

УДК 621.4

DOI 10.17073/0021-3438-2015-2-37-43

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШТАМПОВКИ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© 2015 г. **И.Н. Хаймович, А.И. Хаймович**Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ)  
им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)*Статья поступила в редакцию 30.06.14 г., подписана в печать 25.07.14 г.*

Разработаны алгоритмы расчета конструкции заготовки и штампового оснащения для производства компрессорных лопаток авиационных двигателей из титановых сплавов. Предложенная система проектирования позволяет автоматически формировать чертежи обрезаемых и обжимных штампов, что приводит к значительному сокращению времени технологической подготовки производства. Проведен подробный анализ особенностей конструктивных элементов лопатки. Принятые ограничения и технологические решения позволили сформировать обобщенные алгоритмы формирования поверхности разреза штампов по всему контуру гравюры для разных конфигураций штампанных поковок. Созданы алгоритмы и программы расчета трехмерных координат точек, описывающих конфигурацию полости штампа, базовых поверхностей для установки контрольных шаблонов, а также форму и габаритные размеры верхнего и нижнего вкладышей штампа. В результате была получена обобщенная математическая модель окончательного штампа в виде трехмерного массива базовых точек, соединенных ребрами в виде прямых или сплайнов. Она может служить основой для создания конструкторской документации технологической оснастки и средств ее контроля.

**Ключевые слова:** система автоматизированного проектирования, обрезные и обжимные штампы, компрессорные лопатки, авиационные двигатели, обобщенные математические модели.

Algorithms of calculation of the design of a billet and stamping equipment for production of compressor blades of aircraft engines made of titanium alloys are developed. The proposed system of design makes it possible to automatically form the charts of cut and crimp dies, which considerably shortens the time of the manufacturing preparation of production. A detail analysis of the features of constructive elements of the blade is presented. The accepted limitations and manufacturing solutions allowed us to form the generalized algorithms for the formation of the surface of splitting the stamps over the loop contour for various configurations of stamped forgings. Algorithms and programs of calculation of three-dimensional coordinates of the points describing the configuration of the stamp cavity, base surfaces for establishment of control templates as well as the shape and scale sizes of the upper and lower stamp inserts. This was resulted in a generalized mathematical model of a final stamp in a form of a three-dimensional array of side points connected by edges in a form of straight lines or splines. It can serve for the formation of the design documentation of the production equipment and its control means.

**Keywords:** computer-aided design, cut and crimp dies, compressor blades, aircraft engines, generalized mathematical models.

### Введение

В настоящее время значительная номенклатура заготовок компрессорных лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) из титановых сплавов изготавливается путем горячей штамповки [1–3]. Как показала практика, несмотря на значительный (более

1 мм) припуск по профильным поверхностям, этот традиционный метод имеет ряд конкурентных преимуществ по сравнению с технологическими процессами обработки давлением, обеспечивающими минимальные припуски (изотермическая штампов-

*Хаймович И.Н. – докт. техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением СГАУ (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34). E-mail: kovalek68@mail.ru.*

*Хаймович А.И. – докторант, канд. техн. наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов СГАУ. E-mail: berill\_samara@bk.ru.*

ка, высокоскоростная штамповка, вальцовка) [4–7]. Преимущества заключаются в более высокой производительности и стойкости штамповой оснастки, возможности использования унифицированной поковки для ряда типоразмеров лопаток.

### Описание проблемы и метода решения

Известно, что проектирование 3D-моделей обжимного и обрубного штампов для объемной штамповки лопаток представляет собой не до конца формализованный процесс, который в зависимости от применяемой практики на производстве во многом определяется опытом конструктора и технолога и не всегда поддается автоматизации [8–11].

В этой связи целью настоящей работы являлось обобщение опыта разработки системы автоматического проектирования (САПР) штамповой оснастки, которая реализовывала бы сбалансированный подход к сочетанию формализованного автоматизированного процесса определения геометрии штампа с возможностями его интерактивной коррекции на основе производственного опыта и оптимизации геометрии, например средствами CAE-систем (Deform 3D, Qantorform и др. [12]).

