

Е.В. Преображенский¹, В.И. Галкин², Е.Е. Маркелов³

АЛГОРИТМ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ



¹Евгений Владимирович Преображенский,
Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)
Россия, Москва
Тел.: (499)141-9495, E-mail: preobrajenskiyev@gmail.com.



²Виктор Иванович Галкин,
Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)
Россия, Москва
Тел.: (499)141-9495, E-mail: galkinvi1801@yandex.ru.



³Егор Евгеньевич Маркелов,
Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)
Россия, Москва
Тел.: (499)141-9495, E-mail: markelov.egor2013@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы, связанные с автоматизацией проектирования формы поковки и штамповой оснастки. Предложен алгоритм, позволяющий в автоматизированном режиме получать геометрию поковки по контуру чистовой детали. Результаты показали, что при применении реализованного алгоритма эффективность разработки штампов существенно возрастает, а время проектирования сокращается до нескольких секунд. Созданное программное обеспечение может быть использовано как непосредственно инженерами-технологами на машиностроительных предприятиях, так и в научной и образовательной среде, в том числе для формирования исходных данных для обучения нейронных сетей, а также для развития у студентов навыков проектирования штамповой оснастки.

Ключевые слова: форма поковки, штамповая оснастка, автоматизация проектирования, разработка программного обеспечения, QForm, SolidWorks

Введение

Штампованные детали являются критически важными компонентами для продукции во множестве областей промышленности, включая автомобильную, аэрокосмическую и машиностроительную. Эксплуатационные качества получаемых изделий во многом зависят от технологии штамповки. При этом разработка формы поковки требует глубокого понимания свойств материалов, операций и параметров технологического процесса, принципов проектирования штамповой оснастки. Сложность решения данной задачи может стать препятствием для студентов и начинающих инженеров, а также снизить эффективность разрабатываемой технологии [1]. Следовательно, актуальным вопросом является создание новых программных инструментов для преодоления указанного разрыва между опытными и теоретическими знаниями. По этой причине целью данного исследования является реализация существующей потребности в новых алгоритмах и прикладных средствах, обеспечивающих удобный и понятный пользовательский интерфейс, интерактивное взаимодействие с пользователем и предоставление справочной информации, помогающей в пошаговом выполнении основных этапов проектирования штамповой оснастки.

В последние годы наблюдается повышенный интерес к программному обеспечению, которое способно быстро и точно проектировать штампы и форму поковки по чертежам исходной детали [2-5]. Спрос на данные продукты увеличивается не только со стороны производственных предприятий, но и от образовательных учреждений. Только в одной области обработки металлов давлением ежегодно появляются десятки новых перспективных технологий [6-9], поэтому обучение их особенностям и порядку учета всех влияющих факторов без наличия обширного опыта затруднительно. Следовательно, целесообразно разрабатывать и использовать компьютерные программы для автоматизации некоторой части операций, выполняемых инженером-технологом. В том числе это относится к проектированию штамповой оснастки для горячей объемной штамповки.

На процесс штамповки и качество получаемых деталей оказывают влияние сразу несколько факторов: правильный выбор предварительных переходов, технологических параметров и оборудования, размеров заготовки, формы ручья штампов, условий смазки и др. [10]. Большое внимание уделяется износу штамповой оснастки [11-13]. Таким образом,

при создании алгоритма для автоматизации проектирования штампов необходимо учитывать множество критериев, в том числе различие в марках материалов, размерах и конструктивных особенностях исходных деталей и т.п. С другой стороны, многообещающими представляются современные предложения по использованию искусственного интеллекта для помощи в разработке штамповой оснастки.

Авторами нескольких работ предлагались разнообразные подходы по получению ручьев штампов, в том числе на основе генетического алгоритма [14], с использованием метода опорных векторов [15], многокритериальной оптимизации [16]. Обращают на себя результаты, которые получены с использованием классификатора и баз знаний [17, 18], а также при помощи машинного обучения и, в частности, сверточных нейронных сетей [19, 20]. Исследования доказали возможность применения методов искусственного интеллекта для проектирования штампов, как минимум, при решении отдельных прикладных задач. Однако есть существенный недостаток использования нейронных сетей – сложность понимания их работы. Другими словами, во время обучения будущих специалистов целесообразнее детально пояснять причины выбора каждого элемента штамповой оснастки, а не руководствоваться выдаваемым нейронной сетью готовым ответом. Кроме того, длительность процесса расчета весовых коэффициентов нейронных сетей и необходимость иметь в наличии множества примеров с разработанной штамповой оснасткой (с подтвержденным бездефектным заполнением ручья штампов), препятствуют повсеместному внедрению приложений, основанных на искусственном интеллекте.

Стоит также отметить, что многие авторы применяют численное моделирование для оценки результатов проектирования и подтверждения правильности выбранных формы и размеров штампованных полуфабрикатов. Наиболее часто с этой целью используется метод конечных элементов [21]. На его базе создаются новые алгоритмы для определения оптимальной геометрии ручья штампов, например, с помощью анализа изотермических поверхностей [22] или на основе теории приспособляемости [23].

