

УДК 621.73.043

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОРМЫ ПОКОВОК ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛЕЙ

©2024 г. **В.И. Галкин, Е.В. Преображенский, А.Р. Палтиевич,  
Е.Е. Маркелов, Е.В. Галкин**

*ФГБОУ ВО Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет) — МАИ (НИУ), Москва  
E-mail: galkinvi1801@yandex.ru*

*Поступила в редакцию 7 марта 2024 г.  
После доработки 16 апреля 2024 г. принята к публикации 26 апреля 2024 г.*

Представлено новое программное обеспечение, разработанное с учетом государственных стандартов, а также рекомендаций из справочных материалов и позволяющее упростить операции при проектировании штамповой оснастки на этапе предварительной подготовки производства деталей, получаемых горячей объемной штамповкой. При разработке чертежа поковки инженер-технолог, зная геометрические размеры готового изделия, параметры оборудования, режимы обработки и прочее, должен назначить припуски на механическую обработку, а также напуски, включая штамповочные уклоны, перемычку под прошиваемое отверстие, форму облойной канавки. В предлагаемом варианте автоматизации проектирования штамповой оснастки выполнение указанных операций многократно ускорено, т.е. в итоге значительно облегчается процесс подбора окончательной формы штамповки.

*Ключевые слова: автоматизированное проектирование; штамповая оснастка; чертеж поковки; разработка программного обеспечения; горячая объемная штамповка; система CAD; программа CAE; язык программирования VBA; программный комплекс QFort; программный комплекс SolidWorks.*

Осесимметричные детали, получаемые штамповкой, нашли широкое применение практически во всех отраслях промышленности, от машиностроения до авиации и космонавтики. Например, более трети изделий, обрабатываемых на металлорежущих станках для тяжелого машиностроения, являются осесимметричными [1]. К ним относятся разнообразные валы, зубчатые колеса, обоймы подшипников, втулки и пр. (фиг. 1).

При этом для производства осесимметричных деталей весьма эффективно использовать штамповку, в том числе вследствие дополнительных преимуществ: упрощается разработка технологического процесса, увеличивается коэффициент использования материала (КИМ), уменьшается время последующей механообработки, улучшается качество изделий за счет обеспечения требуемых структуры и свойств материала. Однако, несмотря на наличие современных CAD/CAM/CAE-систем, позволяющих ускорить и авто-

матизировать разработку многих операций на этапах жизненного цикла изделия, для создания чертежа горячей поковки пока нет универсального средства. При этом проектирование формы поковки (и ручья штампа) остается одной из не только относительно трудоемких, но и весьма актуальных задач [2]. Важность разработки чертежа штамповки заключается в том, что каждый шаг, выполняемый на данном этапе инженером-технологом или конструктором штампов, обеспечивает получение детали с предусмотренными размерами, без дефектов, легко извлекаемой из рабочей оснастки. Кроме того, правильный выбор линии разреза штампов, назначение припусков на механическую обработку, напусков, штамповочных уклонов и радиусов скруглений — шаги, обеспечивающие достижение высокого КИМ, повышение эксплуатационных характеристик изделия и снижение себестоимости его изготовления [3].



Фиг. 1. Примеры осесимметричных деталей и поковок

Сложность подбора указанных параметров заключается еще и в том, что разработка чертежа поковки осуществляется методом проб и ошибок, когда анализируется множество вариантов и получение однозначного оптимального решения затруднительно. Тем более что в качестве целевой функции могут рассматриваться несколько задач: повышение КИМ, увеличение производительности процесса, уменьшение износа оснастки, снижение себестоимости изготовления детали и пр. При этом в большинстве случаев требуется обеспечить равномерное течение металла, отсутствие складок, прострелов, поверхностных дефектов. Следовательно, необходима проверка разработанного варианта штампа численным моделированием, выполняемая обычно методом конечных элементов на современных предприятиях [4]. Также стоит отметить выбор оборудования и технологических параметров процесса, от которых зависят форма поковки и число переходов. Таким образом, трудоемкость разработки чертежей штамповок крайне высока, а средств для автоматизации данного процесса пока недостаточно.

