

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОКОВОК РАБОЧИХ КОЛЁС ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН В МНОГОКАНАЛЬНЫХ ШТАМПАХ

© 2012 В. М. Воробьёв

Московский научно-технический центр «АВЕРТ»

Предложен классификатор цельноштампованных рабочих колёс газовых и гидравлических лопаточных машин методами горячей (полугорячей) объёмной штамповки. Изложены материалы по разработке и исследованию схем и конструкций многоразъёмных штампов, неразборных (бандажированных) и разборных, после формоизменения в которых штамповые вставки извлекаются из межлопаточных каналов. Рассмотрен принцип построения теоретических цилиндрических решеток каналов многоразъёмных штампов.

Точная объёмная штамповка, лопаточные машины, рабочие колеса, диск вместе с лопатками, штамп, точные заготовки рабочих колес, турбоагрегаты, центробежные насосы, канал, теоретические решетки каналов, силы раскрытия и вращения.

До настоящего времени рабочие колёса (далее РК) авиационных лопаточных машин (далее ЛМ) изготавливались различными способами, которые в основном трудоёмки в изготовлении и отличаются большим расходом металла. Поэтому тема снижения трудоёмкости и металлоёмкости производства РК ЛМ с одновременным повышением механических свойств и эксплуатационной надёжности является актуальной.

Классификация моноштампованных РК авиационных ЛМ

Классификации рабочих колёс авиационного авиадвигателестроения по назначению, по геометрии посвящено много работ.

Классификация построена по технологическому принципу – преимущественному течению металла в процессе деформирования, что определяет тип РК; вторым признаком является конструкция класса – вид; третьим признаком заложена групповая принадлежность близких по форме поковок [1].

В основу классификации деталей «диск с лопатками» положены следующие конструктивно-технологические признаки:

- преимущественное течение металла в каналах штампа;
- общность технологического процесса формоизменения;
- форма и размеры детали;
- применяемые материалы поковок;

- виды и форма заготовок;
- геометрическая точность;
- чистота штампованных поверхностей.

В зависимости от конструктивных признаков цельноштампованные колёса разделены на типы.

Особенности межлопаточных пространств обуславливают конструкцию каналов многоразъёмных штампов и применение тех или иных технологических процессов, что позволяет разделить перечисленные типы цельноштампованных колес на виды – открытые и полузакрытые.

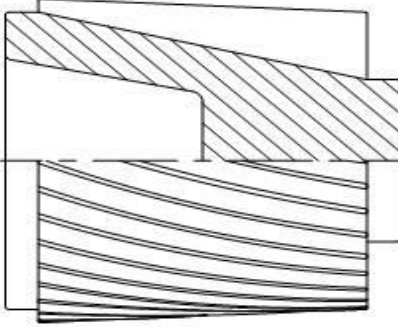
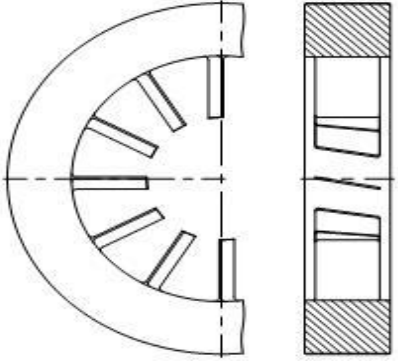
Классификацию по виду дополняет также технологический признак – преимущественное перемещение металла заготовки в каналах многоразъёмного штампа в соответствии со схемой выдавливания, используемой при изготовлении цельноштампованных рабочих колёс лопаточных машин – прямое или обратное, боковое (радиальное или аксиальное), комбинированное выдавливание.

В зависимости от формы и размеров элементов аэродинамических поверхностей в классификаторе предусмотрено восемь групп.

Ниже приведена классификация цельноштампованных колёс, наиболее широко применяемых в конструкциях лопаточных машин.

Классификация цельноштампованных колёс

Тип	Вид	Группа	Эскиз типового представителя
Конструктивные признаки	Технологические особенности	Форма аэродинамической поверхности	
1	2	3	4
<p>А Радиальные (диффузоры)</p>	<p>1 Межлопаточные каналы открытые Прямое выдавливание</p>	<p>1 Поверхность лопаток линейчатая</p>	
<p>Б Осевые (заборники)</p>	<p>2 Межлопаточные каналы открытые Боковое выдавливание</p>	<p>2 Поверхность ступицы линейчатая</p>	
		<p>3 Поверхность ступицы сложнофасонная</p>	
<p>В Радиальные крыльчатки</p>	<p>3 Межлопаточные каналы полузакрытые Комбинированное выдавливание</p>	<p>4 Поверхность лопаток плоская</p>	
		<p>5 Поверхность лопаток пространственная сложнофасонная</p>	
		<p>6 С промежуточными лопатками</p>	

1	2	3	4
Г Направляющие аппараты.	4 Межлопаточные каналы полуоткрытые. Комбинированное выдавливание.	7 Поверхность лопатки линейчатая.	
Д Направляющие аппараты.	5 Межлопаточные каналы закрытые. Аксимальное выдавливание.	8 Поверхность лопатки сложнорасонная.	

Тип А - радиальные колеса составляют 7% от изученной номенклатуры ГТД и 100% номенклатуры центробежных насосов. Особенностью их является увеличение площади поперечного сечения межлопаточных каналов от входа к радиальному выходу. Поверхности лопаток радиальных колес описываются прямыми линиями или дугами сопряженных друг с другом правильных окружностей, заданных в чертеже фиксированными радиусами.

