
Научная статья

УДК 621.777.073

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 93–101.

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 93–101.

A.A. Мышечкин, В.В. Зуев, Е.В. Преображенская, С.В. Скрипник 

РТУ МИРЭА

 Автор для корреспонденции

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ КОЛПАЧКОВОЙ ГАЙКИ

Аннотация

В работе с использованием цифрового моделирования разработан и исследован технологический процесс горячей штамповки высокопрочных гаек. Определена схема технологического процесса и сила штамповки, размеры заготовки, исследовано напряженно-деформированное состояние и температура металла по объему поковки по переходам штамповки при использовании обычной осадки заготовки перед ее штамповкой и специальной осадки с формированием на заготовке конической части. На основе анализа результатов цифрового моделирования технологического процесса горячей штамповки установлено, что для производства колпачковых гаек рекомендуется следующий технологический процесс горячей штамповки: отрезка и нагрев заготовок до температуры горячей штамповки, специальная осадка с формированием на заготовке заходного конуса с углом 25°, горячая штамповка гайки за один переход. Использование предложенного технологического процесса позволяет получить поковку колпачковой гайки с последующей минимальной механической обработкой. По результатам моделирования процесса предложена технологическая оснастка для горячей штамповки колпачковой гайки. Полученные результаты могут быть использованы на практике.

Ключевые слова: высокопрочные крепежные изделия, класс прочности, гайка, марка стали, предел прочности, технологические переходы, горячая штамповка, нагрев, осадка, напряжения, деформации, сила.

Для цитирования: Мышечкин А.А., Зуев В.В., Преображенская Е.В., Скрипник С.В. Разработка и исследование цифровым моделированием технологического процесса горячей штамповки высокопрочной колпачковой гайки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 93–101.

A.A. Myshechkin, V.V. Zuev, E.V. Preobrazhenskaya, S.V. Skripnik 

MIREA – Russian Technological University

 Corresponding author

DEVELOPMENT AND RESEARCH BY DIGITAL MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF HOT STAMPING OF A HIGH-STRENGTH CAP NUT

Abstract

The technological process of hot stamping of high-strength nuts has been developed and investigated using digital modeling. The scheme of the technological process and the punching force, the dimensions of the workpiece are determined, the stress-strain state and temperature of the metal in terms of forging volume along the stamping transitions are investigated when using a conventional billet draft before stamping and a

special draft with the formation of a conical part on the billet. Based on the analysis of the results of digital modeling of the technological process of hot stamping, it was found that the following technological process of hot stamping is recommended for the production of cap nuts: cutting and heating the workpieces to the temperature of hot stamping, a special deposit with the formation of an entrance cone with an angle of 25° on the workpiece, hot stamping of the nut in one transition. The use of the proposed technological process makes it possible to obtain the forging of the cap nut with subsequent minimal machining. Based on the results of process modeling, technological equipment for hot stamping of the cap nut is proposed. The results obtained can be used in practice.

Keywords: high-strength fasteners, strength class, nut, steel grade, ultimate strength, technological transitions, hot stamping, heating, precipitation, stresses, deformations, force.

For citation: Myshechkin A.A., Zuev V.V., Preobrazhenskaya E.V., Skripnik S.V. Development and research by digital modeling of the technological process of hot stamping of a high-strength cap nut. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2025. No 1 (72). P. 93–101. (In Russian)

Введение

В последнее время высокопрочные крепежные изделия находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности (атомное и энергетическое машиностроение, мостостроение, авиа- и автомобилестроение). При этом требования к таким изделиям (прочность, надежность, коррозионная стойкость и др.) постоянно повышаются [1,2,3,4,5,6,7].

Согласно международной классификации резьбовых крепежных изделий к высокопрочным болтам, винтам, шпилькам относятся изделия, имеющие предел прочности не менее 800 МПа и цифровую маркировку классов прочности 8.8, 9.8, 10.9, 12.9, а к сверхпрочным – 14.9. Это важнейшая из характеристик, которая обязательно учитывается в любом проекте. Чем выше эти значения, тем прочнее, выносливее, качественнее крепежные изделия. Первая цифра указывает на предельную нагрузку на растяжение, при которой крепеж разорвется. Эта величина называется пределом прочности на разрыв, определяется как одна сотая от номинального временного сопротивления, выражается в МПа или Н/мм². Вторая цифра определяется как отношение предела текучести к пределу прочности.

