

Обзор технических решений в области технологии горячей изотермической штамповки алюминиевых сплавов

П. А. Петров

Представлен обзор технических решений в области горячей изотермической штамповки. Приведены примеры штампованных изделий, изготавливаемых по рассматриваемой технологии из алюминиевых сплавов различных марок. Показаны оригинальные технические решения, запатентованные в России и в зарубежных странах.

Ключевые слова:
алюминиевый сплав,
горячая изотермическая штамповка,
закрытая штамповка,
повышение КИМ,
установка изотермической штамповки

УДК 621.77.04 | БАК 2.6.4
DOI: 10.22184/2499-9407.2024.36.3.48.56

Введение

Изотермическая штамповка представляет собой процесс горячего деформирования заготовок в штамповом инструменте, при котором заготовка и инструмент нагреты до температуры горячей штамповки металла. Термин «горячая изотермическая штамповка» относится к условиям выполнения технологической операции пластического деформирования. При этом в деформируемом металле проходят процессы упрочнения-разупрочнения, характерные для обработки давлением при температуре горячей обработки.

Вопросами разработки и исследования технологии горячей изотермической штамповки начали заниматься в 50–60-х годах 20 века с момента появления жаростойких и жаропрочных инструментальных материалов [1–5]. В начале эта технология разрабатывалась и внедрялась на предприятиях авиационной промышленности, а начиная с 70-х годов 20 века нашла свое применение на машиностроительных предприятиях, на предприятиях автомобильной и тракторной промышленности, а также на предприятиях энергомашиностроения.

В настоящее время технология горячей изотермической штамповки успешно применяется для получения изделий как из листового материала, так и из сортового проката (рис. 1). В данной статье, на основе анализа патентной и публикационной активности исследователей в России и за

рубежом, рассмотрим новые технические решения в области горячей изотермической штамповки алюминиевых сплавов, относящейся к низкотемпературной обработке, выполняемой при температуре не более 550 °С.



Рис. 1. Классификация технологий изотермической штамповки [6]

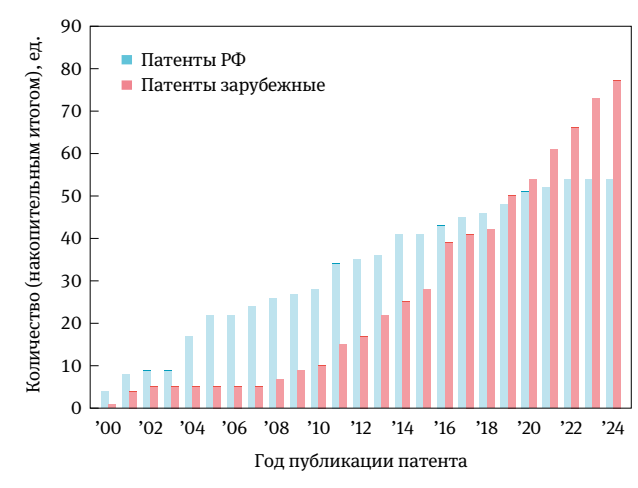


Рис. 2. Патентная активность в области горячей изотермической штамповки

Патентная и публикационная активность

Анализ российских (<https://yandex.ru/patents>) и зарубежных (www.patentinspiration.com) патентов за период 2000–2024 годов показывает, что нарастающим итогом к 2024 году вновь появился интерес к горячей изотермической штамповке (рис. 2). Начиная с 2019 года патентная активность за рубежом усилилась практически в 1,4 раза. При поиске учитывались патенты, связанные со способом либо устройством для горячей изотермической штамповки вне зависимости от обрабатываемого материала, в качестве которого могут быть использованы титановые, алюминиевые, магниевые и медные сплавы.

Практически все зарубежные патенты (90%) выданы в Китае (рис. 3); оставшиеся 10% распределяются между США, странами ЕС и Японией.

Публикационная активность (рис. 4) определяется сравнением количества (нарастающим итогом) научно-исследовательских публикаций в открытых российских (elibrary.ru) и зарубежных (sciencedirect.com) изданиях. Для сравнения рассматриваются только работы, связанные

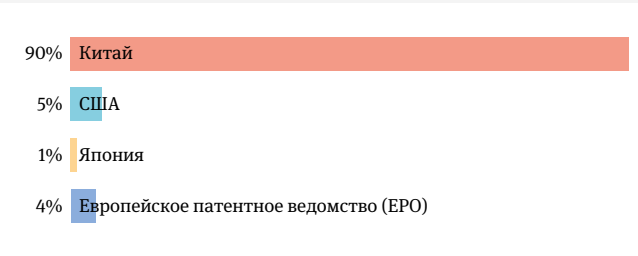


Рис. 3. Распределение зарубежных патентов по странам за период 2000–2024 годов

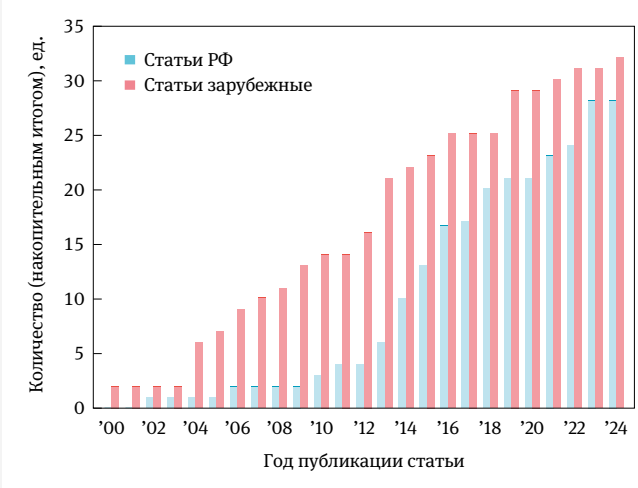


Рис. 4. Публикационная активность в области горячей изотермической штамповки изделий из алюминиевых сплавов

с обработкой алюминиевых сплавов различного химического состава. Так же, как и с патентами, наблюдается повышение интереса к технологии горячей изотермической штамповки начиная с 2010 года.

