-strain state indicators for constructing plasticity diagrams by computer simulation. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2015. No. 2. P. 131—137 (In Russ.).
19. Petrov M., Petrov P., Bast J., Sheypak A. Investigation of the heat transport during the hollow spheres production from the tin melt. *Computer Methods in Materials Science*. 2013. Vol. 13. No. 2. P. 276—282.
20. Петров П.А. Моделирование процессов изотермической штамповки алюминиевых и магниевых сплавов. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2011. No. 12. С. 29—36. Petrov P.A. Simulation of the process of aluminum and magnesium alloys isothermal stamping. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2011. No. 12. P. 29—36 (In Russ.).
21. Larin S.N., Platonov V.I., Solomonov K.N. Approach to assessment of microdamages accumulated during the constrained molding of shells made of the material subject to energy theory of creep and damage. *J. Chem. Technol. Metal.* 2017. Vol. 52. No. 4. P. 679—684.
22. Микляев П.Г., Дуденков В.М. Соппротивление деформации и пластичность алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1973. Miklyaev P.G., Dudenkov V.M. Deformation resistance and ductility of aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya, 1973 (In Russ.).