Существующие компьютерные алгоритмы и инструменты оказывают неоценимую поддержку при их использовании в образовательных целях и на производстве. Однако для наглядного объяснения принципов проектирования штампов, увеличения производительности технологической подготовки производства, а также для обучения универсальных нейронных сетей (вследствие требований по большому объему примеров в обучающем наборе) рациональнее использовать пошаговые алгоритмы для проектирования формы поковки по чертежу чистовой детали. Одним из них стал рассматриваемый в данном

исследовании программный код, объединяющий процессы разработки технологии штамповки на основе формирования геометрии поковки, проектирования штамповой оснастки и проверки модели методом конечных элементов.

Методы

Для разработки алгоритма по проектированию формы поковки и штамповой оснастки потребовалось решить ряд задач: изучить применяемые стандарты и справочную информацию по горячей объемной штамповке, проанализировать принципы построения элементов штампов, учесть технологические параметры, влияние свойств материалов, характеристик оборудования. Кроме того, для подтверждения получаемых результатов выполнялось моделирование в QForm, а также осуществлена экспериментальная штамповка детали "Втулка стопорная".

Предлагаемое программное обеспечение создавалось на основе промышленных стандартов в интегрированной среде разработки Visual Basic for Application. Такой выбор обеспечивает совместимость с существующими образовательными платформами, а также позволяет в любой момент времени проверить внесенные в электронные таблицы данные и используемые расчетные формулы. Дополнительным преимуществом является возможность использования программного интерфейса приложений API, благодаря которому осуществляется автоматизированное управление SolidWorks и QForm.

Алгоритм включал в себя последовательность из нескольких операций (рис. 1). В первую очередь, пользователь загружает чертеж чистовой детали (используется открытый формат файлов DXF), производится выделение потенциального контура. Затем задаются основные параметры процесса штамповки, т.е. выбирается оборудование, марка сплава, при необходимости редактируется положение плоскости разъема штампов и форма перемычки под прошивку отверстий. Далее выполняется упрощение геометрии, удаляются поднутрения детали. На следующем шаге определяются исходные размеры по полученному контуру. Затем рассчитывается предварительный исходный индекс согласно ГОСТ 7505-89. Начинается главный цикл, в котором по найденному исходному индексу назначаются припуски на механическую обработку, производится смещение контура, задаются штамповочные уклоны, вносятся корректировки в форму поковки с учетом требований стандартов. В соответствии с коэффициентом теплового линейного расширения формируется модель штампов с рассчитанной геометрией ручья и начальная заготовка по размерам поковки. Осуществляется проверка течения металла при штамповке с помощью метода конечных элементов в

QForm. При отсутствии дефектов запускается проектирование штамповой оснастки в SolidWorks. Алгоритм завершает работу выводом информации о коэффициенте использования материала (КИМ).