Разновидности штампованных изделий, изготавливаемых в условиях горячей изотермической штамповки

Штампованные изделия из алюминиевых сплавов, изготовленные по технологии изотермической штамповки, характеризуются повышенной точностью. Для их получения требуется создание меньшей силы деформирования, по сравнению со значением силы в традиционной технологии горячей объемной штамповки. Это обусловлено тем, что в изотермических условиях наблюдается значительное увеличение пластичности деформируемого металла, снижение его сопротивления деформации и уменьшение контактного трения. Эффективность технологии проявляется и в том, что норма расхода металла может быть уменьшена более чем в два раза по сравнению с горячей объемной штамповкой, что сказывается и на коэффициенте использования металла – приводит к его повышению.

Технология горячей изотермической штамповки позволяет получать штампованные изделия (полуфабрикаты) из алюминиевых сплавов различной формы:

- типа стержень с фланцем;
- осесимметричные с центральной полостью либо без нее;
- осесимметричные с лопатками;
- несимметричные с полостью и/или ребрами/лопатками;
- удлиненные в плане с ребрами.



Рис. 5. Штамповки из сплава Д16Т деталей нефтяного насоса [7]:
а – штамповки деталей «Аппарат направляющий» и «Колесо рабочее», б – разрез штамповки детали «Колесо рабочее»

Приведем некоторые состоявшиеся примеры изготовления штампованных изделий из алюминиевых сплавов. На рис. 5–14 показаны характерные изделия, относящиеся к различным отраслям экономики: машиностроению, нефтеперерабатывающей и химической промышленности, электроэнергетике, пищевой промышленности и др.

Авторами работы [7] показана возможность изготовления штамповок деталей типа «аппарат направляющий» и «колесо рабочее» из алюминиевого сплава Д16Т по технологии горячей изотермической штамповки. Штамповки характеризуются достаточно большим процентом поверхности, оставляемой без последующей обработки резанием.

Второй пример деталей, изготовленных методом изотермической штамповки, относится к машиностроению – имитатор лопатки (рис. 6). Технологический процесс включает три формообразующие операции [8], материал штамповки – сплав Al – 5,3% Cu – 0,8% Mg – 0,5% Ag – 0,3% Mn – 0,15% Zr.



Рис. 6. Штамповка имитатора лопатки из алюминиевого сплава Al – 5,3% Cu – 0,8% Mg – 0,5% Ag – 0,3% Mn – 0,15% Zr [8]



Рис. 7.
Штамповка
зубчатой
полумуфты
из алюминиевого
сплава АМг6 [9]

Полученный полуфабрикат требует последующей обработки в минимальном объеме.

Одним из широко применяемых является алюминиевый сплав АМг6, из которого также получают детали по технологии изотермической штамповки (рис. 7).

Номенклатура детали «корпус муфты» включает порядка 10–12 модификаций и изготавливается из алюминиевого сплава АД35. Деталь характеризуется большим процентом необрабатываемой поверхности, а также невысокими программами выпуска и наличием модификаций по типу-размеру. Это позволяет выбрать в качестве заготовительной технологию горячей изотермической штамповки. На рис. 8 показана штамповка детали «корпус муфты» размером 32 мм в диаметре и ее компьютерная модель, полученная с применением САЕ-программы для моделирования формообразующей операции.

Более сложные штамповки из различных алюминиевых сплавов показаны на рис. 9–12. Штамповки изготовлены по технологии горячей изотермической штамповки, имеют элементы асимметрии, что усложняет процесс проектирования

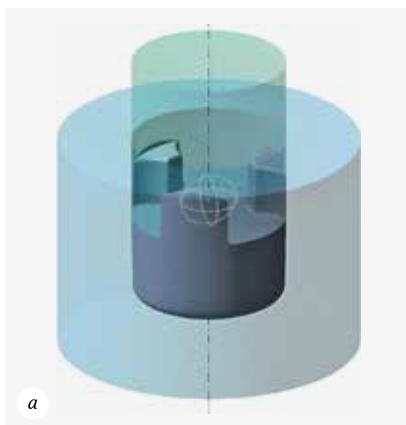


Рис. 8. Штамповка корпуса муфты из алюминиевого сплава АД35: а – компьютерное моделирование в САЕ-программе, б – штамповка детали «корпус муфты» [10]