Прочностные характеристики болтовых изделий определяются выбором соответствующей марки стали и технологией изготовления. Наибольшее применение для изготовления высокопрочного крепежа имеют стали 35, 35Х, 38ХА, 40, 40Г2, 40Х Селект, 38ХА, 30ХГСА, 35ХГСА, 40ХН2МА, 38ХГНМ. Реже используют слаболегированные борсодержащие стали марок 12Г1Р, 20Г2Р, 30-35Г1Р. Стали, легированные бором, обладают благоприятным сочетанием прочностных и пластических свойств, но из-за некоторых техно-

логических трудностей при выплавке, их внедрение в метизное производство сдерживается. Кроме того, ряд исследований и опыт применения данной стали накладывают определенные ограничение на ее применение по климатическим (температурным) условиям [1,4,6].

Для изготовления высокопрочных крепежных изделий применяют методы холодной и горячей объемной штамповки. Крепежные изделия с классом прочности 4.6-6.8 изготавливаются в основном методами холодной объемной штамповки. Для высокопрочных изделий применяют методы холодной и горячей объемной штамповки. Однако для наиболее ответственных конструкций в энергетическом машиностроении, мостостроении высокопрочные крепежные изделия с классом прочности выше 8.8 изготавливаются методами горячей штамповки с последующей термической обработкой.

В настоящее время, в связи с быстрым развитием различных отраслей машиностроения и снижением импорта, в России актуальным является расширение производства качественных высокопрочных крепежных изделий, в т.ч. болтов с шестигранными головками, гаек, соответствующих требованиям современных стандартов. Общие технические условия на высокопрочные болты, гайки и шайбы для металлических конструкций регламентированы ГОСТ Р 52643-2006 (с изменением 1). В стандарте установлены требования по маркам сталей и механическим характеристикам для болтов, гаек и шайб, правилам приемки, методам приемочных испытаний, нагрузкам для испытаний болтов и гаек. Настоящий стандарт содержит также рекомендации по порядку использования сталей, не предусмотренных стандартом, эталонам микроструктуры для испытаний на обезуглероживание (науглероживание) и соответствие микроструктуры, методам

испытаний на стойкость к замедленному хрупкому разрушению и трещиностойкость. ГОСТ 9064-75 (с изменениями) регламентирует типы и основные размеры гаек для фланцевых соединений паровых и газовых турбин, паровых котлов, трубопроводов и соединительных частей, арматуры, приборов, аппаратов и резервуаров с температурой среды от 0 до 650°C. При этом гайки для фланцевых соединений делятся на 2 типа: тип А – гайка шестигранная для фланцевых соединений, корпусов цилиндров паровых и газовых турбин, трубопроводов и соединительных частей, паровых котлов, арматуры, приборов, аппаратов и резервуаров и тип Б – гайка колпачковая для фланцевых соединений корпусов цилиндров паровых и газовых турбин, стопорных и регулирующих клапанов и других соединений паровых котлов, паровых и газовых турбин.

Целью настоящей работы является:

- исследование и выбор оптимальных параметров технологического процесса горячей штамповки высокопрочных колпачковых гаек с использованием цифрового моделирования в программе QForm;
- разработка технологической оснастки и рекомендаций по использованию предложенной технологии.

Основная часть

В настоящей работе выполнено исследование технологического процесса колпачковых гаек.

На рис. 1 представлена колпачковая шестигранная гайка БМ36.

При разработке технологического процесса вначале составляется чертеж штампованной заготовки (поковки), назначаются припуски, допуски, напу-

ски. На основе анализа технологических процессов горячей штамповки установлено, что аналогичные поковки в зависимости от соотношения размеров и глубины полости штампуют за два-три перехода, включая осадку. При разработке технологии штамповки необходимо учитывать также, что деталь (поковка) в штампе имеет увеличенные размеры в сравнении с холодной поковкой. Поэтому размеры инструмента выполняются по чертежу горячей поковки.

Для детальной разработки технологического процесса и проведения моделирования использована шестигранная колпачковая гайка БМ36 из стали 35ХМ. Горячая и холодная поковка гайки БМ-36 представлены на рис.2.

После построения чертежа поковки и определения ее объема заготовка для получения данной поковки, с учетом отходов, имеет размеры D45x97мм.

На основе конструктивно-технологического анализа гайки предложен следующий технологический процесс: отрезка исходной заготовки, индукционный нагрев до температуры горячей штамповки, осадка заготовки, горячая штамповка за один переход.