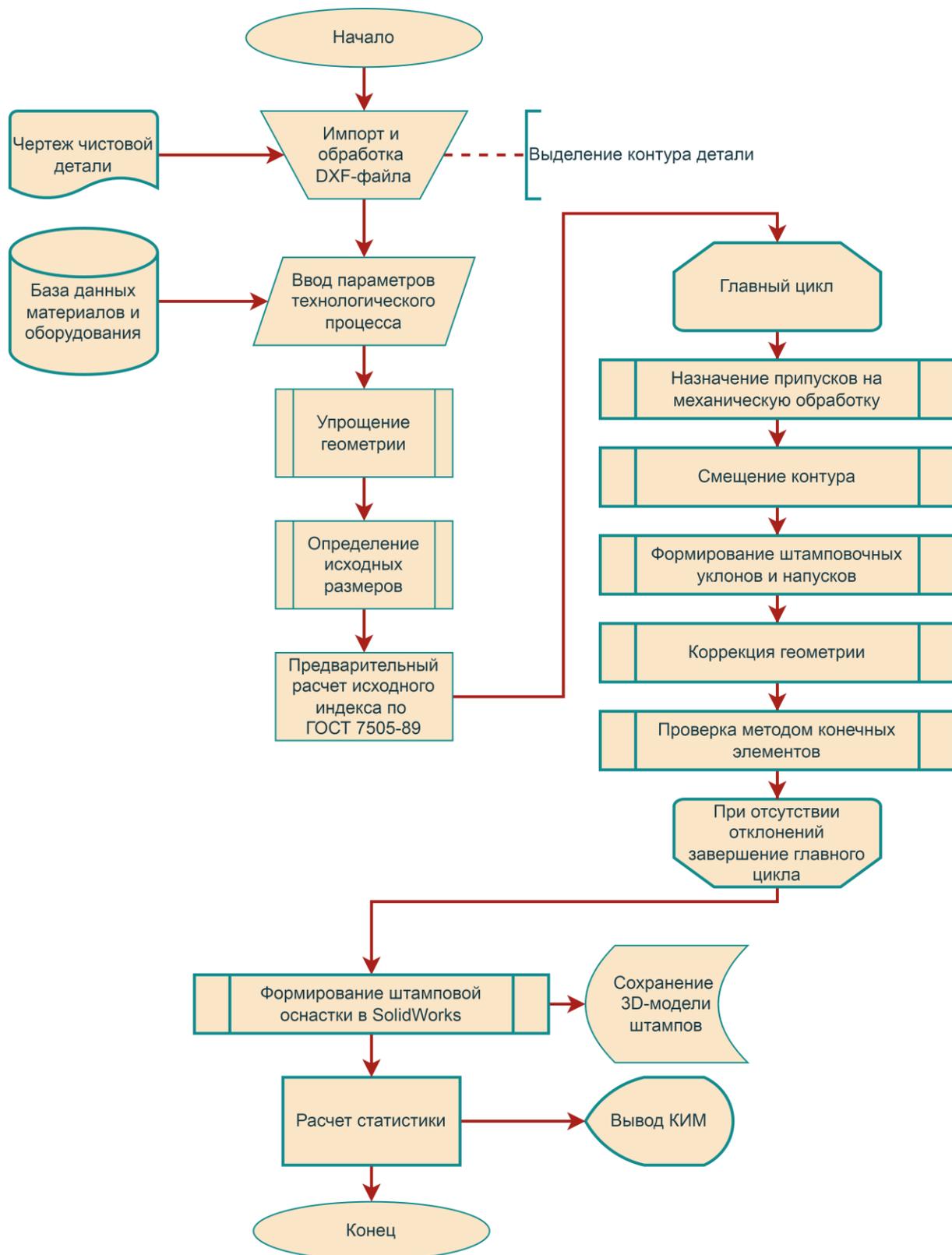


Рис. 1. Алгоритм проектирования формы поковки и штамповой оснастки

Основное отличие предлагаемого алгоритма заключается в выбранной последовательности операций и автоматическом изменении начальной геометрии на основе редактируемых правил. Преимуществом используемого подхода является пошаговое выполнение процедур обработки исходного контура детали, позволяющее не только ускорить и упростить проектирование штамповой оснастки, но и проанализировать влияние каждого из вносимых изменений на конечный результат. Данный алгоритм может быть использован для совершенствования существующих технологических процессов или при разработке новых технологий штамповки [24].

Для подтверждения работоспособности представленного решения применяли численное моделирование методом конечных элементов в программном обеспечении QForm v11.0.1 ("КванторФорм", Россия) и осуществляли проектирование штампов в системе SolidWorks ("Dassault Systèmes", Франция).

Экспериментальную проверку выполняли по разработанной с использованием предлагаемого алгоритма технологической схеме штамповки на паровоздушном молоте МА2143 с массой падающих частей 2 тонны. Материал деформируемой заготовки – сталь 12Х18Н10Т. Температура ее нагрева перед штамповкой составляла 1170°С. Вставки для молотовых штампов изготавливались из стали 5ХНМ.

Исследование структуры и механических свойств образцов, вырезанных из полученных поковок, осуществляли на промышленном томографе V|tome|x M300 (General Electric, США) и разрывной машине Instron (Illinois Tool Works Inc., США).

Результаты

Алгоритм для проектирования формы поковок позволил автоматизировать процесс разработки штамповой оснастки. Созданное на его основе программное обеспечение позволяет визуализировать выполняемые операции построения геометрии. Пользователям достаточно импортировать исходный чертеж чистой детали, ввести требуемые параметры горячей объемной штамповки – оборудование, марку материала и пр. – и сгенерировать на их основе допустимые формы поковок.

Кроме того, разработанный алгоритм оказывает неоценимую помощь при обучении технологиям штамповки: демонстрация промежуточных переходов и потенциальных дефектов позволяет выявить влияние сделанного выбора на конечные результаты. Например, насколько смена технологического оборудования (молота, КГШП, гидравлического прессы) или типа штамповки (облойная, безоблойная) приводят к изменениям

КИМ. Или как увеличение радиусов скруглений и штамповочных уклонов снижают риск возникновения дефектов и износа ручьев штампа.

Необходимо отметить, что в основе алгоритма лежат правила проектирования формы поковок, согласованные с ГОСТ. Это позволяет использовать приложение для нормоконтроля. Также интерфейс программного обеспечения предусматривает выбор между наиболее надежным исполнением геометрии ручьев штампов и более высоким КИМ. Данный компромисс соответствует стандартам и основан на возможности изменений в допустимых диапазонах отдельных параметров: штамповочных уклонов, радиусов скругления углов поковки, требований к точности ее изготовления, планируемой партии деталей и т.п.

Для примера рассмотрим проектирование с помощью разработанного алгоритма и приложения штамповой оснастки для производства детали "Втулка стопорная" из стали 12Х18Н10Т (рис. 2).