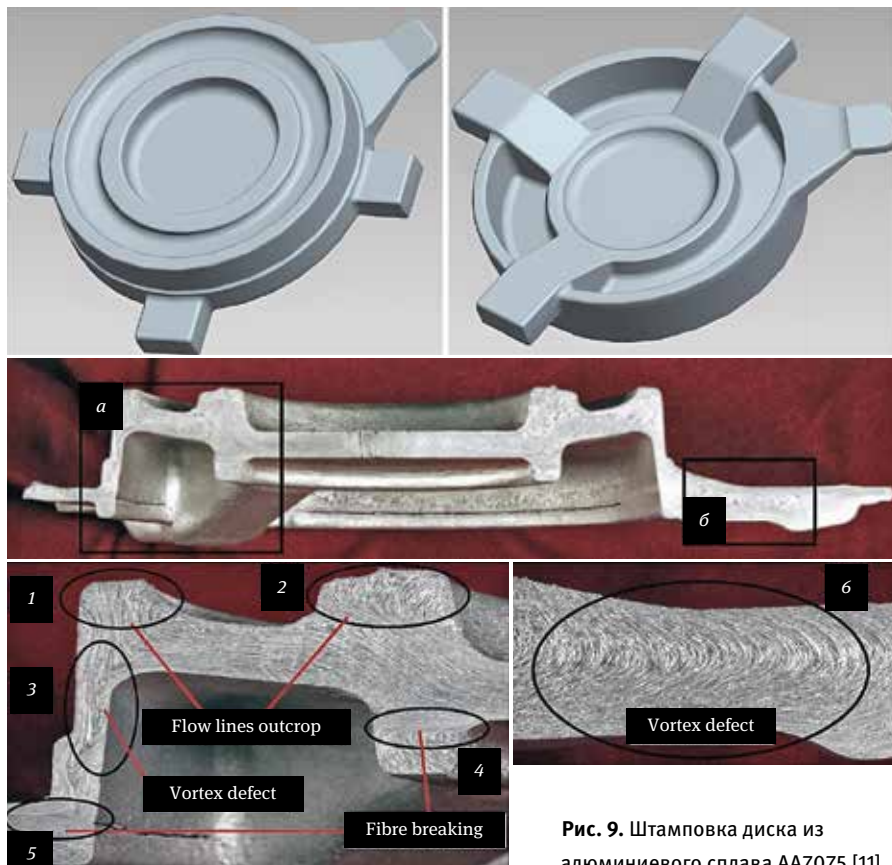


Рис. 9. Штамповка диска из алюминиевого сплава AA7075 [11]

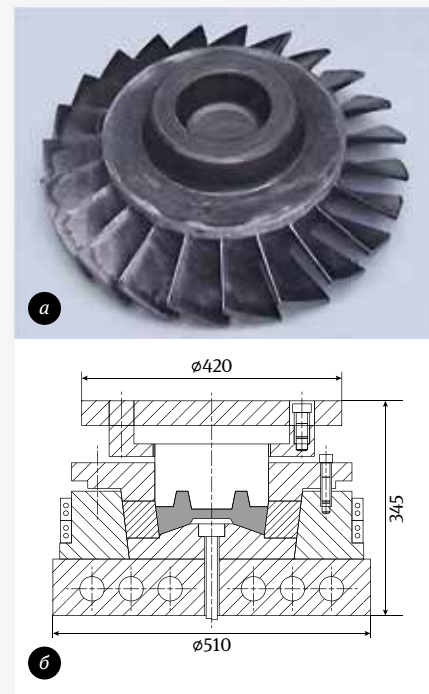


Рис. 10. Штамповка ротора из алюминиевого сплава AA2618:
а – штамповка ротора,
б – схема штампового инструмента [12]

инструмента для формообразующей операции. Формообразование выполняется, как правило, за одну операцию.

Более сложная форма штамповки требует детальной проработки гравюры штампового инструмента для упрощения течения металла при ее заполнении и предотвращения образования дефектов. Некоторые из возможных дефектов показаны на рис. 9:

- разрыв линии течения (волокна) металла (fibre breaking);
- выход линий течения металла на поверхность (flow lines outcrop);
- утяжина или прострел (vortex defect).

Избежать появления данных дефектов при изотермической штамповке – возможно.

Повышенная пластичность металла, деформируемого в изотермических условиях, обеспечивает заполнение инструмента даже в случае штамповки изделий с лопатками, минимальная толщина которых может быть равна 0,5 мм. Так, авторы работы [12] разработали штамповый инструмент для изотермической штамповки

(рис. 10 б), обеспечивающий изготовление осесимметричных штамповок с радиально расположенными лопатками толщиной 3,0 мм и длиной 30,0 мм. Общее количество лопаток – 23 (рис. 10 а); их формообразование и последующее извлечение штамповки из инструмента обеспечивается за счет секторной конструкции матрицы.

Технология изотермической штамповки позволяет изготовить осесимметричные штамповки под последующую механическую обработку с глубокой центральной полостью и тонкой стенкой. Например, в работе [13] проведено

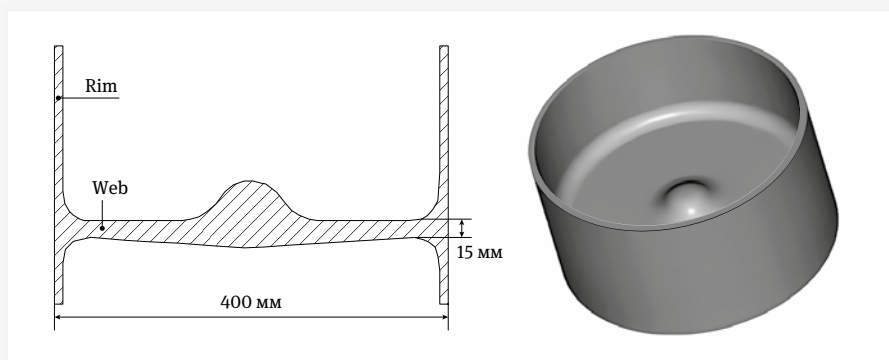


Рис. 11. Штамповка колеса из алюминиевого сплава AA6061 [13]

исследование и изготовлены опытные образцы колеса с толщиной стенки (rim) 7,0 мм (рис. 11).