Для исследования технологических процессов обработки металлов давлением в последнее время широко применяются методы компьютерного моделирования. В частности, для горячего объемного формоизменения (ковки, горячей объемной штамповки, выдавливания) в последнее время успешно используют программные комплексы, основанные на методе конечных элементов и позволяющие моделировать формоизменение металлов с учетом действия различных факторов [8,9,10]. В настоящей работе для разработки технологического процесса использована программа QForm. В соответствии с

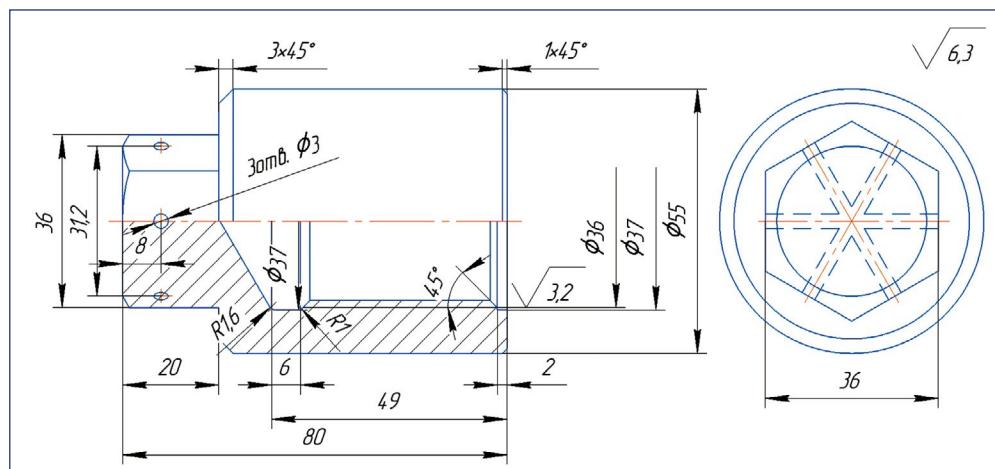


Рис.1. Гайка шестигранная колпачковая

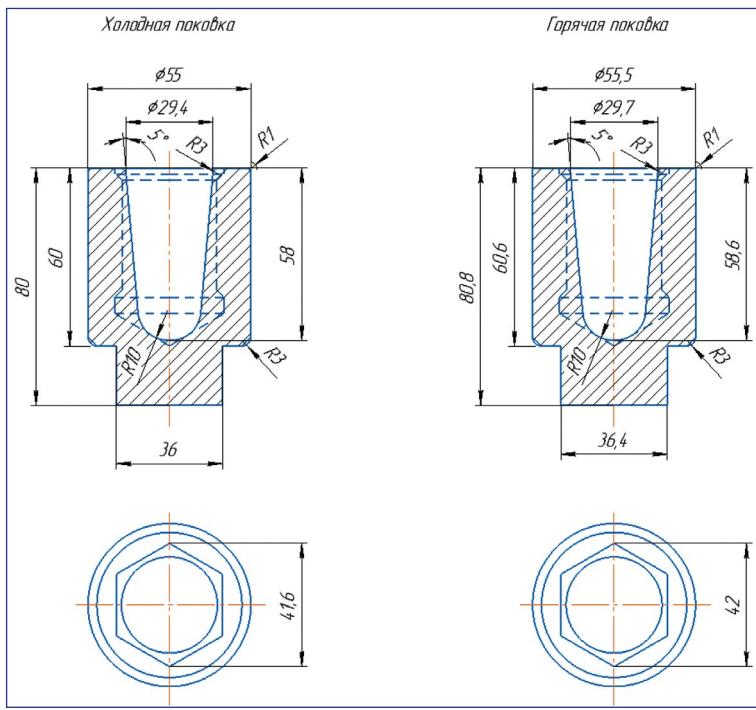


Рис. 2. Холодная и горячая поковка колпачковой гайки БМ 36

методикой моделирования в графическом редакторе была подготовлена технологическая оснастка, из базы данных программы QForm введены исходные данные (температура нагрева металла и его механические характеристики, условия трения, материал и условия остановки инструмента, его температура, условия работы, вид и характеристики оборудования и др.).

Далее проводился процесс цифрового моделирования. Моделирование проводилось с использованием закона трения Леванова со стандартными параметрами, фактор трения $m=0.4$, в качестве смазки использован графит с водой. Для уменьшения охлаждения (подстуживания) заготовки в процессе штамповки использован подогрев инструмента до 200°C . Температура нагрева заготовки – 1200°C . Сопротивление деформации стали при заданной температуре горячей штамповки в зависимости от степени и скорости деформации принимается из базы данных программы QForm.

Моделирование технологического процесса показало, что при штамповке за один переход (осадка + штамповка) получаемая поковка имеет дефект (зажим) (рис. 3). Анализ формоизменения заготовки в процессе штамповки показывает, что образование дефекта происходит вследствие того, что на втором

этапе процесса штамповки при формообразовании шестигранника скорость течения металла превышает скорость движения пуансона ($V_m > V_n$). Поэтому между пуансоном и металлом образуется полость. На заключительной стадии процесса штамповки скорость пуансона превышает скорость течения металла и полость «схлопывается», образуя зажим.

Следовательно, для горячей штамповки поковки колпачковой гайки необходимо изменить характер формоизменения заготовки.