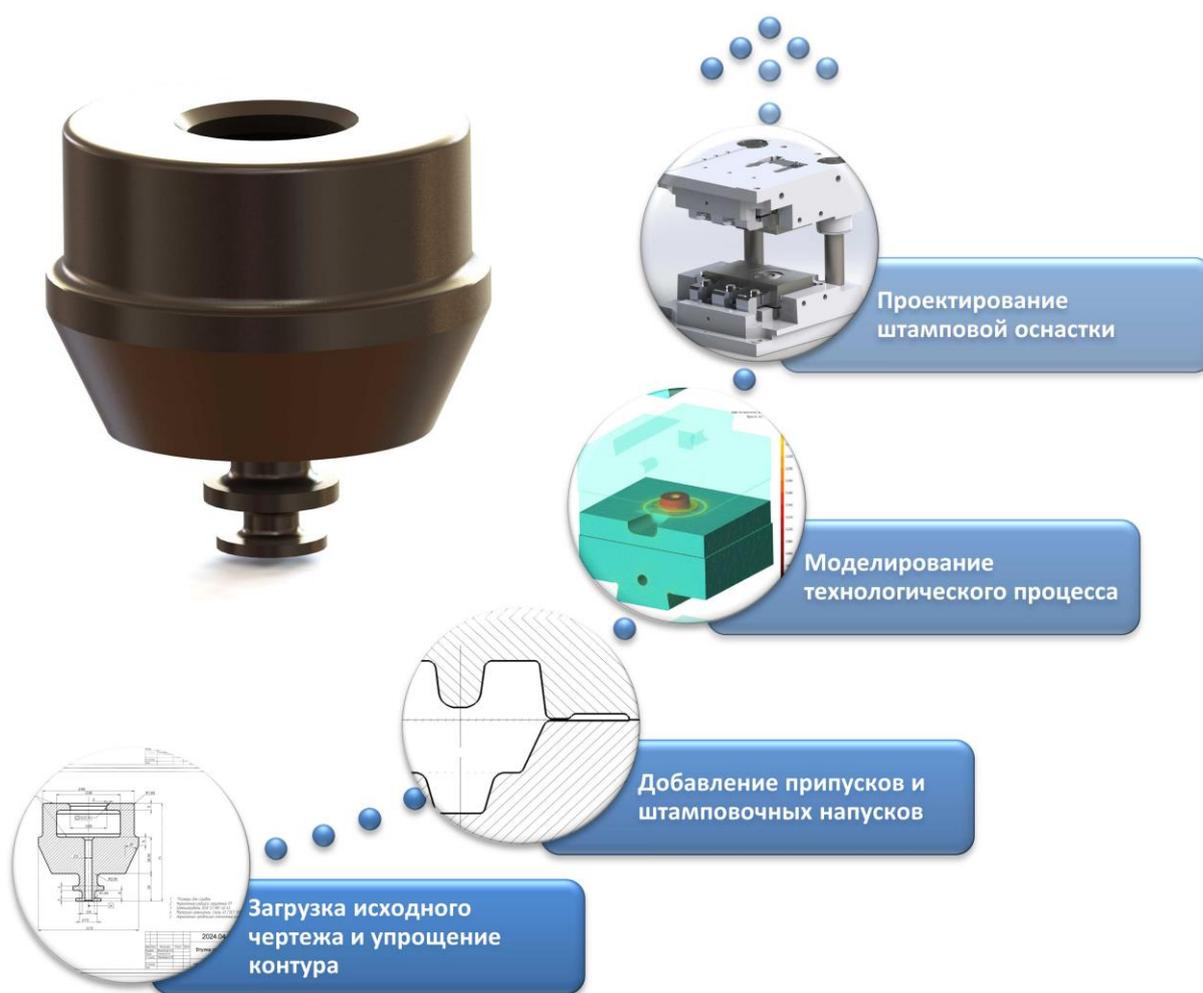


Рис. 2. Пример автоматизированного проектирования штамповой оснастки

После загрузки чертежа с исходной деталью и задания основных свойств, включающих требуемую шероховатость обрабатываемых

поверхностей, спроектирована форма холодной поковки. На её основе с учетом выбранного типа оборудования на следующем этапе работы предлагаемого алгоритма разработана модель штамповой оснастки и рассчитаны исходные размеры цилиндрической заготовки, которые затем использовались при моделировании процесса штамповки в QForm. Получив подтверждение об отсутствии дефектов (зажимов, недоштамповки, соответствия величины требуемой энергии молота), а также проанализировав износостойкость штампов, полученная форма поковки передана в SolidWorks. При помощи предварительно подготовленных 3D-моделей автоматически спроектирована штамповая оснастка и сформированы соответствующие ей сборочные чертежи.

Разработанное программное обеспечение позволило оперативно выполнить проектирование штамповой оснастки и ускорило получение необходимой технической документации (чертежей). Кроме того, формирование 3D-модели штамповых вставок упростило их производство на станках с ЧПУ.

Для проверки разработанной формы поковок и штампов на основе информации, полученной в ходе работы алгоритма, проведена экспериментальная штамповка. Получена опытная партия из 110 деталей "Втулка стопорная" из стали 12Х18Н10Т. После окончания штамповки заметных следов износа на зеркале штампа не обнаружено (рис. 3).



Рис. 3. Отсутствие следов износа на ручье штампа после изготовления запланированной партии поковок

Часть полученных поковок (после термообработки – закалки с 1080°C в воду) исследовали на механические свойства. Вырезанные образцы подвергали растяжению на разрывной машине. Предел прочности составил $\sigma_B = 520..534$ МПа, что соответствует требованиям ГОСТ 25054-81. Для оценки структуры металла, отсутствия внутренних складок и пустот проводили компьютерную томографию. Результаты подтвердили высокое качество поковок (рис. 4).