Повышенная пластичность металла позволяет изготавливать штамповки за одну формообразующую операцию. Штамповки детали «поршень» (рис. 12) – характерный пример штампованных изделий, изготавливаемых за одну операцию за счет обратного выдавливания металла в закрытом штампе.

Штамповка, показанная на рис. 13, представляет собой тело вращения; имеется центральная глубокая полость. Казалось бы, формообразование данной штамповки не является сложным, однако на внешней и внутренней образующей поверхности имеется переход, который нарушает равномерность течения материала. В изотермических условиях при скорости перемещения инструмента 0,1 мм/с и температуре нагрева заготовки и инструмента 450 °С обеспечиваются благоприятные условия для заполнения формообразующей полости матрицы и изготовления бездефектного штампованного изделия.

И, наконец, пример удлиненной в плане штамповки показан на рис. 14. Выполненные в работе [16] исследования показывают значимость выбора для технологии горячей

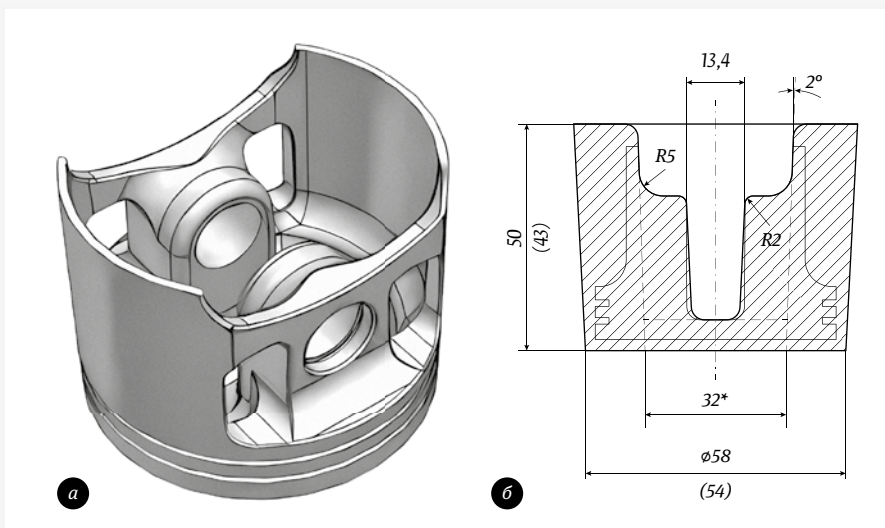


Рис. 12. Штамповка поршня из алюминиевого сплава АК4-1: а – деталь «поршень», б – штамповка детали «поршень» [14]

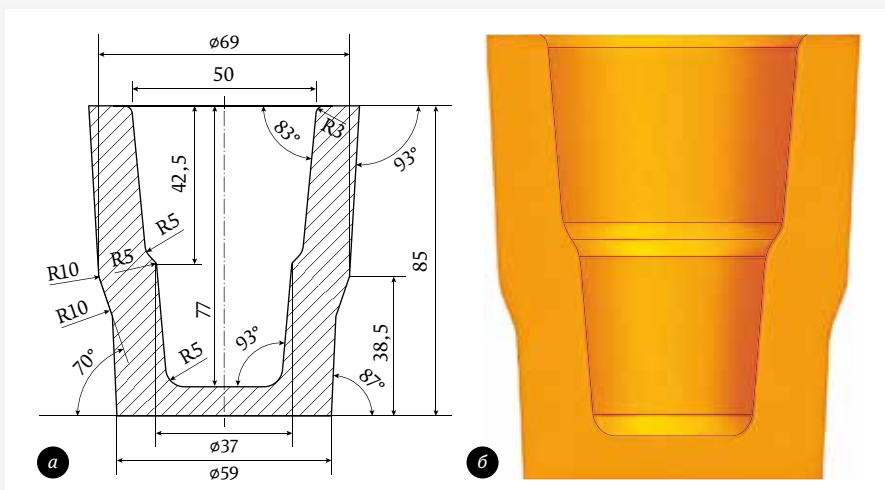


Рис. 13. Штамповка изделия типа «стакан» из алюминиевого сплава 6A02: а – эскиз сечения, б – модель штампованного изделия [15]

изотермической штамповки значения скорости деформирования (рис. 14а и б).

Уменьшение скорости деформирования с 0,1 до 0,01 мм/с позволяет устранить дефекты, формируемые на поверхности: недоштамповка (under-filling) и заков (folding). Аналогичного результата можно достичь при переменной

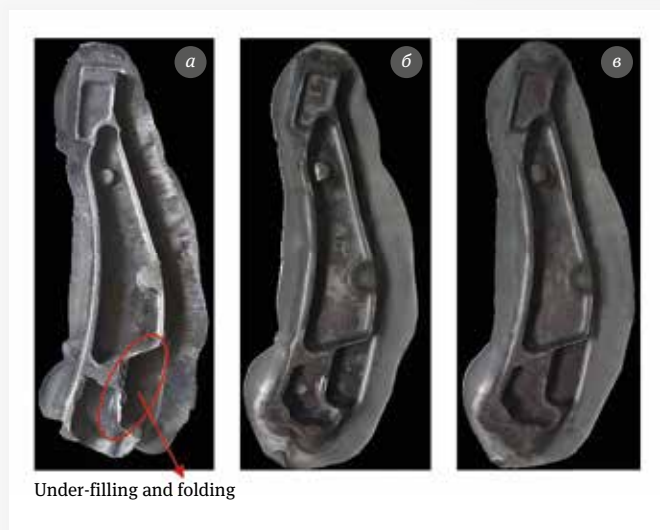


Рис. 14. Штамповка удлиненной в плане формы из алюминиевого сплава системы Al–Zn–Mg–Cu: а – при скорости 0,1 мм/с, б – при скорости 0,01 мм/с, в – при переменной скорости 0,01 мм/с и 1,0 мм/с [16]