Для проектирования формы стальной поковки по чистой детали обычно используют ГОСТ 7505—89 и справочники. Поскольку для математического моделирования и создания штампов на станках с ЧПУ (числовое программное управление) требуется файл с геометрией, применяют системы автоматизированного проектирования (САПР) [5]. Например, в программе SolidWorks есть

инструмент «литейные формы», позволяющий ускорить процесс разработки штамповой оснастки [6]. Однако большую часть операций необходимо выполнять вручную, к тому же он не учитывает особенности национального стандарта.

Впрочем, к настоящему времени уже разработано несколько методик для автоматизации построения ручьев штампов. Так, для дисков авиационных газотурбинных двигателей предложен способ подбора формы поковки, включающий оптимизацию на основе В-сплайнов (базисный сплайн), метода конечных элементов и генетического алгоритма [7]. При этом учитываются объем и сложность исходной геометрии детали, а также степень деформации в разных зонах. В результате удалось показать, что полученные данным методом штамповки детали имеют достаточно однородную микроструктуру, в них отсутствуют дефекты, ручей полностью заполняется металлом, а величина облоя ограничена заданным значением.

Подход, рассматриваемый в работе [8], опирается на разделение исходной детали плоскостями сечений и сдвиг полученных точек. Авторы разработали классификатор, позволяющий применять соответствующие алгоритмы для разных исходных типов деталей. Кроме того, с помощью нейронных сетей и нечеткой логики предусмотрено определение числа переходов. Таким образом, создается геометрия штампов для предварительной и окончательной штамповки. Разработанные переходы проверялись методом

конечных элементов, с помощью которого подтвердили отсутствие дефектов и полное заполнение ручья.

Представляет практический интерес способ получения промежуточных форм поковок на основе конформного отображения [9] и эллиптического анализа Фурье [10].

В предложенных методиках предусмотрен контроль величины деформации и распределения материала в полости ручья предварительных штампов на основе вычисляемого набора параметров, в том числе коэффициента формы. Результаты подтверждены моделированием процесса штамповки сложных деталей в 3D-постановке.

Еще один способ проектирования штамповочных переходов предложен разработчиками программы QFormDirect [11]. На основе метода конечных элементов, интегрированного с САПР, осуществляется поиск ключевых изотермических поверхностей для уравнения Лапласа, т.е. определения оптимальных путей перехода от исходной геометрии заготовки к форме поковки. Далее формируется блок штампов с необходимыми ручьями. Метод показал высокую эффективность при проверке на технологических процессах нескольких промышленных предприятий.

Важно отметить и развитие искусственного интеллекта. С помощью сверхточных нейронных сетей [12] удалось по исходной геометрии спроектировать штамповочные переходы. Обучение проводилось на основе опытных данных по разработкам инженеров-технологов. Полученная нейронная сеть позволяет работать как с 2D-, так и с 3D-моделями. Во всех рассмотренных случаях спроектированная сеть оснастка обеспечила реализацию процесса штамповки с минимальным усилием, получение штамповок без складок металла, доказав надежность данного подхода для штамповочного производства.