Для изменения характера формоизменения заготовки и исключения зажима при штамповке колпачковой гайки предложено штамповывать ее за

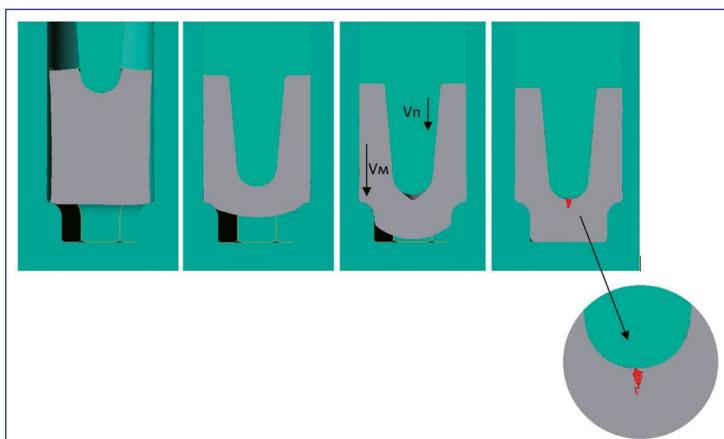


Рис. 3. Последовательность заполнения полости штампа и образование дефекта

2 штамповочных перехода. Вначале происходит осадка заготовки, диаметр осаженной заготовки на 2–4 мм меньше диаметра поковки. Далее выполняется предварительный переход с выдавливанием стержневой части и наметкой отверстия (а) и затем во втором переходе происходит окончательная штамповка (б) (рис. 4). Диаметр и высота выдавливаемой стержневой части принимаются в пределах: $D = (0,8–0,9)S$, $l_0 = (0,9–1,0)h$. Наметка отверстия улучшает центрирование пуансона на следующем переходе.

На предварительном переходе температура по сечению поковки находится в пределах 1205–917°C, накопленная пластическая деформация $\varepsilon = 0,12–1,68$, наибольшее технологическое усилие – 520 кН. На втором переходе температура по сечению поковки находится в пределах 1214–882°C, накопленная пластическая деформация $\varepsilon = 0,25–6,8$, наибольшее технологическое усилие равно 2448 кН.

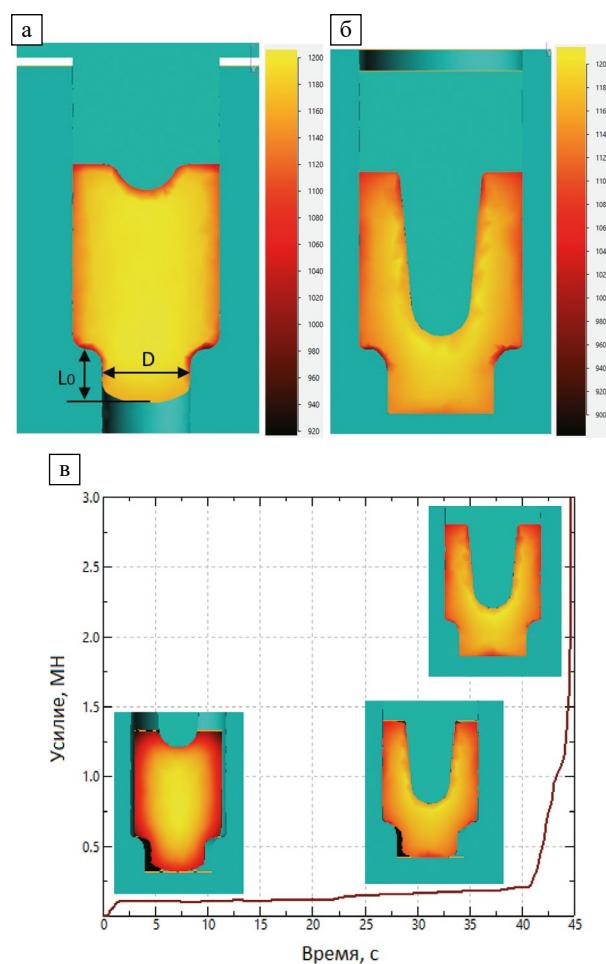


Рис. 4. Горячая штамповка гайки БМ36 за 2 перехода:
а – предварительный переход, б – окончательный переход, в – график изменения усилия на окончательном переходе и распределение температуры по сечению

Анализ течения металла и возможного дефектообразования показал, что поковка дефектов не имеет.

Для упрощения технологического процесса и использования одного штамповочного перехода предложено вместо обычной использовать специальную осадку, при которой одновременно с уменьшением высоты заготовки и увеличением ее диаметра происходит оформление конического участка в нижней части заготовки (рис. 5). Наличие такого конического участка изменяет характер течения металла при штамповке и предотвращает складкообразование. При этом был исследован процесс с использованием осадочной матрицы с конусообразным отверстием (а), матрицы с калибрующим пояском (б) и с двойным конусом (в). Использование матриц с калибрующим пояском и двойным конусом позволяет оптимизировать течение металла при последующей штамповке.