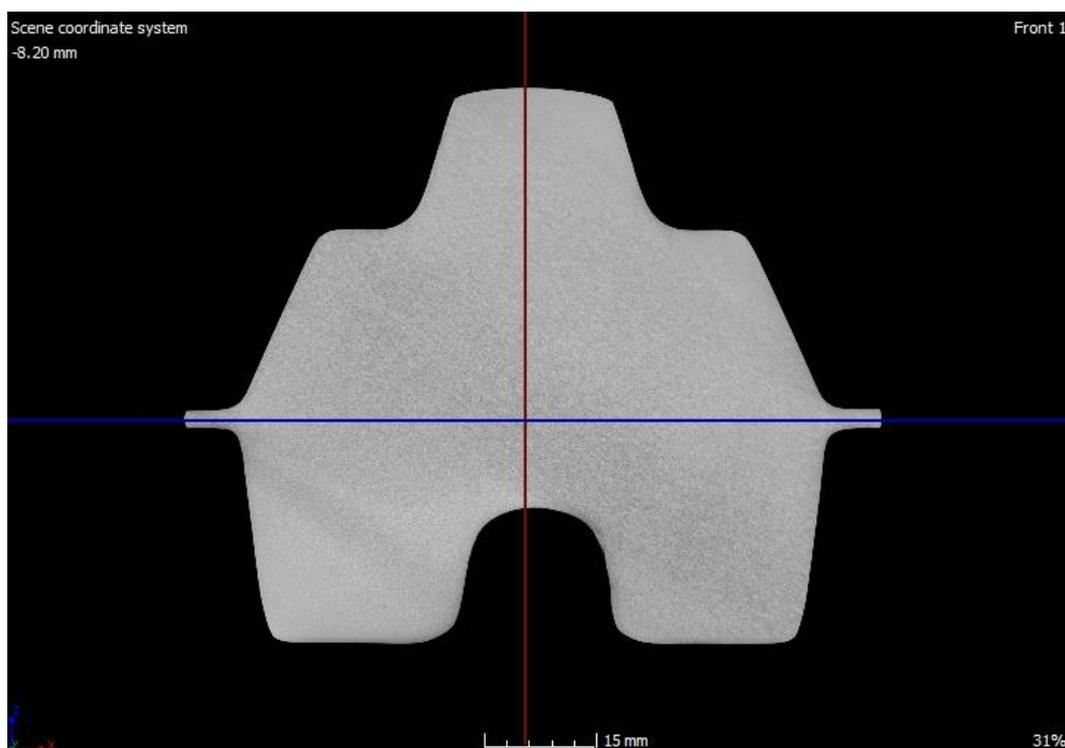


Рис. 4. Результаты исследования внутренней структуры поковки с помощью компьютерной томографии

Таким образом, предлагаемый алгоритм доказал свою применимость для проектирования формы поковок и штамповой оснастки. При этом он показал высокую эффективность как по сокращению сроков разработки технологического процесса штамповки, так и по качеству получаемых поковок.

Обсуждение

Представленный алгоритм выполняет быстрое проектирование штамповой оснастки и обладает несколькими дополнительными преимуществами. Так, скорость работы приложения позволяет сократить время на выбор окончательных размеров поковки и создание чертежей, т.е. позволяет начинающим инженерам или обучающимся студентам больше внимания уделять принципам проектирования штампов, облегчает

понимание взаимосвязи между теоретическими знаниями технологии штамповки и их практическим применением. Соблюдается высокая точность назначаемых припусков и допусков. Автоматизированное использование разработанной формы поковки на протяжении всей работы алгоритма обеспечивает непротиворечивость данных, т.е. снижение вероятности ошибок при передаче геометрии для численного моделирования или создания модели оснастки. Также приложение дает возможность накопить практический опыт за счет большого числа предлагаемых вариантов поковок, при этом наглядно отображая, как задаваемые изначально параметры влияют на течение металла в процессе штамповки. Доступность подготовленных шаблонов для проектирования универсальных блоков штампов позволяет улучшить квалификационные навыки инженера-технолога. Наконец, открытый исходный код допускает внесение правок в случае необходимости, тем самым могут быть решены новые специфические задачи из области штамповки.

Однако необходимо отметить, что на данный момент времени приложение не предусматривает расчет и проектирование штампов для промежуточных переходов. С другой стороны, существуют сторонние приложения, которые на основе окончательной формы поковки путем моделирования подбирают рациональные ручки для предварительной штамповки, например, QFormDirect [25]. Кроме того, как уже отмечалось, подобная задача решается и с использованием нейронных сетей.

Подчеркнем, что приложение является эффективным инструментом для подготовки исходных данных для дальнейшего обучения нейронных сетей. Один из возможных способов использования алгоритма заключается в получении большого набора данных в виде изображений оснастки и результатов моделирования. Тем самым, появляются предпосылки для определения при помощи нейронных сетей закономерностей между геометрией чистовой детали и оптимальной формой поковки.

Таким образом, важность представленного алгоритма заключается в широкой области его использования: от подготовки данных для нейронных сетей и обучения студентов до применения в качестве профессионального инструмента при разработке промышленной технологии получения деталей горячей объемной штамповкой.