Система (рис. 1) состоит из трех последовательных расчетных блоков:

- разработки штампованной поковки;
- расчета обобщенной математической модели (ОММ) окончательного обжимного штампа;

– проектирования технологической оснастки 2-го рода (контрольных шаблонов и др.).

Первый блок предусматривает создание типового чертежа поковки без 3D-модели с возможностью вывода на бумажный носитель. Такое представление результатов расчета позволяет, не нарушая традиций предприятий, провести согласование формы и размеров поковки со всеми заинтересованными службами и производствами. В целях повышения универсальности программы значения припусков на все поверхности лопатки не связаны с нормативными документами, которые заметно отличаются на различных предприятиях. Поэтому припуски могут меняться в широких пределах и задаются пользователем в исходных данных. Необходимые габаритные размеры и координаты точек сечения пера вводятся с конструкторского чертежа лопатки в ручном и автоматическом режимах. Для повышения наглядности и уменьшения субъективных ошибок в системе предусмотрена серия слайдов. Назначение припусков, штамповочных уклонов, технологического прилива (бобышки), а также создание чертежа поковки со всеми размерами выполняются автоматически.

Полученные размеры конструкции поковки в автоматическом режиме передаются в блок расчета ОММ окончательного штампа. В САПР предусмотрен блок контроля ввода, который позволяет применить ручной ввод, исключив блок проектирования поковки, изменить любой поковочный размер после автоматического ввода, а также дополнительно ввести недостающие параметры.