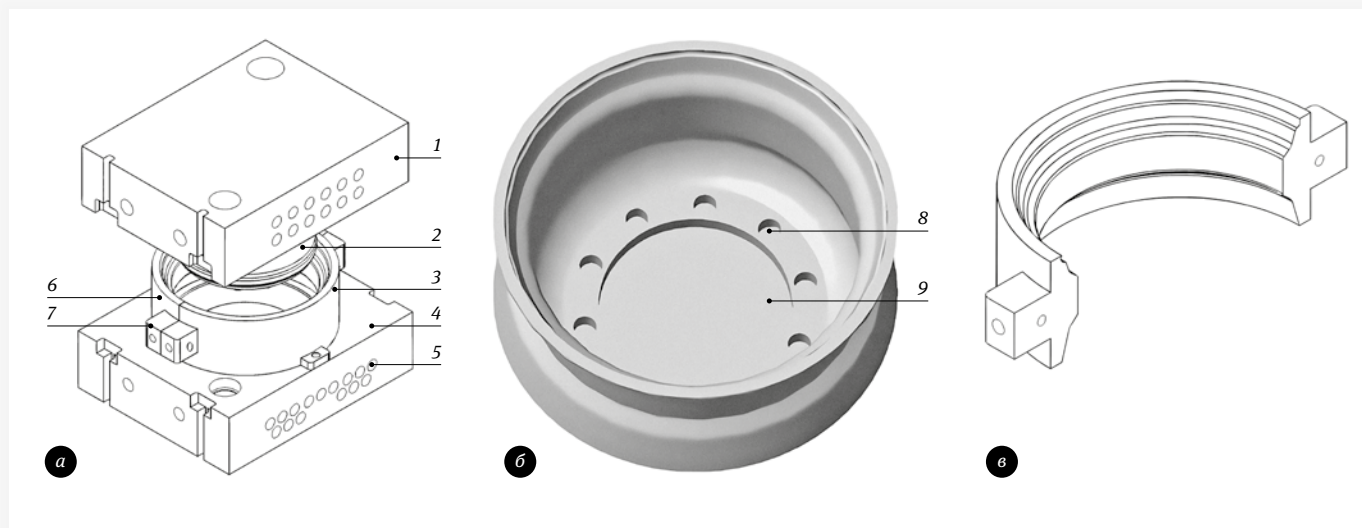


Рис. 15. Штмп изотермической штамповки колесного диска из сплава AA6063, патент CN113941679A: а – общий вид (1 – держатель, 2 – пуансон, 3 – секторная матрица Б, 4 – матрицедержатель, 5 – отверстия для размещения нагревателей, 6 – секторная матрица А, 7 – зажимной элемент); б – штамповка детали «диск колесный» (8 – глухие отверстия, 9 – центральное глухое отверстие, формируемое при штамповке); в – секторная матрица А поз. 6 [17]

скорости деформирования: первая часть рабочего хода выполняется со скоростью 0,01 мм/с; вторая – со скоростью 1,0 мм/с (рис. 14в).

Примеры технических решений

Обзор патентов за период 2000–2024 гг. позволяет выделить некоторые интересные технические решения, направленные на повышение эффективности технологии горячей изотермической штамповки, применяемой в различных отраслях промышленности. В качестве параметров повышения эффективности рассматриваются:

- себестоимость штампованного изделия и, соответственно, обработанного изделия;
- коэффициент использования металла (КИМ);
- равномерность нагрева штампового инструмента для изотермической штамповки и его время нагрева;
- мобильность конструкции системы нагрева для крупногабаритных штампов изотермической штамповки.

При производстве дисков автомобильных колес в патенте CN113941679A предлагается для повышения КИМ разъемный штамповый инструмент с вертикальной плоскостью разъема (рис. 15). При применении предлагаемого технического решения обеспечивается повышение КИМ и, соответственно, снижение себестоимости изделия. По оценкам авторов патента CN113941679A, повышение КИМ достигает 71,8%.

Обеспечение равномерности нагрева штампового инструмента для изотермической штамповки до начала работы и сокращение времени нагрева являются актуальными техническими проблемами. Авторами патента RU 2429 934C1