Заключение

Предложенный в данном исследовании алгоритм позволяет автоматизировать процесс проектирования штамповой оснастки, существенно повышая производительность технологической подготовки производства для предприятий, занимающихся технологией объемной горячей штамповки. Шаги алгоритма включают: упрощение геометрии,

определение размеров и припусков, добавление штамповочных уклонов и радиусов скруглений, проверку и коррекцию формы поковки. Использование жестко регламентированной последовательности процедур обеспечивает высокую точность результатов, наглядность и понятность для обучения специалистов.

Эффективность программного обеспечения, разработанного на основе представленного алгоритма, подтверждена в ходе математического моделирования и экспериментальной проверки. Продемонстрирована возможность получения геометрии штамповой оснастки, обеспечивающей изготовление качественных поковок и высокую износостойкость ручьев штампа. Опытная партия штамповок не имеет дефектов и соответствует регламентирующим требованиям.

В качестве дополнительного практического применения предлагается использовать разработанное программное обеспечение в процессе обучения студентов: интерактивный интерфейс существенно упрощает проектирование и в режиме реального времени отображает влияние изменяемых параметров на форму поковки. Другим направлением использования является создание набора данных для обучения искусственных нейронных сетей. Для решения этой задачи применяется автоматический режим проектирования.

Таким образом, разработанное приложение является многофункциональным, оно предназначено для автоматизации проектирования формы поковок и штамповой оснастки, ускорения инженерных расчетов при разработке технологии штамповки, выполняет образовательную роль, а также обеспечивает формирование выборки для нейронных сетей. Кроме того, планируются дальнейшие улучшения алгоритма для расширения области применения, в том числе для охвата технологических процессов, связанных с проектированием сложных поковок. В целом, разработанное программное обеспечение является перспективным инструментом для повышения эффективности работы инженеров-технологов и для подготовки кадров в образовательных учреждениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гасюк Д.П., Косова В.А. Проблема выбора оптимального варианта технологического процесса изготовления продукции машиностроения в современных условиях // Современное машиностроение: наука и образование 2022: материалы 11-й Международной научной конференции, 23 июня 2022 г. / под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. с. 341-354

- [2] Замаараева Ю.В., Кныш Л.И., Гайсин Е.М. Опыт применения моделирования горячей объемной штамповки в условиях производства ОАО "КУМЗ". //Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2023. № 5. С. 69-82.
- [3] Hedicke-Claus, Y., Kriwall, M., Stonis, M. et al. Automated design of multi-stage forging sequences for die forging. *Prod. Eng. Res. Devel.* 17, 689–701 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01190-x>
- [4] Rossen R. Preform necessity and preform design at hot closed-die forging – a general design approach *E3S Web of Conf.* 452 06030 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345206030>
- [5] Mathala R., Ajit P., Manoj K. Die design optimization for improvement of hot forging die life. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering.* 2023 <https://doi.org/10.1177/09544089231190751>.
- [6] Кузнецов П.А., Кузнецов Р.В., Лепетан К.В. Пресс-формы и оборудование для эластостатического прессования изделий из порошков // Современное машиностроение: наука и образование 2023: материалы 12-й Международной научной конференции, 22 июня 2023 г. / под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023, с. 451-463
- [7] Wangchuk, S., Madan, A. Recent Advances in Various Types of Forging - A Research Review. *International Journal of Science and Research*, 2021, 11. 980-982. <https://doi.org/10.21275/SR2111161855>
- [8] Преображенский Е.В., Галкин В.И., Палтиевич А.Р., Галкин Е.В. Применение искусственного интеллекта для анализа процесса изготовления лейнера. //Металлы. 2023, №1, с. 84-92
- [9] Мамутов В.С., Мамутов А.В., Арсентьева К.С., Калатозишвили И.В. Кавитация воды при электрогидроимпульсной штамповке // Современное машиностроение: наука и образование 2023: материалы 12-й Международной научной конференции, 22 июня 2023 г. / под ред. А. Н. Евграфова, А. А. Поповича. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023, с. 464-475
- [10] Sharma S., Sharma M., Gupta V., Singh J. A systematic review of factors affecting the process parameters and various measurement techniques in forging processes. *Steel research international.* 2022, 94. <https://doi.org/10.1002/srin.202200529>.
- [11] Alessio A., Antonelli D., Doglione R. et al. Application of design of experiments to forging simulations to increase die life expectancy. *Int J Interact Des Manuf* 17, 1351–1361 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12008-022-01137-z>
- [12] Abd AL-Kareem A., Ibrahim M., Adnan I., Allow M.A. Improvement of forging die life by failure mechanism analysis. *Journal of the Mechanical*