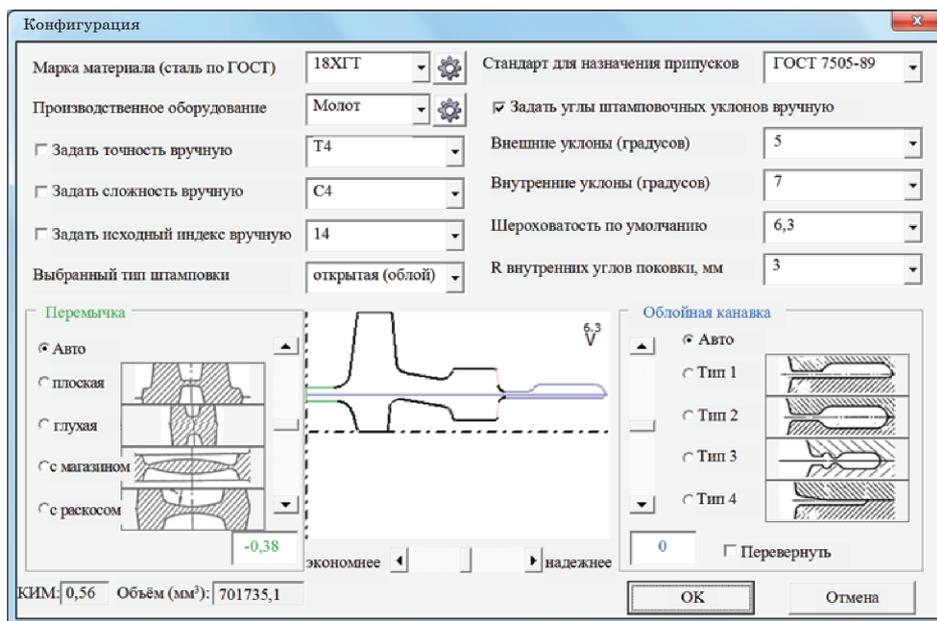
Таким образом, многие российские и зарубежные исследователи занимаются автоматизацией процесса разработки ручьев для штамповочных переходов. При этом имеющаяся возможность осуществлять проверку предложенной формы поковки с помощью метода конечных элементов позволяет не только предсказать качество изделия, но и сформировать базу для обучения будущих нейронных сетей. Кроме того, известно, что этап проектирования составляет до 10% себестоимости изделия, однако он же опреде-

ляет до 80% стоимости производства [13]. Поэтому для отрасли предлагаемый подход с разработкой нового программного обеспечения (ПО) является весьма значимым.

**Материалы и методика эксперимента.** Разработка ПО для автоматизации проектирования поковок осуществлялась в среде Visual Basic for Application. Такой выбор обусловлен, с одной стороны, доступностью данного языка (его поддержка установлена в приложениях MS Office и ПО SolidWorks), а с другой, возможностью быстро корректировать код. Пользователь может самостоятельно проверить в соответствующих таблицах значения припусков и допусков на размеры, а также иные заданные параметры, например, допустимую глубину отверстия до перемычки. В будущих версиях планируется скомпилировать приложение в среде C++ для ускорения алгоритмов, осуществляющих обработку геометрических примитивов.



Фиг. 2. Схема общего алгоритма для проектирования поковки



Фиг. 3. Интерфейс программы для изменения настроек по проектированию поковки

Работа с приложением включает в себя несколько этапов (фиг. 2). Пользователь загружает чертеж чистой детали, указывает материал заготовки и используемое оборудование. Затем выполняются алгоритмы по проектированию формы поковки: в соответствии с ГОСТ 7505—89 назначаются припуски, напуски и допуски.

Разрабатываемое ПО содержит пополняемые базы данных материалов и оборудования. При загрузке чертежа исходной детали используемый сплав и размеры детали учитываются для выбора производственного оборудования. Принимаются во внимание возможное усилие штамповки, габариты межштампового пространства и КИМ. Проектируется только окончательный переход.

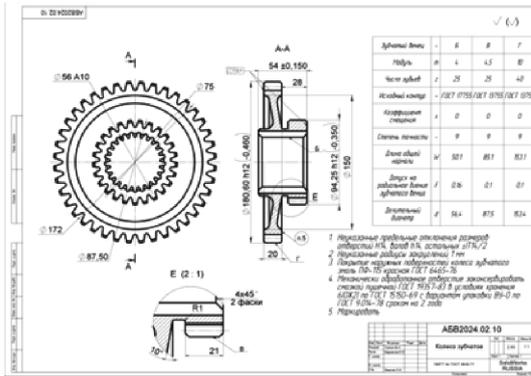
При необходимости пользователь может настроить параметры собственного оборудования, указать класс точности, положение линии разъема и перемычки (при наличии отверстия в исходной детали), штамповочные уклоны, радиусы скруглений (фиг. 3).