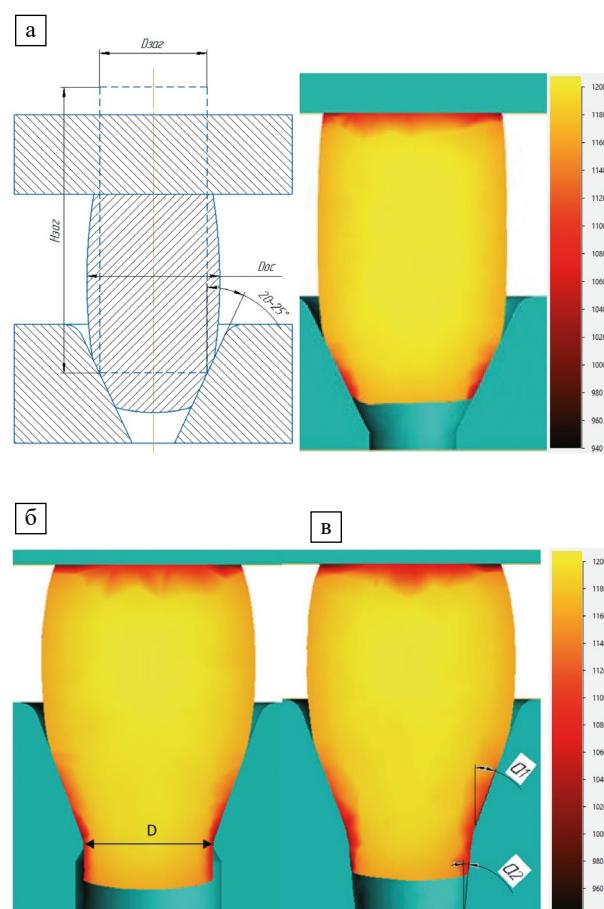


Рис. 5. Специальная осадка заготовки:
а – конусообразная, б – с калибрующим пояском, в – с двойным конусом и распределение температуры по сечению

Однако, при использовании матрицы с калибрующим пояском будет затруднено извлечение заготовки после осадки. Поэтому рекомендуется использовать осадочную матрицу с двойным конусом: верхний конус $-a_1 = 20\text{--}25^\circ$, нижний $-a_2 = 5\text{--}7^\circ$.

Размеры исходной заготовки (диаметр $-D_{заг}$, высота $-H_{заг}$) определяются с учетом объема получаемой поковки, рекомендуемого отношения высоты заготовки к ее диаметру ($H_{заг}/D_{заг} \leq 2,5$), требуемого диаметра заготовки после осадки [$D_{oc} = D_m - (2\text{--}4 \text{ мм})$], с учетом влияния диаметра заготовки на высоту получаемой конической части. D_m — диаметр матрицы для штамповки (диаметр горячей поковки).

На основе вышеизложенного, а также анализа известных рекомендаций по разработке технологических процессов при исследовании и отработки технологии штамповки использовалась заготовка диаметром $D_{заг} = 42\text{--}46 \text{ мм}$, высотой $H_{заг} = 110,5\text{--}92 \text{ мм}$.

На характер течения металла при такой осадке и высоту отростка влияет также угол конусности матрицы при осадке. При моделировании угол верхнего конуса принят 20° , нижнего — 7° .

Результаты цифрового моделирования процесса горячей штамповки колпачковой гайки с использо-

ванием специальной осадки представлены на рис. 6, 7.

Анализ результатов моделирования показывает, что использование вместо обычной специальной осадки позволяет получить поковку гайки без дефектообразования с использованием одного штамповочного перехода. Температура по сечению поковки находится в пределах $1214\text{--}862^\circ\text{C}$ и соответствует температурному интервалу горячей штамповки. Среднее напряжение по сечению поковки изменяется от -89 до -985 МПа , причем в основной части поковки $\sigma_{cp} = 500\text{--}985 \text{ МПа}$. Накопленная пластическая деформация максимальное значение ($6,0\text{--}7,7$) имеет только в области контакта пuhanсона с заготовкой, в остальных областях заготовки деформация распределена более равномерно и составляет $0,5\text{--}3,5$.

При анализе силовых параметров технологического процесса установлено, что минимальное усилие штамповки ($P = 2,25 \text{ МН}$) наблюдается при следующих условиях: диаметр заготовки $D = 42 \text{ мм}$, высота $H = 110,5 \text{ мм}$, угол конусности — 25° (рис. 7).