- Behavior of Materials, vol. 30, no. 1, 2021, pp. 309-317. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2021-0034>
- [13] Behrens B.-A., Brunotte K., Wester H., Rothgänger M., Müller F. Multi-Layer Wear and Tool Life Calculation for Forging Applications Considering Dynamical Hardness Modeling and Nitrided Layer Degradation. *Materials* 2021, 14, 104. <https://doi.org/10.3390/ma14010104>
- [14] Kampen D., Richter J., Blohm T. et al. Design of a genetic algorithm to preform optimization for hot forging processes. *Int J Mater Form* 13, 77–89 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01469-4>
- [15] Okamoto R., Umeda M., Mure Y., Katamine K., Imanaga K. Optimization Support Method for Cold and Warm Forging Dies of Non-axisymmetrical Forged Products. In: Mocellin, K., Bouchard, P.O., Bigot, R., Balan, T. (eds) *Proceedings of the 14th International Conference on the Technology of Plasticity - Current Trends in the Technology of Plasticity. ICTP 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham., 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41023-9_1
- [16] Wang J., Wang Z., Xu W. et al. Multi-objective optimization of forging surface structure parameters of radial forging die with cycloidal. *Int J Adv Manuf Technol* 129, 5709–5727 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12629-x>
- [17] Xu J., Zhao J., Bian S., Shan D., Xu W. A Case-Based Reasoning System Combining Expert Knowledge for Automated Design of Multi-Pass Hot Forging for Hub Bearings. In: Mocellin, K., Bouchard, P.O., Bigot, R., Balan, T. (eds) *Proceedings of the 14th International Conference on the Technology of Plasticity - Current Trends in the Technology of Plasticity. ICTP 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41023-9_12
- [18] Matsunaga K., Umeda M., Mure Y., Katamine K. Knowledge-based Design Method of Forging Dies based on the Stereotypes of Die Structures and the Functions of Forming Surfaces. *Procedia Manufacturing*. 2020. 50. 475-482. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.086>.
- [19] Lee, S., Kim, K., and Kim, N. A Preform Design Approach for Uniform Strain Distribution in Forging Processes Based on Convolutional Neural Network. *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.* December 2022; 144(12): 121004. <https://doi.org/10.1115/1.4054904>
- [20] Kodippili T., Lambert S., Arami A. Data-driven prediction of forging outcome: Effect of preform shape on plastic strain in a magnesium alloy forging, *Materials Today Communications*, Volume 31, 2022, 103210, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103210>.
- [21] Liu, C., Xu, W., Wang, Y. et al. Optimal design of preform shape based on EFA-FEM-GA integrated methodology. *Int J Mater Form* 14, 1043–1056, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12289-021-01620-0>

- [22] Власов А.В., Кривенко Д.В., Стебунов С.А., Биба Н.В., Дюжев А.М. Проектирование предварительных переходов при осевой горячей объемной штамповке методом изотермических поверхностей. Часть 2. Особенности применения метода изотермических поверхностей для сложных поковок. //Заготовительные производства в машиностроении. 2021. Т. 19. № 6. С. 268-272.
- [23] Носов Н.В. Технология проектирования сложных штампов на основе теории приспособляемости //Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 24, № 3, 2022, с. 47-52. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2022-24-3-47-52>
- [24] Маркелов Е.Е., Преображенский Е.В., Гончаров В.В., Галкин В.И. К вопросу совершенствования технологии горячей объёмной штамповки при изготовлении поковок для деталей ракетно-космической техники //Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 4 (62). С. 111-117.
- [25] Власов А.В., Биба Н.В., Стебунов С.А., Дюжев А.М., Кенжалиев К.А. Опыт использования QFormDirect для проектирования предварительных переходов при горячей объемной штамповке. //Заготовительные производства в машиностроении. 2022. Т. 20. № 11. С. 501-506.

E.V. Preobrazhenskii, V.I. Galkin, E.E. Markelov

ALGORITHM FOR AUTOMATING THE DESIGN OF FORGING DIES

Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia

Abstract

The paper considers the issues related to the automation of design of the forgings shape and forging dies. The algorithm that allows obtaining forging geometry along the contour of the finishing part in the automated mode is proposed. The results show that when the implemented algorithm is applied, the efficiency of die design increases significantly, and the time required is reduced to a few seconds. The developed software can be used both directly by mechanical engineers at machine-building enterprises, and in scientific and educational environments, including the formation of initial data for training neural networks, as well as for the improvement of students' skills in the design of forging dies.

Key words: forgings shape, forging dies, design automation, software development, QForm, SolidWorks

REFERENCES

- [1] Gasyuk, D.P., Kosova, V.A. (2023). The Problem of Selecting the Optimal Kind of Mechanical Engineering Process Under Modern Conditions. In: Evgrafov, A.N. (eds) *Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30027-1_2
- [2] Zamaraeva Yu. V., Knysh L. I., Gaisin E. M. Experience in the Application of Simulation of Hot Forging in Production Conditions at the Kumw Jsc // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. - 2023. - Iss. 5. - P. 69-82. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2023.5.069-082>
- [3] Hedicke-Claus, Y., Kriwall, M., Stonis, M. et al. Automated design of multi-stage forging sequences for die forging. *Prod. Eng. Res. Devel.* 17, 689–701 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01190-x>
- [4] Rossen R. Preform necessity and preform design at hot closed-die forging – a general design approach *E3S Web of Conf.* 452 06030 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345206030>
- [5] Mathala R., Ajit P., Manoj K. Die design optimization for improvement of hot forging die life. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2023 <https://doi.org/10.1177/09544089231190751>.
- [6] Kuznetsov, P.A., Kuznetsov, R.V., Lepetan, K.V. (2024). Development Prospects of Dies and Equipment for Elastostatic Pressing of Products from Powders. In: Evgrafov, A.N. (eds) *Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1_19
- [7] Wangchuk, S., Madan, A. Recent Advances in Various Types of Forging - A Research Review. *International Journal of Science and Research*, 2021, 11. 980-982. <https://doi.org/10.21275/SR2111161855>
- [8] Preobrazhenskii, E.V., Galkin, V.I., Paltievich, A.R. et al. Use of Artificial Intelligence to Analyze Liner Production. *Russ. Metall.* 2023, 76–83 (2023). <https://doi.org/10.1134/S0036029523010123>
- [9] Mamutov, V.S., Mamutov, A.V., Arsentyeva, X.S., Kalatozishvili, I.V. (2024). Water Cavitation During Electrohydropulse Stamping. In: Evgrafov, A.N. (eds) *Advances in Mechanical Engineering. MMESE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48851-1_20
- [10] Sharma S., Sharma M., Gupta V., Singh J. A systematic review of factors affecting the process parameters and various measurement techniques in forging processes. *Steel research international*. 2022, 94. <https://doi.org/10.1002/srin.202200529>.