В качестве исходных данных брались чертежи чистовых деталей и поковок из справочников [14, 15] а также примеры из ГОСТ 7505—89. Сравнивалась точность определения геометрии, назначенные размеры, допуски. Кроме того, поскольку в разрабатываемое ПО добавлена функция для проектирования оснастки, полученная форма ручья использовалась для численной проверки методом конечных элементов. С этой целью при-

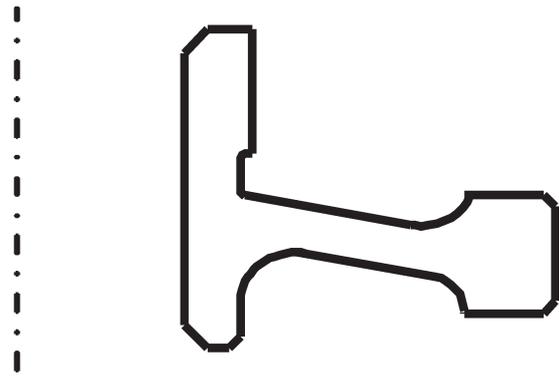
менялся комплекс QForm v10.2 [16], в том числе интерфейс взаимодействия QFormAPI, позволяющий управлять с помощью программного кода различными настройками в автоматическом режиме. Моделирование проводилось в 2D-постановке. При обнаружении дефектов по результатам анализа пользователю предлагались варианты по их устранению. После проверки разработанная форма поковки передавалась в систему SolidWorks для формирования штамповой оснастки.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Основное внимание при разработке ПО для проектирования поковок было направлено на соблюдение стандартов. Однако, поскольку описание облойной канавки и перемычки в ГОСТе отсутствует, использовались рекомендации из найденных в открытых источниках публикаций [14, 17].

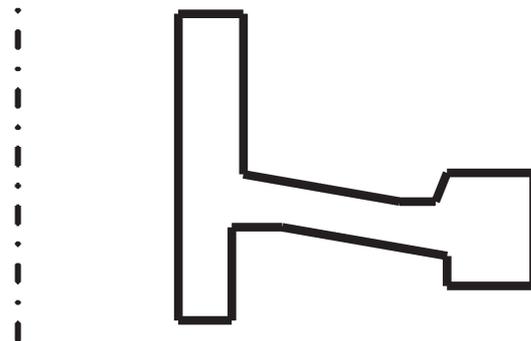
Для упрощения работы пользователя помимо импорта геометрии детали из dxf-файлов (открытый формат, изначально разработанный для AutoCAD и ныне поддерживаемый большинством САПР) предусмотрена функциональность, обеспечивающая выбор линии симметрии, указание контура чистой детали, выполнение поворота, зеркального отражения и пр. Следовательно, технолог может быстро проверить возможные варианты расположения поковки в ручье штампа с учетом требуемых эксплуатационных характеристик (направление волокон металла, ожидаемая структура).