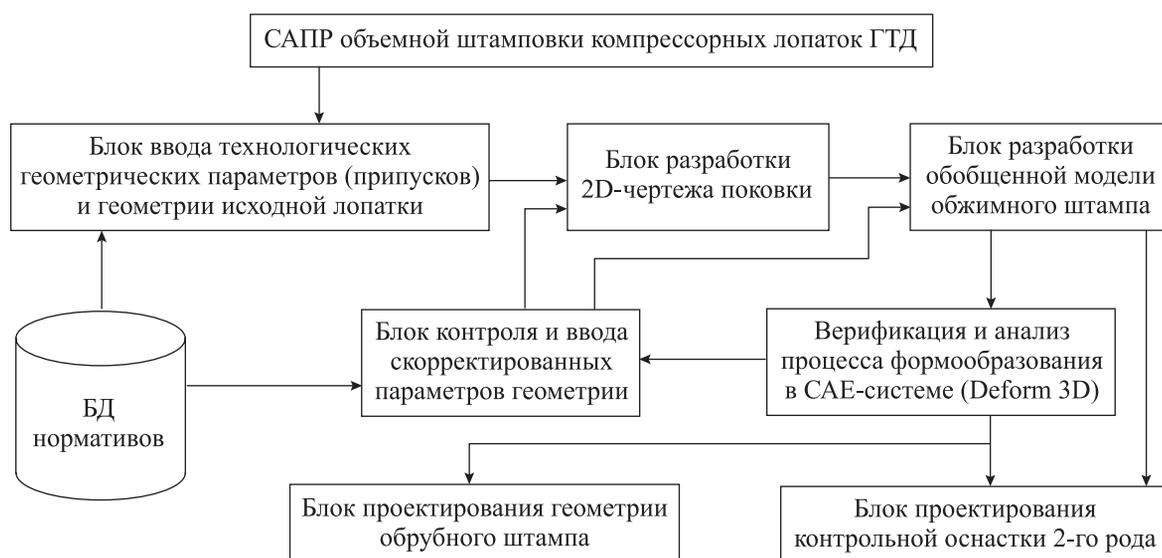


Рис. 1. Информационные потоки в САПР объемной штамповки лопаток ГТД



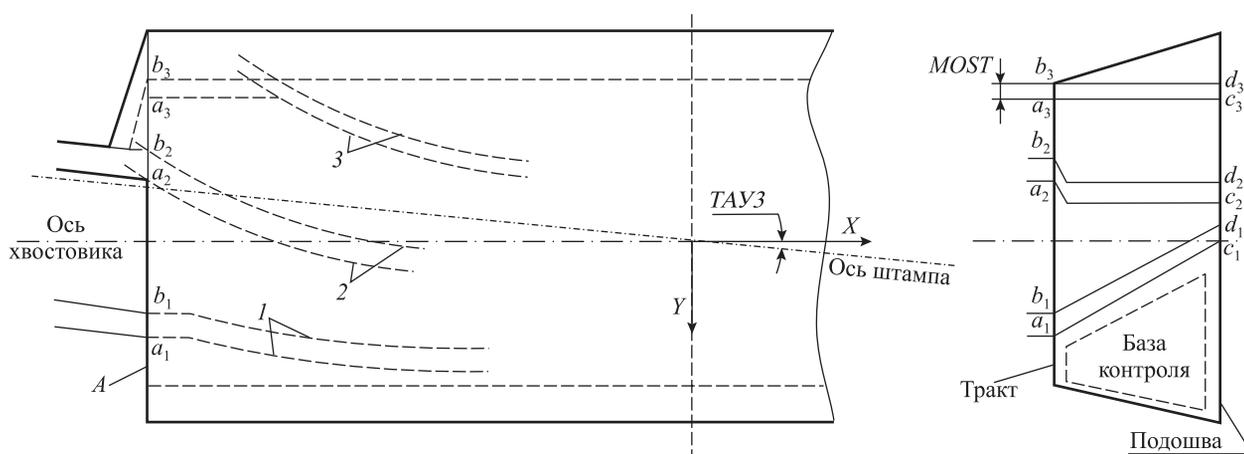


Рис. 3. Выбор разьема штампов по тракту и торцу хвостовика со стороны входной кромки пера лопатки

А — поверхность торца замка, 1–3 — варианты пересечения пера трактовой поверхностью замка

хность А). В этом случае разъем по тракту принимается параллельным средней плоскости хвостовика и выходит на поверхность А в т.  $a_1$  (нижний вкладыш) и т.  $b_1$  (верхний). Дальнейшее направление разьема совпадает с осью штампа.

2. Крайние точки пера гравюры штампа выходят за пределы поверхности торца хвостовика. В этом случае точки разьема штампов по тракту хвостовика ( $a_2$  и  $b_2$ ) находятся на пересечении с поверхностью А.

3. Крайние точки пера выходят за пределы трактовой поверхности. Это наиболее сложный вариант разьема. С целью сохранения конфигурации хвостовика предусматривается уменьшить ширину пера, обеспечив при этом необходимый припуск по кромке. Разъем по тракту выполняется параллельно оси хвостовика до тт.  $a_3$  и  $b_3$ .

Для всех вариантов разьема предусматривается одинаковая толщина мостика заусеничной канавки (МОСТ), принятая в исходных данных для проектирования штампа.

На практике используются 3 вида разьема штампов по торцу хвостовика между трактом и подошвой (см. рис. 3): параллельный (вар. 3), ступенчатый (вар. 2) и наклонный (вар. 1). Два последних применяются с целью корректировки глубины полости штампа в верхнем и нижнем вкладышах по подошве хвостовика. Ступенчатый разъем упрощает изготовление и контроль штампа, при этом перепад уровней ступеньки выполняется под небольшим углом (5–7 град). Однако такой разъем усложняет наладку штампа и ухудшает качество обрезки заусенца. Небольшой зазор на вертикальном участке (0,1–

0,3 мм) часто приводит к соударению штампов даже при небольшом их смещении. При обрезке заусенца практически невозможно обеспечить на этом участке оптимальный зазор и форму режущей кромки, особенно со стороны пуансона.