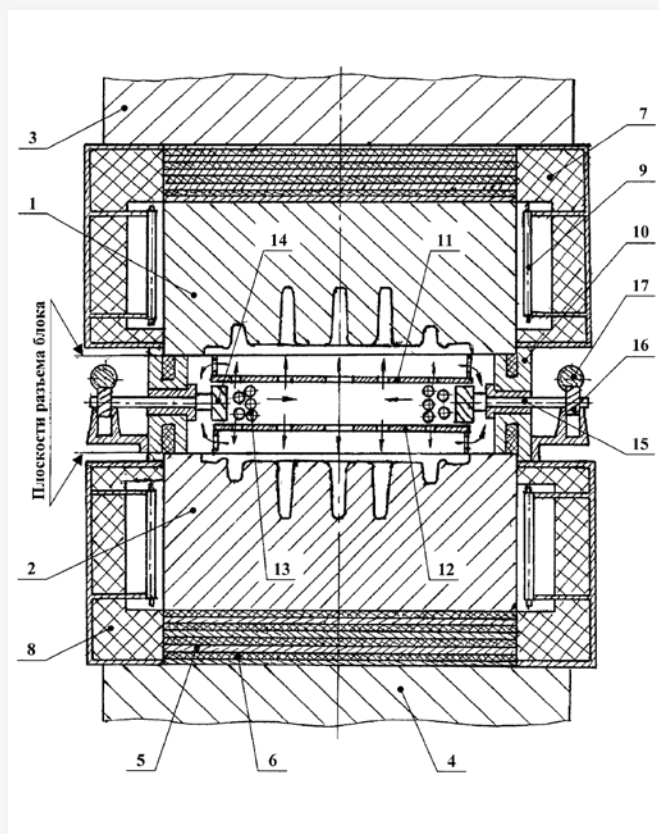


Рис. 16. Штмп изотермической штамповки с двойным способом нагрева, патент RU 2429 934C1:

9 – нагреватели электросопротивления,
13 – пакеты нагревателей электросопротивления [18]

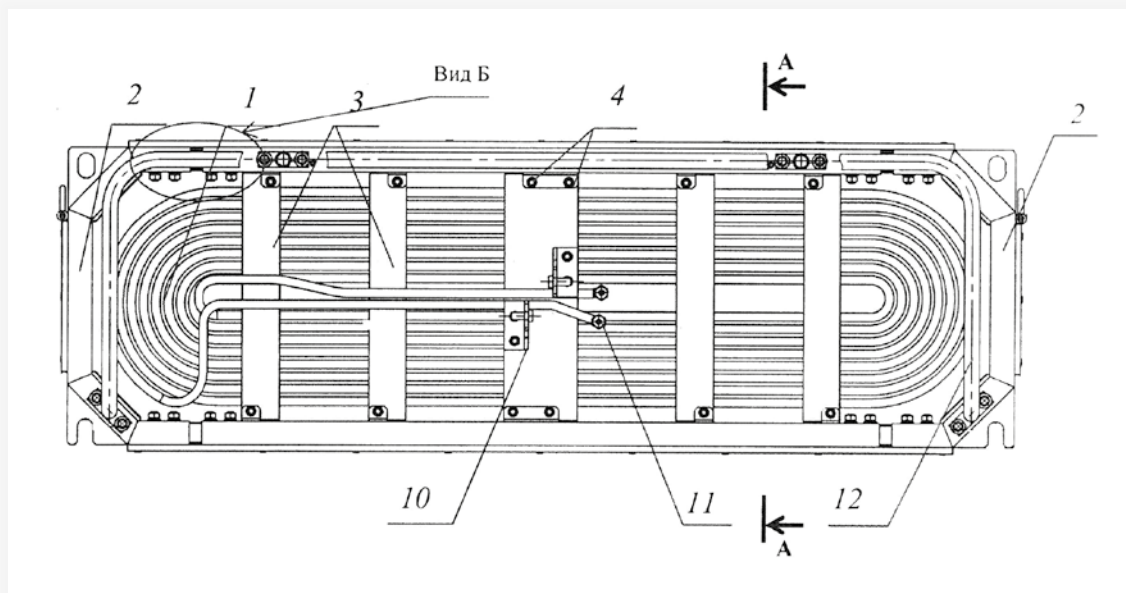


Рис. 17.
Плоский индуктор
для штампа
изотермической
штамповки
крупногабаритных
изделий, патент
RU 209376 U1 [19]

предлагается в конструкции установки изотермической штамповки использовать два нагревательных устройства: основной (поз. 9) и дополнительный (поз. 13) (рис. 16).

До начала работы штамповый блок нагревают при одновременном включении обоих нагревательных устройств. Нагреватели первого устройства (поз. 9) излучают тепловую энергию, и она передается к боковым поверхностям штампов. Нагреватели дополнительного устройства (поз. 13) нагревают гравюры верхнего и нижнего штампов. Перед началом штамповки дополнительное нагревательное устройство удаляется за пределы рабочей зоны установки изотермической штамповки.

Известны технические решения, применяемые для нагрева крупногабаритных штамповых блоков установок изотермической штамповки. Основная техническая проблема – повышение КПД установки, а также равномерность нагрева штампов. В патенте RU 209376 U1 предлагается нагрев с применением нагревательных устройств индукционного типа, имеющих плоскую форму (рис. 17). При этом обеспечивается модульность конструкции нагревательного устройства за счет выбора места размещения нагревателей на боковой поверхности штампа, а также возможности объединения плоских нагревателей-индукторов в замкнутый контур. Так, для крупногабаритного штампа