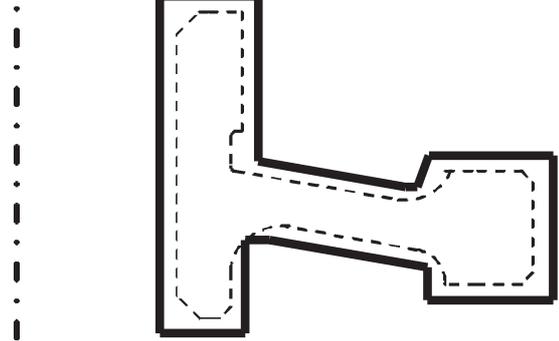
1. Загрузка .dxf



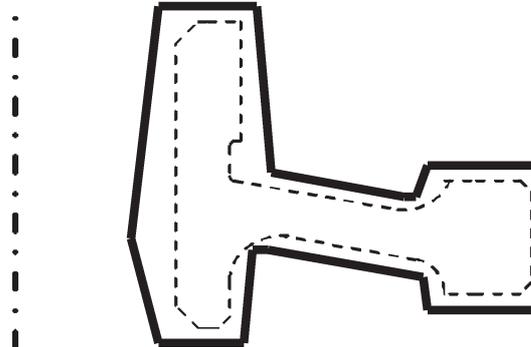
2. Подготовка геометрии



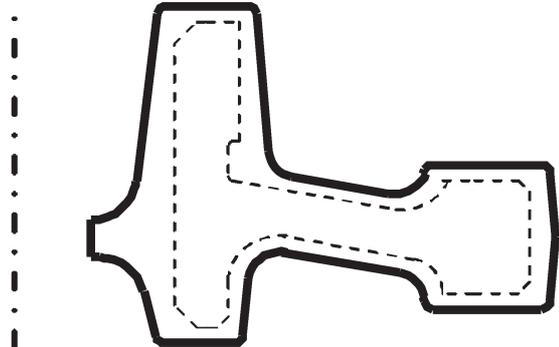
3. Упрощение модели



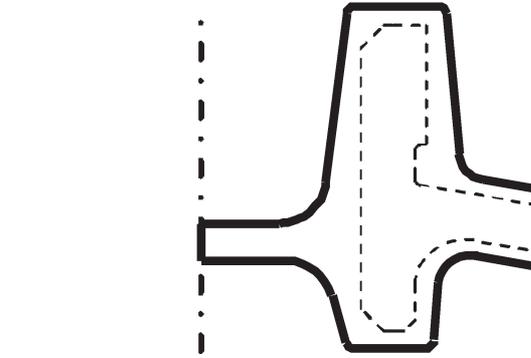
4. Назначение припусков



5. Создание уклонов



6. Коррекция геометрии и скругление углов



7. Добавление перемычки и облойной канавки (горячая поковка)

Фиг. 4. Этапы автоматического проектирования поковки, выполняемые в разработанном ПО

После удаления с чертежа линий, не относящихся к контуру, подготовленная геометрия исходной детали используется для проектирования формы поковки. В качестве примера на фиг. 4 рассмотрены выполняемые преобразования для зубчатого колеса [18] из сплава 18ХГТ.

После загрузки чертежа детали выполняется подготовка геометрии: удаляются вспомогательные линии, не относящиеся к контуру изделия. Эту предварительную операцию можно выполнить вручную в сторонней САПР или в разработанном приложении. Далее пользователь, проверив заданные параметры (положение линии разъема штампов, марка стали, тип оборудования и др.), запускает алгоритм создания поковки, который включает в себя несколько операций. Вначале рассчитываются вероятная масса поковки и исходный индекс. Далее проводится упрощение модели: удаляются фаски и скругления углов, а также поднутрения (полости, не выполняемые штамповкой).

Полученная геометрия используется для определения исходных размеров чистовой детали. В перспективе размеры могут распознаваться по чертежу, например, с помощью искусственных нейронных сетей (в том числе обозначения дюймовой или трубной резьбы, шероховатости и пр.). На следующем этапе работы программы назначаются припуски на механическую обработку: основные и дополнительные, учитывающие отклонения формы поковки. Выполняется смещение линий на найденную величину припусков с сохранением замкнутого контура. Затем у получившихся линий проверяется наклон относительно плоскости разъема штампа; если требуется, осуществляется их поворот в соответствии с заданным штамповочным уклоном.

Стоит отметить, что для унификации режущего и измерительного инструментов штамповочные уклоны и радиусы скруглений углов поковки задаются одинаковыми (отдельная величина для внешних и внутренних элементов), однако в ручном режиме работы программы можно сделать так, что каждый элемент поковки станет доступен для изменения по отдельности.

На последних этапах осуществляется коррекция поковки: выполняется поиск и исправление тонких ребер, глубоких полостей, добавляются скругления углов. Правила алгоритма включают возможность выбора ком-

промисса между более надежной формой поковки и более экономной (т.е. с повышенным КИМ). К ним относятся, например, диапазон изменения точности изготовления поковки, минимально допустимой толщины ребер, разрешенной величины отношения глубины к диаметру отверстия до перемычки, радиусов скруглений и др.