Разработанный алгоритм предусматривает применение только двух видов разьема — параллельного и наклонного. Последний дает возможность решить 2 задачи:

- создать на торце замка достаточную поверхность (базу контроля), которая позволяет надежно установить поковку в контрольном приспособлении;
- обеспечить большую глубину полости штампа в нижнем вкладыше по сравнению с верхним.

Торцевая поверхность хвостовика в нижнем вкладыше (база контроля) образует естественный штамповочный уклон за счет поворота поковки в штампе на угол  $ТАУЗ$ . В этом случае боковая поверхность хвостовика в верхнем вкладыше будет формироваться под углом  $(ALNEY + ТАУЗ)$  к оси хвостовика, где  $ALNEY$  — расчетный штамповочный уклон, который в алгоритме принимается постоянным для трактовой поверхности хвостовика. Такое образование уклонов приводит к появлению на поковке козырька переменной ширины, который частично удаляется при обрезке заусенца.

Затем формируем разъем штампов по торцу хвостовика со стороны выходной кромки пера. Варианты пересечения пера с трактовой поверхностью хвостовика со стороны выходной кромки аналогичны рассмотренным ранее для входной кромки. На рис. 4 схематично показаны 3 возможных случая.

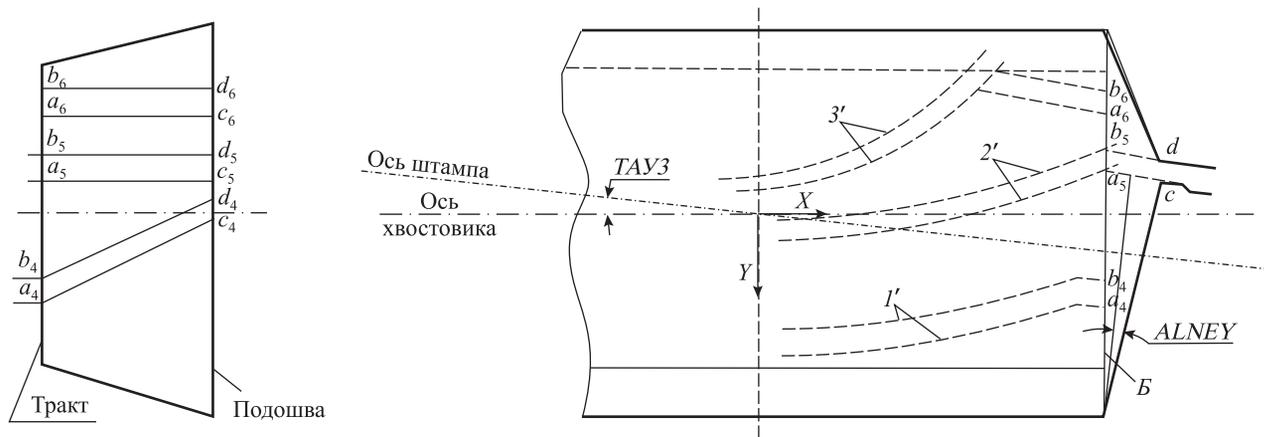


Рис. 4. Выбор разреза штампов по торцу хвостовика со стороны выходной кромки пера лопатки

Б— поверхность торца замка; 1'–3'— варианты пересечения пера трактовой поверхностью замка

В отличие от входной кромки разъем штампов по тракту и далее в заусеничную канавку формируется параллельно оси штампа, т.е. под углом  $TAYЗ$  к оси хвостовика. Таким образом, выход разреза на торец замка определяется тт.  $a_4—b_4$  (вар. 1),  $a_5—b_5$  (вар. 2) и  $a_6—b_6$  (вар. 3). Положение разреза штампов по торцу хвостовика, т.е. его выход на подошву, выбирается из следующих условий:

- если разъем по тракту хвостовика располагается выше его оси (например, вар. 2 и 3 на рис. 4), то по торцу он параллельный;
- если разъем ниже оси хвостовика, то он наклонный с выходом на ось хвостовика в т.  $c_4$  (например, вар. 1 на рис. 4).