- [11] Alessio A., Antonelli D., Doglione R. et al. Application of design of experiments to forging simulations to increase die life expectancy. *Int J Interact Des Manuf* 17, 1351–1361 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12008-022-01137-z>
- [12] Abd AL-Kareem A., Ibrahim M., Adnan I., Allow M.A. Improvement of forging die life by failure mechanism analysis. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, vol. 30, no. 1, 2021, pp. 309-317. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2021-0034>
- [13] Behrens B.-A., Brunotte K., Wester H., Rothgänger M., Müller F. Multi-Layer Wear and Tool Life Calculation for Forging Applications Considering Dynamical Hardness Modeling and Nitrided Layer Degradation. *Materials* 2021, 14, 104. <https://doi.org/10.3390/ma14010104>
- [14] Kampen D., Richter J., Blohm T. et al. Design of a genetic algorithm to preform optimization for hot forging processes. *Int J Mater Form* 13, 77–89 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01469-4>
- [15] Okamoto R., Umeda M., Mure Y., Katamine K., Imanaga K. Optimization Support Method for Cold and Warm Forging Dies of Non-axisymmetrical Forged Products. In: Mocellin, K., Bouchard, P.O., Bigot, R., Balan, T. (eds) *Proceedings of the 14th International Conference on the Technology of Plasticity - Current Trends in the Technology of Plasticity. ICTP 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham., 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41023-9_1
- [16] Wang J., Wang Z., Xu W. et al. Multi-objective optimization of forging surface structure parameters of radial forging die with cycloidal. *Int J Adv Manuf Technol* 129, 5709–5727 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12629-x>
- [17] Xu J., Zhao J., Bian S., Shan D., Xu W. A Case-Based Reasoning System Combining Expert Knowledge for Automated Design of Multi-Pass Hot Forging for Hub Bearings. In: Mocellin, K., Bouchard, P.O., Bigot, R., Balan, T. (eds) *Proceedings of the 14th International Conference on the Technology of Plasticity - Current Trends in the Technology of Plasticity. ICTP 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41023-9_12
- [18] Matsunaga K., Umeda M., Mure Y., Katamine K. Knowledge-based Design Method of Forging Dies based on the Stereotypes of Die Structures and the Functions of Forming Surfaces. *Procedia Manufacturing*. 2020. 50. 475-482. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.086>.
- [19] Lee, S., Kim, K., and Kim, N. A Preform Design Approach for Uniform Strain Distribution in Forging Processes Based on Convolutional Neural Network. *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.* December 2022; 144(12): 121004. <https://doi.org/10.1115/1.4054904>

- [20] Kodippili T., Lambert S., Arami A. Data-driven prediction of forging outcome: Effect of preform shape on plastic strain in a magnesium alloy forging, *Materials Today Communications*, Volume 31, 2022, 103210, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103210>.
- [21] Liu, C., Xu, W., Wang, Y. et al. Optimal design of preform shape based on EFA-FEM-GA integrated methodology. *Int J Mater Form* 14, 1043–1056, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12289-021-01620-0>
- [22] Vlasov A.V., Krivenko D.V., Stebunov S.A., Biba N.V., Dyujev A.M. Preform design in axial hot closed die forging by isothermal surface method. Part 2. Application of isothermal surfaces method for complex shape forgings // *Blanking productions in mechanical engineering*, 2021, vol. 19, N6, pp. 268-272. <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2021-19-6-268-272>
- [23] Nosov N.V. Design technology of complex dies on the basis theory of adaptability. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiskoi akademii nauk* v.24, N3, 2022, pp. 47-52. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2022-24-3-47-52>
- [24] Markelov E.E., Preobrazhenskii E.V., Goncharov V.V., Galkin V.I. On the issue of improving the technology of hot forging in the manufacture of parts of rocket and space equipment. *Vestnik «NPO imeni S.A. Lavochkina»*, 2023, N 4 (62), pp. 111-117.
- [25] Vlasov A.V., Biba N.V., Stebunov S.A., Dyujev A.M., Kenjaliev K.A. Experience of QFormDirect software implementation for preform impressions design in hot closed die forging // *Blanking productions in mechanical engineering*. 2022. Vol. 20. N 11. pp. 501-506. <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2022-20-11-501-506>