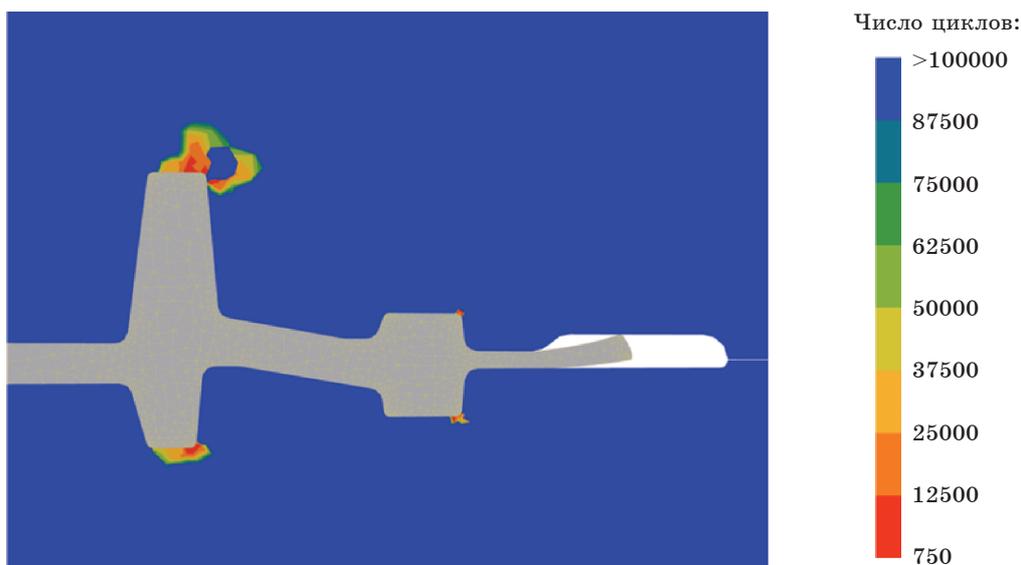
После получения формы поковки определяется ее масса, выполняется перерасчет исходного индекса; при необходимости построение геометрии запускается заново.

Предлагаемый подход имеет следующие отличительные особенности. Во-первых, предложено разделение хода создания поковки на определенную последовательность операций (перечислены выше). Во-вторых, на каждом этапе в алгоритме предусмотрены функции, учитывающие стандарты в области горячей объемной штамповки. В-третьих, предложены и реализованы правила по получению формы поковки, которая с наименьшей вероятностью приведет к появлению дефектов.

Проверка спроектированной поковки осуществляется методом конечных элементов в QForm. Перед экспортом геометрии автоматически выполняется равномерное масштабирование для учета коэффициента теплового расширения материала, создается ручей для горячей поковки с облойной канавкой, подбираются размеры цилиндрической заготовки.

По желанию пользователя дополнительно формируется геометрия для предварительного перехода — осадки. В этом случае предлагается по рассчитанному искажению формы (бочкообразование при осадке) либо выбрать диаметр заготовки, имеющийся в ГОСТе, либо ввести его вручную. При определении высоты заготовки исходят из объема поковки, при этом выполняют проверку отношения высоты к диаметру, а также вероятное положение полученного после осадки полуфабриката для его надежного центрирования на зеркале окончательного штампа.

По результатам моделирования (фиг. 5) оценивается отсутствие дефектов, включая недоштамповку и складкообразование. Кроме того, программа QForm позволяет с достаточной точностью предсказать приблизительное число штамповок, которые можно получить в разработанной оснастке до начала износа штампа [19]. С помощью данного по-



Фиг. 5. Проверка формы поковки (бездефектного заполнения гравюры ручья) с помощью моделирования в ПО QForm и оценка износа оснастки по числу циклов штамповки

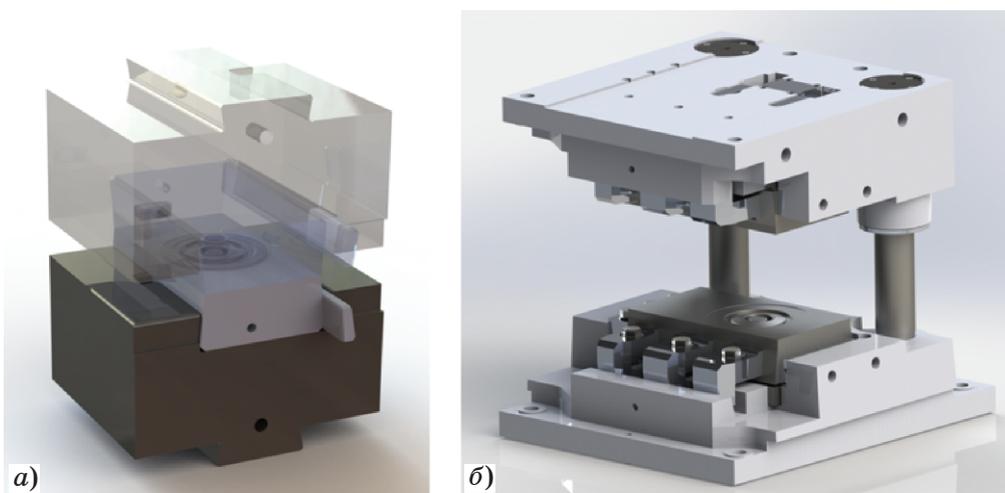
казателя удастся определить области поковки, наиболее подверженные высоким напряжениям, деформациям или температурным воздействиям, и в дальнейшем изменить параметры при назначении напусков для их учета.