Штамповочный уклон в нижнем вкладыше по торцу хвостовика (рис. 5) считается постоянным ( $ALNEY$ ) независимо от рассматриваемого варианта. Для контроля смещения вкладышей в поперечном направлении при наладке штампа принимается, что кромка нижней полости штампа (т.  $c$  на рис. 4) должна лежать в одной вертикальной плоскости с кромкой верхней полости штампа (т.  $d$  на рис. 4). В этом случае штамповочный уклон в верхней полости штампа всегда будет больше угла  $ALNEY$ . При этом если разъем по торцу хвостовика параллельный, то угол будет постоянным, если наклонный, то переменным.

Линия разреза проходит по подошве хвостовика. Учитывая принятые условия формирования разреза по его торцам, получим, что разъем штампа по подошве в большинстве случаев не параллелен оси хвостовика. Однако глубина полости в нижнем вкладыше будет больше, чем в верхнем. Учитывая

это обстоятельство, штамповочный уклон ( $ALNEY$ ) в нижнем вкладыше принимается постоянным.

При установке штампов необходимо контролировать взаимное смещение в продольном направлении. Для облегчения контроля желательно, чтобы кромки обрезки заусенца ( $B$  и  $H$  на рис. 5) располагались в вертикальной плоскости. Это достигается назначением переменного угла штамповочного уклона в верхнем вкладыше, который больше заданного и плавно меняется вдоль линии разреза штампов.

Описанные алгоритмы формирования разреза штампов по торцам хвостовика однозначно определяют разъем по его подошве: во всех случаях глубина полости в нижнем штампе будет больше по сравнению с верхним. Учитывая это обстоятельство, штамповочный уклон ( $ALNEY$ ) в нижнем вкладыше принимается постоянным, а в верхнем —