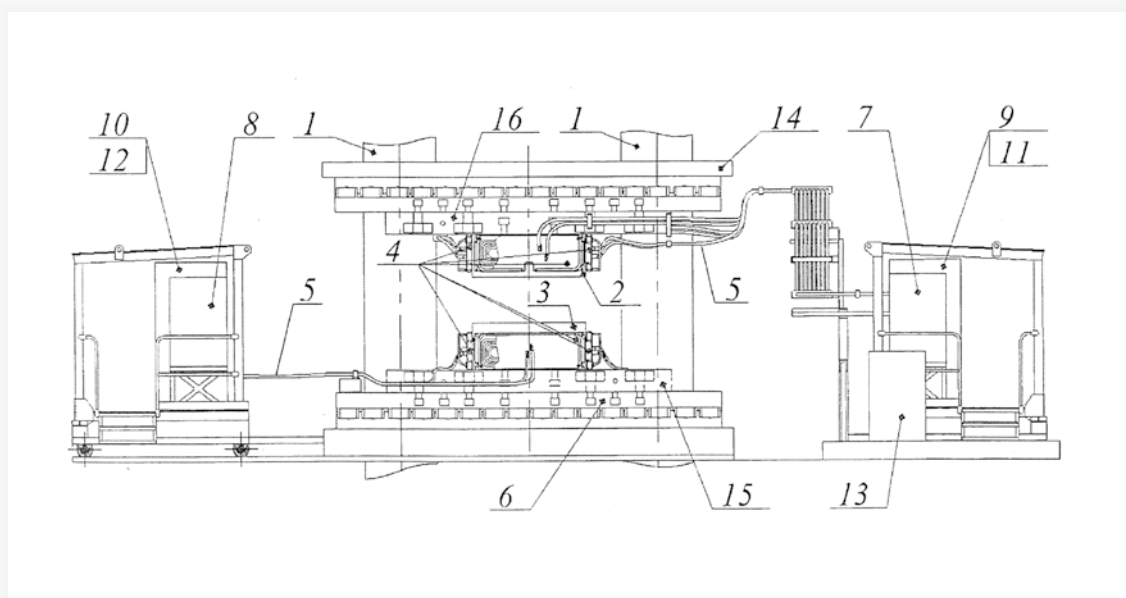


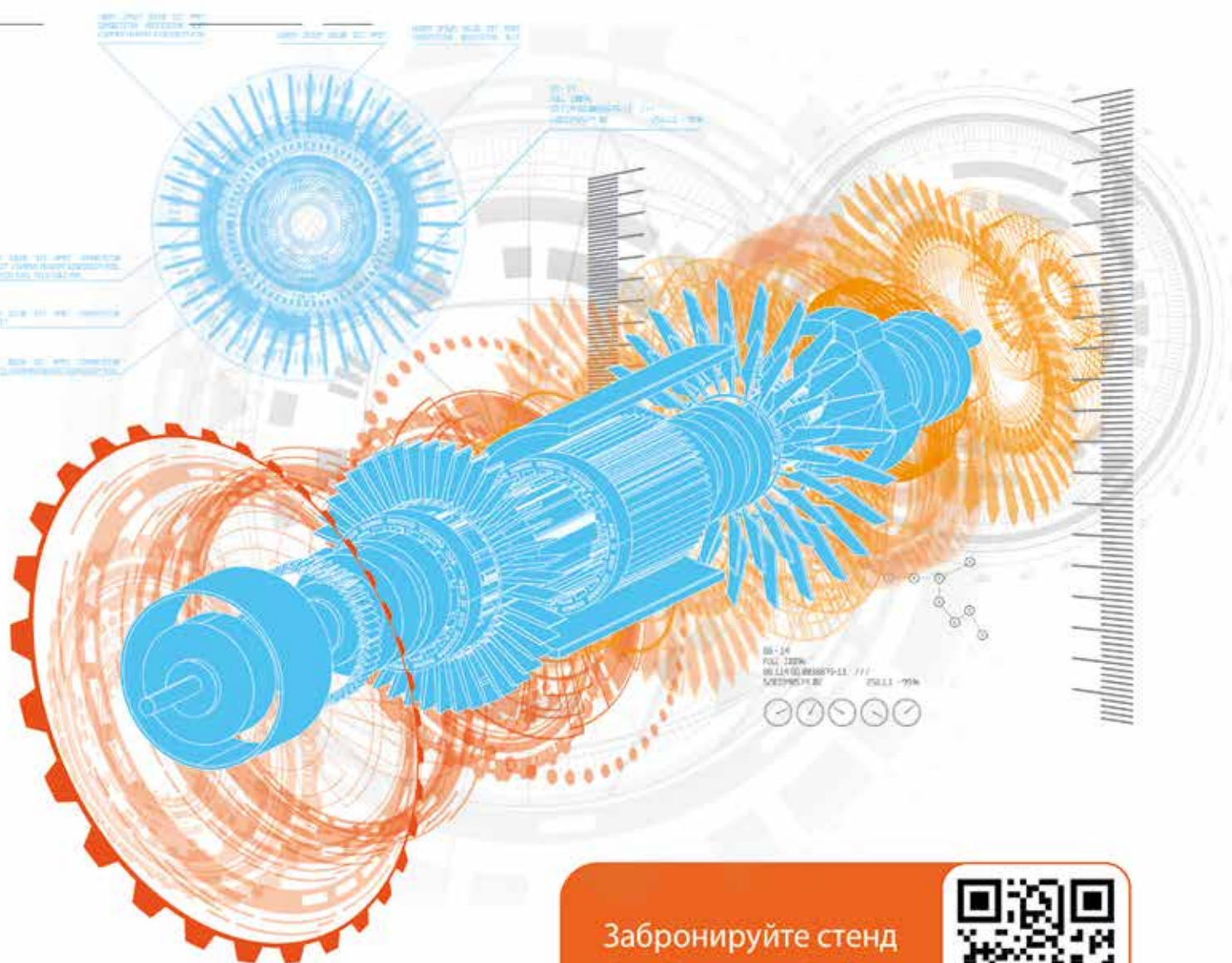
Рис. 18. Штамп
изотермической
штамповки
крупногабаритных
изделий, патент
RU 2789249 C2 [20]



22–24 октября 2024

Москва, МВЦ «Крокус Экспо»

21-я Международная выставка испытательного
и контрольно-измерительного оборудования



Забронируйте стенд
testing-control.ru



Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+7 (495) 252 11 07
control@mvk.ru

(рис. 18) в патенте RU 2789249 C2 его авторами предлагается применение четырех индукторов (поз. 3, рис. 18).