Благодаря интерфейсу QFormAPI появилась возможность автоматизировать процесс передачи данных в расчетное приложение, получать информацию о ходе анализа и тем самым без вмешательства пользователя модифицировать те или иные параметры для получения оптимальной формы поковки.

Аналогичная технология использовалась для проектирования оснастки в ПО

SolidWorks. Загрузка заранее подготовленных моделей штамповых блоков для разного оборудования, связанных конфигурацией в файлах Excel, предоставляет технологу удобный инструмент, который ускоряет построение твердотельной модели для дальнейшего производства оснастки на станках ЧПУ. Разработанная форма поковки вычитается из геометрии вставок, тем самым формируется требуемый ручей (фиг. 6).

Стоит отметить, что согласно принятым нормам на разработку чертежа поковки для стальных деталей даже самой простейшей формы инженеру-технологу отводится более 1 ч, в то время как с помощью данного при-



Фиг. 6. Сгенерированная в ПО SolidWorks оснастка для штамповки детали: а — штамп для молота; б — блок со вставками для кривошипного горячештамповочного пресса (КГШП)

ложения время разработки удается сократить до нескольких секунд. К тому же сразу подготавливаются модели для конечно-элементного анализа и блоки универсальной конструкции штампов.

Таким образом, разработанное ПО значительно ускоряет операции проектирования штамповой оснастки и может быть полезно как для компаний, занимающихся горячей объемной штамповкой, так и студентам технических вузов, обучающихся по соответствующим специальностям. Кроме того, быстрое создание формы поковок позволит за короткий срок накопить большой объем данных для искусственных нейронных сетей в помощь инженерам-технологам при автоматической разработке ручьев штампов.

**Выводы.** 1. Разработана методика для автоматизированного создания формы горячей поковки по исходному чертежу чистой осесимметричной детали в соответствии с государственными и отраслевыми стандартами. Методика включает последовательные этапы упрощения геометрии, определения начальных размеров, назначения припусков и напусков, корректировку предложенной формы поковки с учетом наличия высоких ребер, глубоких выемок, тонких фланцевых частей.

2. Разбиение процесса проектирования на отдельные этапы позволило реализовать получение формы поковки по чистой детали в виде соответствующих программных алгоритмов. Помимо формы поковок созданное программное обеспечение в автоматическом режиме формирует геометрию штамповой оснастки и модели для конечно-элементного анализа. Тем самым существенно ускоряется подготовка к производству штампуемых изделий.

3. Дополнительно результаты могут быть использованы для создания массива больших данных и обучения искусственных нейронных сетей. Кроме того, интерфейс разработанного программного обеспечения предоставляет возможности для активного взаимодействия с пользователем, наглядно и практически без задержек отображая, как выбираемые параметры изменяют геометрию поковки и КИМ (коэффициент использования металла).