Полученные результаты свидетельствуют о возможности штамповки колпачковой гайки с использованием специальной осадки и одной штамповочной операции.

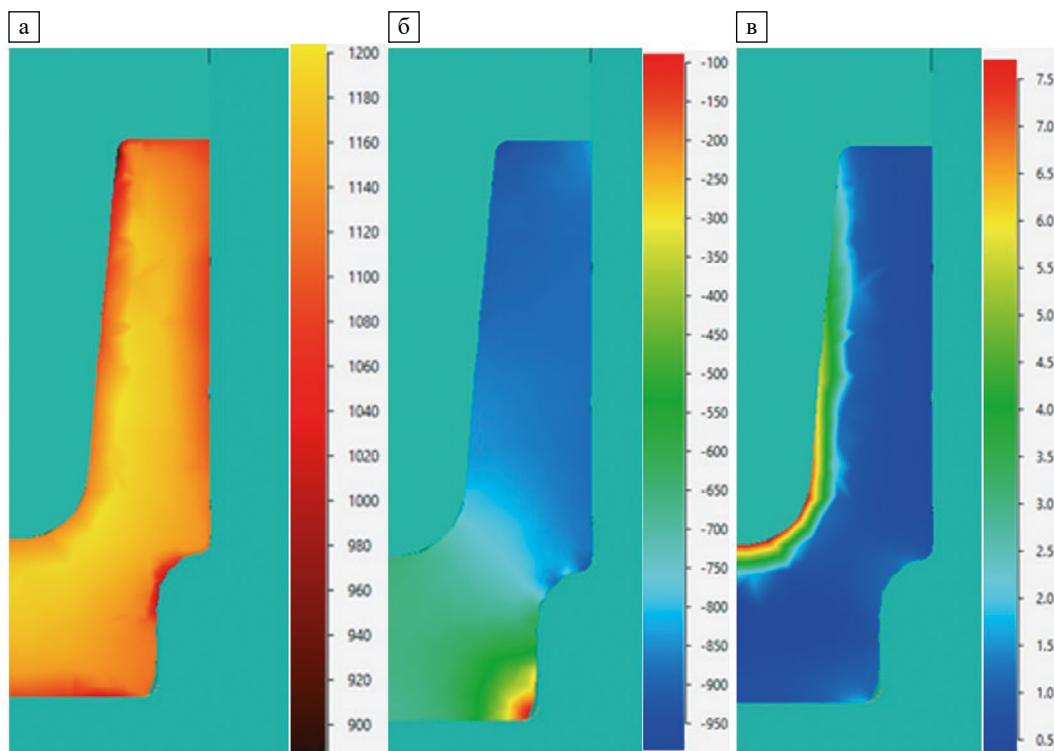


Рис. 6. Штамповка колпачковой гайки БМ36 с прошивкой отверстия за один переход с использованием специальной осадки и распределение температуры (а), среднего напряжения (б) и пластической деформации (в) по сечению поковки

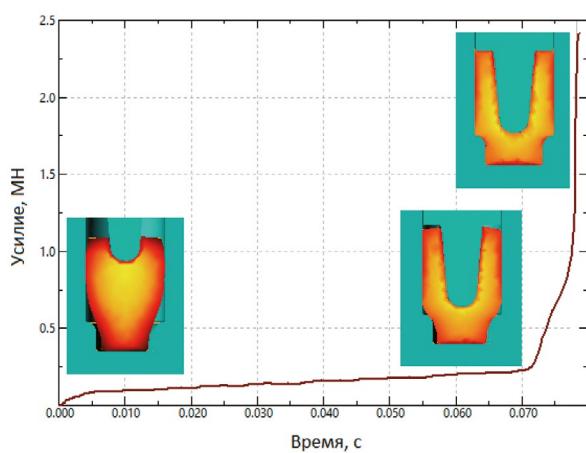


Рис.7. График изменения усилия штамповки

На основе полученных результатов разработана технологическая оснастка для штамповки колпачковой гайки. На рис. 8 представлен штамп для горячей штамповки колпачковой гайки с использованием специальной осадки и одной штамповочной операции. Штамповку предпочтительно проводить на кривошипном горячештамповочном прессе.