Размеры индукторов подбираются в соответствии с габаритными размерами штампа. Нагрев штампа происходит непосредственно в рабочей зоне пресса во время его работы. Подключение каждого индуктора к источнику питания осуществляется отдельно.

Выводы и заключение

Выполненный обзор технических решений в области горячей изотермической штамповки за период с 2000 по 2024 год показывает наличие интереса к технологии как в Российской Федерации, так и в зарубежных странах. Технологию изотермической штамповки применяют для изготовления штампов различной формы и размеров под последующую механическую обработку. При этом эффективность достигается за счет:

- повышения КИМ;
- снижения трудоемкости последующей механической обработки;
- повышения стойкости штампового инструмента;
- возможности изготовления малых серий;
- возможности изготовления штампованных изделий «по требованию».

Литература

1. **Фиглин С. З., Бойцов В. В., Калпин Ю. Г., Каплин Ю. И.** Изотермическое деформирование металлов. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.
2. **Фиглин С. З., Бойцов В. В., Калпин Ю. Г.** Горячая штамповка и прессование титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1975. 285 с.
3. **Калпин Ю. Г.** Разработка обобщенной теории и технологии объемной изотермической штамповки. Диссертация на соиск. ученой степени докт. техн. наук. М., 1986.
4. **Изаков И. А., Капитаненко Д. В., Сидоров С. А., Чеботарева Е. С.** Нагревательные установки для изотермического деформирования. Ч. 1. Типы установок // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2019. № 3. С. 23–32.
5. **Капитаненко Д. В., Некрасов Б. Р., Изаков И. А., Чеботарева Е. С.** Деформирующее оборудование для изотермической штамповки. Ч. 1 // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2021. № 10. С. 12–20.
6. **Петров П. А.** Моделирование процессов изотермической штамповки алюминиевых и магниевых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 12. С. 29–36.
7. **Морозов С. А., Морозов А. С.** Разработка прогрессивной технологии изготовления деталей нефтяных насосов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2015. Т. 17. № 2. С. 42–55.
8. **Боткин А. В., Вареник Е. В., Абрамов А. Н.** Компьютерное проектирование изотермической штамповки имитатора компрессорной лопатки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2017. Т. 15. № 2. С. 40–47.
9. **Громов В. В., Евсюков С. А.** Устройство для изотермического деформирования, совмещенного с электроконтактным нагревом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 6. С. 49–57.
10. **Иванов В. А., Воронков В. И., Петров П. А., Крутина Е. В.** Разработка технологии изотермической штамповки детали «Корпус муфты» из алюминиевого сплава АД-35 // Сб. научн. ст.: Цветные металлы – 2011. Красноярск: ООО «Версо», 2011. С. 590–597.
11. **Zhang Y., Shan D., Xu F.** Flow lines control of disk structure with complex shape in isothermal precision forging // J. Mater. Process. Technol., 209 (2009), 745–753.
12. **Shan D., Liu F., Xu W., Lu Y.** Experimental study on process of precision forging of an aluminium-alloy rotor // Journal of Materials Processing Technology, 170 (2005), 412–415.
13. **Kim Y. H., Ryou T. K., Choi H. J., Hwang B. B.** An analysis of the forging processes for 6061 aluminum-alloy wheels. // J. Mater. Process. Technol., 123 (2002), 270–276.
14. **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. № 6. С. 24–31.
15. **Feng X., Hu L., Sun Y., Liu Z.** Numerical simulation for isothermal forging of cup-shaped component of 6A02 Aluminum alloy // Procedia Manufacturing, 37 (2019) 478–485.
16. **Zhao J., Deng Y., Zhang J., Tang J.** Effect of forging speed on the formability, microstructure and mechanical properties of isothermal precision forged of Al–Zn–Mg–Cu alloy. // Materials Science & Engineering A 767 (2019) 13836.
17. Патент CN113941679A. Aluminum alloy wheel isothermal die forging method for improving material utilization rate through combined female die, 2022.
18. Патент RU 2429 934C1, Способ изготовления поковок горячей штамповкой на прессах, 2010.
19. Патент RU 209376 U1, Индуктор, 2020.
20. Патент RU 2789249 C2, Устройство для индукционного нагрева крупногабаритных штампов в процессе изотермической штамповки, 2020.

Автор

Петров Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Московского политехнического университета



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



А.Р. Маслов

Технологии производства микродеталей

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 236 с.
ISBN 978-5-94836-664-7

Цена 1188 руб.

В книге представлены основные элементы технологии микрообработки (Microproduction) деталей машиностроительного производства, медицинской техники и инструментария, радиотехники, электроники и оптических систем.

Дано описание основных видов оборудования с использованием многоцелевых станков с ЧПУ для обработки резанием заготовок микродеталей из основных применяемых конструкционных материалов. Даны сведения о получении микроизделий и малоразмерных деталей литьем и методами аддитивных технологий.

Приведены сведения об инструментарии и методах диагностирования состояния технологических процессов микрообработки. Дано представление о современных способах повышения надежности технологических систем путем нанесения износостойких и антифрикционных покрытий методами вакуумно-плазменных технологий.

Приведены сведения об инструментальных системах и средствах инструментального обеспечения, повышающих эффективность микрообработки. Дан обзор средств измерения микродеталей и способов исследования поверхностных структур в наноразмерном диапазоне.

Пособие предназначено для будущих инженеров, обучающихся по направлению подготовки 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов» и будущих магистров науки и технологий, обучающихся по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphere.ru
sales@technosphere.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphere.ru