4. На примере ряда деталей (с фланцевой частью, с центральным отверстием под перемычку и др.) с помощью математического

моделирования подтверждена возможность получения бездефектных изделий по проектной в программном обеспечении геометрии штамповой оснастки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Świć A. Control of machining of axisymmetric low-rigidity parts / A. Świć, A. Gola, L. Sobaszek, O. Ornyecz // *Materials*. (Basel). 2020. Nov. 9. №13(21). P.5053. <https://doi.org/10.3390/ma13215053>.
2. Власов, А.В. Опыт использования QformDirect для проектирования предварительных переходов при горячей объемной штамповке / А.В. Власов, Н.В. Биба, С.А. Стебунов, А.М. Дюжев, К.А. Кенжалиев // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2022. Т.20. №11. С.501—506.
3. Park, K.S. Process analysis of multistage forging by using finite element method / K.S. Park [et al.] // *J. Mater. Proc. Techn.* 2007. V.187. P.586—590. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.036>.
4. Schmitz, G.J. Handbook of software solutions for ICME / G.J. Schmitz, U. Prahl. — Wiley-VCH, 2016. 632 p. <https://doi.org/10.1002/9783527693566>.
5. Золотов, А.М. Проектирование многопереходных технологических процессов горячей объемной штамповки с использованием систем компьютерного моделирования / А.М. Золотов, А.И. Рудской, Ю.И. Рыбин // *Научно-технические ведомости СПбГТУ*. 2005. №2 (40). С.83—92.
6. Onwubolu, G. Computer-aided engineering design with solidworks / G. Onwubolu. — 1st ed. — [S.l.] : Imperial college press, 2013. 744 p.
7. Han, Y. Automatic preform design and optimization for aeroengine disk forgings / Han, Y., Wang, M., Chen, Y. [et al.] // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2023. V.125. P.1845—1858. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10627-z>.
8. Hedicke-Claus, Y. Automated design of multi-stage forging sequences for die forging / Y. Hedicke-Claus, M. Kriwall, M. Stonis [et al.] // *Prod. Eng. Res. Devel.* 2023. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01190-x>.
9. Liu, C. Pre-forging shape design using conformal mapping method / C. Liu [et al.] // *Forming the future. The Minerals, Metals & Materials Series*. — eds. Daehn G., Cao J., Kinsey B., Tekkaya E., Vivek A., Yoshida Y. — [S.l.] : Springer, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75381-8\\_241](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75381-8_241).
10. Liu, C. Optimal design of preform shape based on EFA-FEM-GA integrated methodology / C. Liu [et al.] // *Int. J. Mater. Form.* 2021. V.14. P.1043—1056. <https://doi.org/10.1007/s12289-021-01620-0>.
11. Biba, N. Closed die forging preform shape design using isothermal surfaces method / N. Biba, A. Vlasov, D. Krivenko, A. Duzhev, S. Stebunov // *Procedia Manufacturing*. 2020. V.47. P.268—273. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.219>.
12. Lee, S. A new approach to preform design in metal forging processes based on the convolution neural network / S. Lee, L. Quagliato, D. Park, I. Kwon, J. Sun, N. Kim // *Appl. Sci.* 2021. V.11. Art.7948. <https://doi.org/10.3390/app11177948>.
13. Campi, F. An analytical cost estimation model for the design of axisymmetric components with open-die forging technology / F. Campi, M. Mandolini, C. Favi [et al.] // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020. V.110.

- P.1869—1892. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05948-w>.
14. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. / [А.П. Атрошенко, О.А. Белокуров, Г.С. Гарибов и др.]; под ред. Е.И. Семенова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2010. Т.2. Горячая объемная штамповка. 720 с.
  15. *Бабенко, В.А.* Объемная штамповка. Атлас схем и типовых конструкций штампов : учеб. пособ. для машиностроительных вузов / В.А. Бабенко [и др.]. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1982. 104 с.
  16. Конечно-элементное моделирование технологических процессов ковки и объемной штамповки : учеб. пособ. / [А.В. Власов и др.]; под ред. А. В. Власова. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. 383 с.
  17. *Мартюгин, А.В.* Особенности проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки с оригинальными требованиями к качеству поковок / А.В. Мартюгин, И.М. Володин, А.И. Володин, Г.Ф. Биктимирова // Современные наукоемкие технологии. 2019. №4. С.41—49.
  18. Results of the International Students Olympiad in Hot Bulk Forging Technologies 2016. URL: <https://www.qform3d.com/education/olympiad/2016> [Electronic resource]. Date of the application : 07.07.2023.
  19. *Алексеев, С.Ю.* Повышение стойкости штампов при объемной штамповке с помощью моделирования в QFORM / С.Ю. Алексеев // *Металлург.* 2022. №6. С.85—87.