После нагрева заготовки происходит ее осадка в матрице для осадки 2, при этом $D_{oc} = D - 2 \div 4 mm. Далее осаженная заготовка устанавливается в матрицу 5 и происходит горячая штамповка поковки колпачковой гайки. Матрица для штамповки выполнена сборной, состоящей из нижней 4 и верхней 5 частей, установленных во внутреннем 6 и внешнем 7 бандаже. Размеры инструмента (e , D , H) соответствуют размерам горячей поковки (рис. 2).$

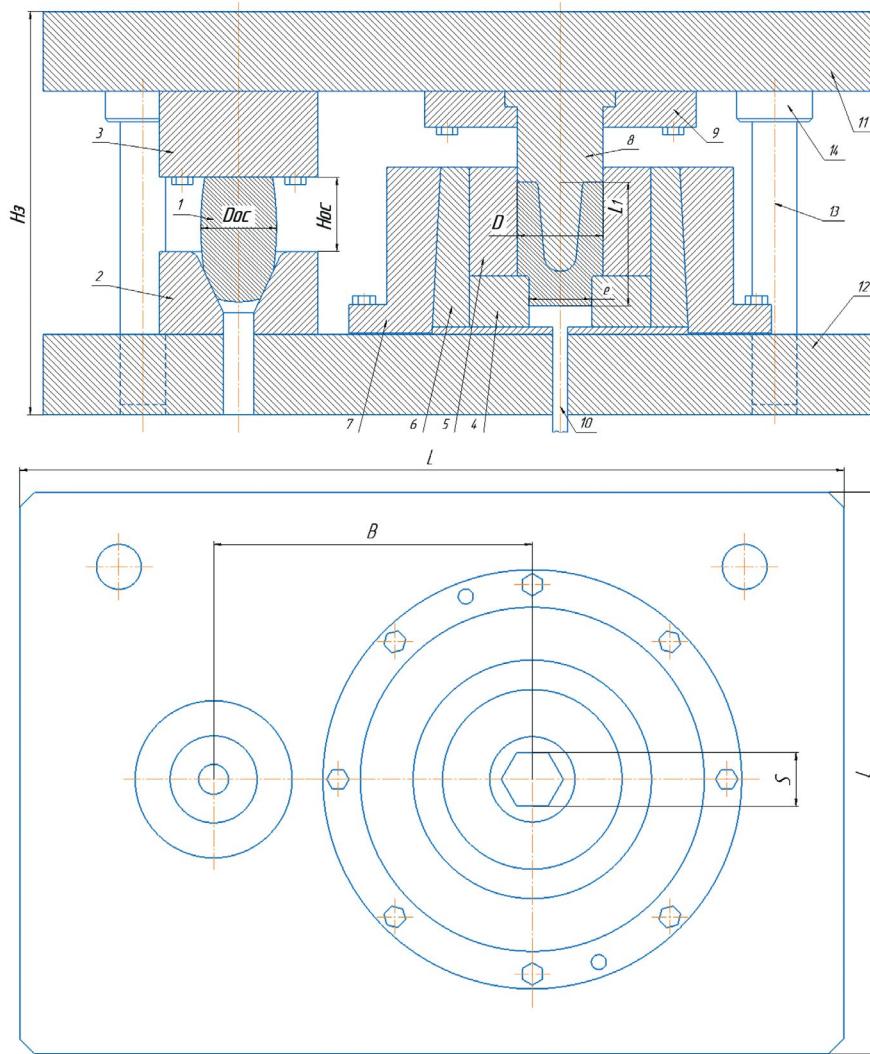


Рис. 8. Штамп для горячей штамповки колпачковой гайки:
 1 – осаживаемая заготовка; 2 – матрица для осадки; 3 – плита осадочная верхняя; 4 – матрица нижняя;
 5 – матрица верхняя; 6 – бандаж внутренний; 7 – бандаж внешний; 8 – пuhanсон;
 9 – пuhanсонодержатель; 10 – выталкиватель; 11 – плита верхняя; 12 – плита нижняя;
 13 – колонка направляющая; 14 – втулка направляющая

Заключение

Таким образом, на основе результатов анализа производственных данных и цифрового моделирования горячей штамповки колпачковых гаек установлено, что для производства колпачковых гаек рекомендуется следующий технологический процесс горячей штамповки:

- отрезка заготовки,
- нагрев заготовок до температуры горячей штамповки,
- специальная осадка,
- горячая штамповка гайки за один переход.

Использование предложенного технологического процесса и штамповой оснастки позволяет получить заготовку с последующей минимальной обработкой