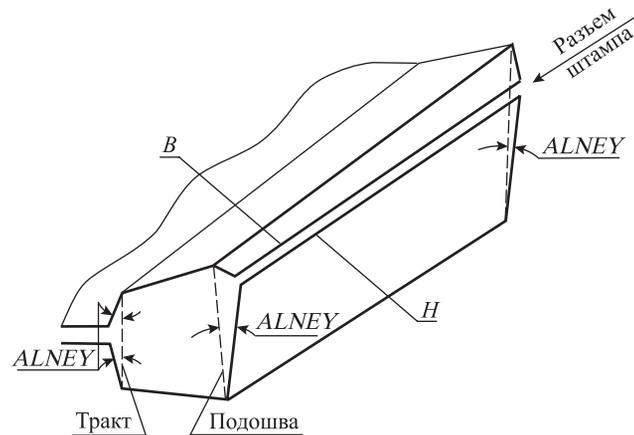


Рис. 5. Формирование штамповочных уклонов на подошве и тракте хвостовика

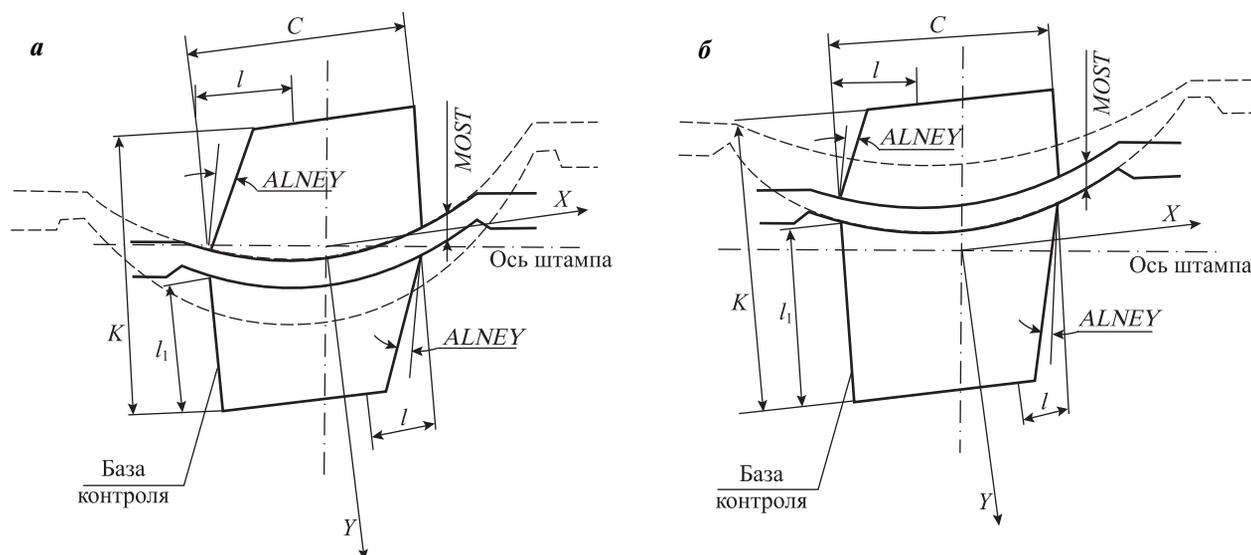


Рис. 6. Формирование разъема штампа по бобышке при недостаточной (а) и достаточной (б) площади базы контроля

переменным. Такой подход позволяет совместить кромки штампа и использовать подошву хвостовика поковки для контроля смещения вкладышей в продольном направлении.

**Формирование поверхности разъема вокруг технологической бобышки**, которая располагается за пределами рабочей части пера. Для упрощения конструкции штампов разъем вокруг бобышки часто делают плоским. Однако в этом случае необходимо применять вертикальный (ступенчатый) разъем при переходе от пера к бобышке, а он, как указано выше, имеет серьезные недостатки. При разработке САПР штампов предложено и реализовано другое решение формирования поверхности разъема. Суть его заключается в том, что профиль верхнего сечения пера продолжается в область бобышки.

При таком подходе разъем штампов будет криволинейным, а его выход на боковые поверхности бобышки будет зависеть от угла закрутки верхнего сечения пера. Для получения расчетных размеров мостика заусеничной канавки предусматривается уменьшение толщины пера вокруг бобышки за счет спинки или корыта. Выбор соответствующего варианта зависит от размера  $l_1$  (рис. 6), который определяет площадку базы контроля поковки. Принято следующее: если  $l_1 \leq 0,4K$  (где  $K$  — толщина бобышки), то уменьшение толщины пера выполняется за счет спинки, расположенной в нижнем вкладыше; если  $l_1 > 0,4K$ , то профиль спинки остается неизменным.

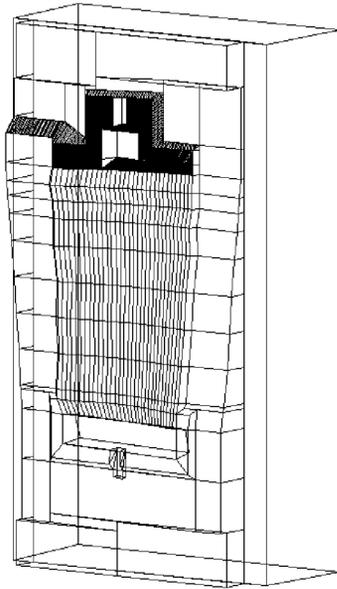
Необходимая толщина *MOST* создается за счет

изменения профиля корыта (рис. 6, б), который строится эквидистантно профилю спинки. Для максимального совмещения кромок обрезки заусенца предусмотрена возможность небольшого уменьшения ширины бобышки ( $C$ ) на величину  $l \leq 2$  мм (см. рис. 6). Для реализации всех описанных условий и ограничений разработаны соответствующие алгоритмы и программные средства.