Библиографический список

1. Агеев В.С., Хусид Р.Г., Кулев И.И. Высокопрочные болты с накатной резьбой для мостостроения // Метизы. – № 1. – 2007. – С. 62–66.
2. Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Основные направления развития производства высокопрочного крепежа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8-4. – С. 30–35.
3. Агеев В.С. Разработка стандартов на комплексы высокопрочного крепежа // Крепеж, клеи, инструмент. – 2012. – № 4. – С. 21–24.
4. Мышечкин А.А., Осадчий В.Я. Машины и технология метизного производства. – М., 2008. – 469 с.
5. Лавриненко В.Ю. Математическое моделирование процессов холодной объемной штамповки крепежных изделий // Метизы. – 2007. № 1. – С. 66–69.
6. Сотсков Н.И., Шнейдеров Г.Р., Медведев Ю.В., Метелев Ю.А., Терехова А.И., Соколов А.А. О поиске стали для высокопрочных болтов класса прочности 12.9 // Крепеж, клеи, инструмент. – № 2. – 2021. – С. 27–29.
7. Штеле В.Г., Маркевич И.В., Грязнов В.В., Попов А.Ю., Панков А.Ю. Разработка прогрессивной технологии штамповки высоких гаек // Машиностроение и машиноведение. Омский научный вестник. – № 2. – 2013. – С.66–69.
8. Конечно-элементное моделирование технологических процессов ковки и объемной штамповки: учебное пособие под ред. А.В. Власова / А.В. Власов, С.А. Стебунов, С.А. Евсюков, Н.В. Биба, А.А. Шитиков. – М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 383 с.
9. Мышечкин А.А., Юсупов В.С., Преображенская Е.В., Скрипник С.В. Моделирование процесса

горячей штамповки оправки прошивного стана // Сталь. – № 10. – 2022. – С. 30–34.

10. Мышечкин А.А., Юсупов В.С., Скрипник С.В. Определение оптимальных параметров процесса горячей объемной штамповки оправки прошивного стана моделированием в программе QFORM // Прокатное производство. Приложение к журналу «Технология металлов». – 2023. – № 21. – С. 9–16.

References

1. Ageyev V.S., Khusid R.G., Kuliev I.I. High-strength bolts with rolled thread for bridge construction. *Hardware*. No. 1, 2007, p. 62–66.
2. Filippov A.A., Pachurin G.V. Main directions of development of high-strength fasteners production. *International journal of applied and fundamental research*. 2014. No. 8-4. P. 30–35.
3. Ageyev V.S. Development of standards for high-strength fastener sets. *J. Fasteners, adhesives, tools*. 2012. No. 4. P. 21–24.
4. Myshechkin A.A., Osadchiy V.Ya. Machines and technology of hardware production. M., 2008, 469 p.
5. Lavrinenko V. Yu. Mathematical modeling of processes of cold bulk stamping of fasteners. *Metizy*, No 1, 2007, p. 66–69.
6. Sotskov N. I., Shneiderov G. R., Medvedev Yu. V., Metelev Yu. A., Terekhova A. I., Sokolov A. A. On the search for steel for high-strength bolts of strength class 12.9. *Fasteners, adhesives, tools*. No. 2, 2021, p. 27–29.
7. Shtele V.G., Markechko I.V., Gryaznov V.V., Popov A.Yu., Pankov A.Yu. Development of progressive technology for stamping high nuts. *Mechanical Engineering and Mechanical Engineering. Omsk Scientific Bulletin*, No. 2, 2013, p. 66–69.
8. Finite element modeling of forging and die forging processes: a tutorial edited by A.V. Vlasov / A.V. Vlasov, S.A. Stebunov, S.A. Evsyukov, N.V. Biba, A.A. Shitikov. – M.: Publishing House of the Moscow Higher Technical University named after N. E. Bauman, 2019. 383 p.
9. Myshechkin A. A., Yusupov V. S., Preobrazhenskaya E. V., Skripnik S. V. Modeling the process of hot stamping of a piercing mill mandrel. *Stal*, No. 10, 2022, p. 30–34.
10. Myshechkin A.A., Yusupov V.S., Skripnik S.V. Determination of optimal parameters of the process of hot volume stamping of a piercing mill mandrel by modeling in the QFORM program *Rolling production. Supplement to the journal “Technology of Metals”*. 2023. No. 21. P. 9–16.

Информация об авторах

Мышечкин Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры цифровых и аддитивных технологий, РТУ МИРЭА
myshechkin@mirea.ru

Зуев Владимир Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры цифровых и аддитивных технологий, РТУ МИРЭА
zuev.mirea@yandex.ru

Преображенская Елена Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры цифровых и аддитивных технологий, РТУ МИРЭА
preobr-elena@yandex.ru

Скрипник Сергей Васильевич – инженер кафедры цифровых и аддитивных технологий, РТУ МИРЭА
skripnick2014@yandex.ru

Information about the authors

Myshechkin Aleksey Aleksandrovich – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Digital and Additive Technologies”, MIREA – Russian Technological University
myshechkin@mirea.ru

Zuev Vladimir Valerievich – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Digital and Additive Technologies”, MIREA – Russian Technological University
zuev.mirea@yandex.ru

Preobrazhenskaya Elena Viktorovna – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Digital and Additive Technologies”, MIREA – Russian Technological University
preobr-elena@yandex.ru

Skripnik Sergey Vasilyevich – engineer at the department of “Digital and Additive Technologies”, MIREA – Russian Technological University
skripnick2014@yandex.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.