В случае криволинейного разъема штампов (формирования поверхности бобышки за счет продления пера) его выход на боковые поверхности бобышки зависит от угла закрутки верхнего сечения пера. Для повышения качества обрезки заусенца предусматривается уменьшение толщины пера вокруг этого конструктивного элемента за счет усечения профиля со стороны спинки или корыта. Если площадь базы контроля поковки на бобышке недостаточна, то уменьшение толщины пера выполняется за счет спинки. Тогда профиль корыта без дополнительной закрутки продляется на всю бобышку, а профиль спинки строится эквидистантно на расстоянии *MOST*.

## Заключение

Анализ особенностей конструктивных элементов лопатки, принятые ограничения и технологические решения позволили сформировать поверхность разъема штампов по всему контуру гравюры. Разработаны алгоритмы и программы расчета трехмерных координат точек, описывающих конфигу-



**Рис. 7.** Обобщенная математическая модель нижнего вкладыша

рацию полости штампа, базовых поверхностей для установки контрольных шаблонов, форму и габаритные размеры верхнего и нижнего вкладышей штампа. В результате была получена обобщенная математическая модель окончательного штампа в виде трехмерного массива базовых точек, соединенных ребрами в виде прямых или сплайнов. Эта ОММ является основой для создания конструкторской документации технологической оснастки и средств ее контроля.

Разработан модуль программы автоматического построения модели окончательного обжимного штампа. Она состоит из набора каркасно-заданных поверхностей, описывающих 3D-геометрию нижнего и верхнего вкладышей (рис. 7) штампа. Модель может быть экспортирована в другие CAD/CAM-или CAE-системы для дальнейшего технологического анализа или создания управляющих программ для обработки штампов на станках с ЧПУ.

Разработан модуль программы автоматического построения модели обрезающего штампа. Его режущая кромка формируется из точек ОММ, описывающих контур полости в нижнем вкладыше.

Модуль проектирования технологической оснастки позволяет автоматически сформировать типовой чертеж окончательного штампа с переносом его на бумажный носитель.

Для слесарной доводки штампа и его восстановления предусматривается создание комплекта чертежей контрольных шаблонов, исполнительные размеры которых получены из расчета точек пересечения плоскостей, имитирующих кромку шаблона, с поверхностями ОММ.

Таким образом, разработанная структура ОММ является универсальной базой для проектирования технологической оснастки и независимого представления полученных конструкций в виде чертежей и объемных моделей.

## Литература

1. Костышев В.А., Питюгов М.С. // Вестн. СГАУ. 2013. № 1. С. 134.
2. Костышев В.А., Питюгов М.С. // Вестн. СГАУ. 2012. № 4. С. 162.
3. Костышев В.А., Питюгов М.С. // Вестн. СГАУ. 2013. № 1. С. 143.
4. Ерисов Я.А., Гречников Ф.В. // Изв. СНЦ РАН. 2012. № 4. С. 293.
5. Shlypugin A.G., Popov I.P., Zvonov S.U. // Rus. Aeronautics (Iz. VUZ). 2010. № 3. P. 358.
6. Михеев В.А., Хаймович А.И. // Кузн.-штамп. пр-во. ОМД. 2011. № 7. С. 37.
7. Попов И.П., Демьяненко Е.Г., Гречников Ф.В. // Вест. СГАУ. 2013. № 3. С. 23.
8. Хаймович И.Н. // Изв. СНЦ РАН. 2010. № 72. С. 270.
9. Хаймович И.Н., Зеленов А.В. // Вестн. СГАУ. 2011. № 1. С. 62.
10. Хаймович И.Н., Клентак Л.С. // Фунд. исследования. 2013. № 10-12. С. 2634.
11. Гречников Ф.В., Ненашев В.Ю., Хаймович И.Н. // Кузн.-штамп. пр-во. ОМД. 2008. № 6. С. 42.
12. Glushchenkov V.A., Osama Al-Erhayem, Khardin M.V., Belyaeva I.A. // Inter. Conf. JOM-17 (Helsingør, Denmark, 5–8 May 2013). Helsingør: JOM-Institute, 2013.
13. Гречников Ф.В., Черников Д.Г. // Вестн. СГАУ. 2012. № 5. С. 26.