Профиль пера лопаток определен линейчатыми поверхностями, разворачивающимися на плоскость, что существенно упрощает технологические схемы формоизменения. Преимущественное перемещение ме-

талла в каналах штампа – осевое (прямое и обратное выдавливание).

Тип Б, вид 2, группы 2 и 3 – осевые колеса, лопатки которых выполнены радиально относительно ступицы, а межлопаточные каналы - открытые. Число таких колёс составляет 51% от общего числа колёс. Группы 2 и 3 осевых колес различаются геометрическими формами аэродинамических поверхностей лопаток и ступиц (диска).

К группе 2 относятся поковки колёс турбин с лопатками постоянного сечения, контур поверхности ступицы которых образован линейчатыми поверхностями, например коническими. Основными геометрическими параметрами, характеризующими их

форму, являются минимальный и максимальный диаметры ступиц и угол конусности.

К группе 3 отнесены диагональные поковки моноколёс, поверхность ступицы которых образована криволинейной образующей, имеющей выпукло-вогнутую форму, заданную каркасом точек совокупности поперечных и продольных сечений колеса.

Тип колёс В, вид 3, группы 4 - 6 и тип Г, вид 4, группа 7 – радиально-осевые колеса. Их число составляет 42% от общего числа колёс.

Группа 4 – моноколёса с полузакрытыми межлопаточными каналами и плоскими лопатками, группа 5 – моноколёса с полузакрытыми каналами и лопатками, боковые поверхности которых описаны сложнофасонными пространственными поверхностями, не разворачивающимися на плоскость. Группу 6 составляют колёса с промежуточными лопатками.

Колёса типа В – наиболее сложные, их лопатки обладают признаками, характерными для лопаток колёс типов А и Б: радиальных и осевых, поэтому технологическая схема формоизменения поверхностей лопаток и диска наиболее сложная. Комбинация осевого (прямого, обратного) и радиального выдавливания в большинстве случаев требует применения специального разборного инструмента.

Колёса типа Д направляющих аппаратов – особый тип колёс, поковки которых получают аксиальным выдавливанием кольцевой заготовки. Межлопаточные каналы – закрытые.

Исходя из приведённой классификации, можно определить структуру технологического оборудования кузнечно-штамповочного производства. Это гидравлические прессы, высокоскоростные молоты, гидровинтовые пресс-молоты, которые наиболее подходят для разъёма разборных штампов и подъёма верхних половин для извлечения поковки вместе со вставками с помощью выталкивателей.

Конструкции многоканальных штампов

Многоканальный штамп – это конструкция инструмента для объёмного формоизменения, которая состоит из многоразъёмной матрицы с числом каналов, равным числу лопаток 5 – 60 и более. Канал (полость) сложной аэродинамической формы соответствует форме и размерам профиля лопаток. Канал (полость) образуется двумя рядом стоящими вставками. Поверхность спинки лопатки оформляется в процессе деформирования поверхностью антиспинки штамповой вставки, корыто оформляется поверхностью антикорыта соседней вставки.

Конструкции штампов могут быть выполнены неразборными (рис. 1) и сборно-разборными (рис. 2).

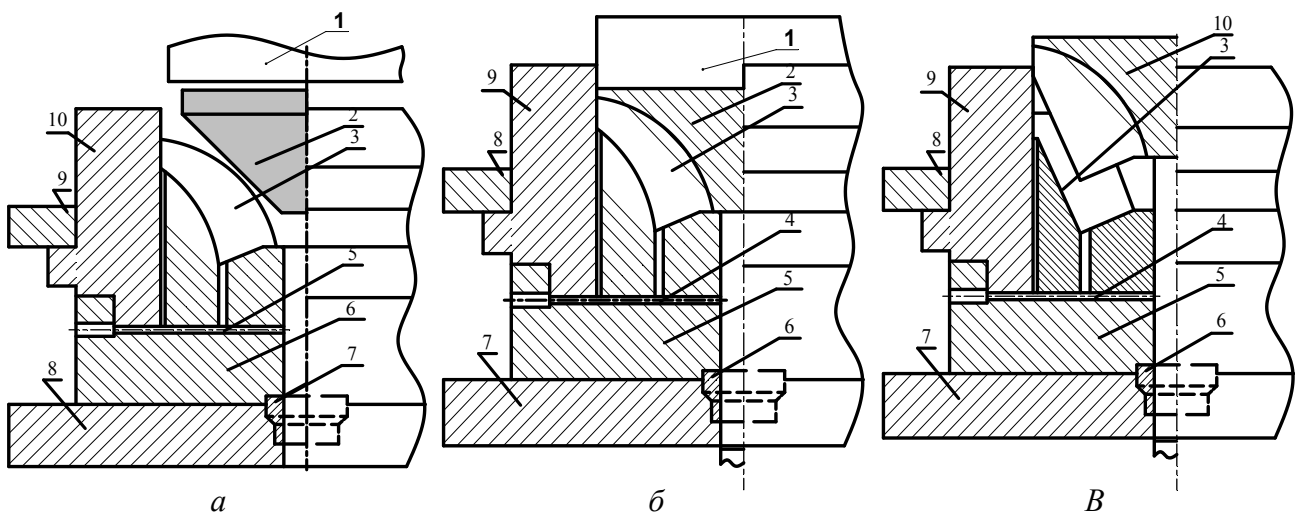


Рис. 1. Схема многоканального неразборного штампа:

а - исходное состояние; б - сожнутое (рабочее) состояние; в - без поковки:

1 - пуансон; 2 - заготовка; 3 - штамповая вставка; 4 - система удаления воздуха; 5 - нижняя плита; 6 - центрирующая втулка; 7 - подштамповая плита; 8 - прижимное кольцо; 9 - контейнер; 10 - поковка

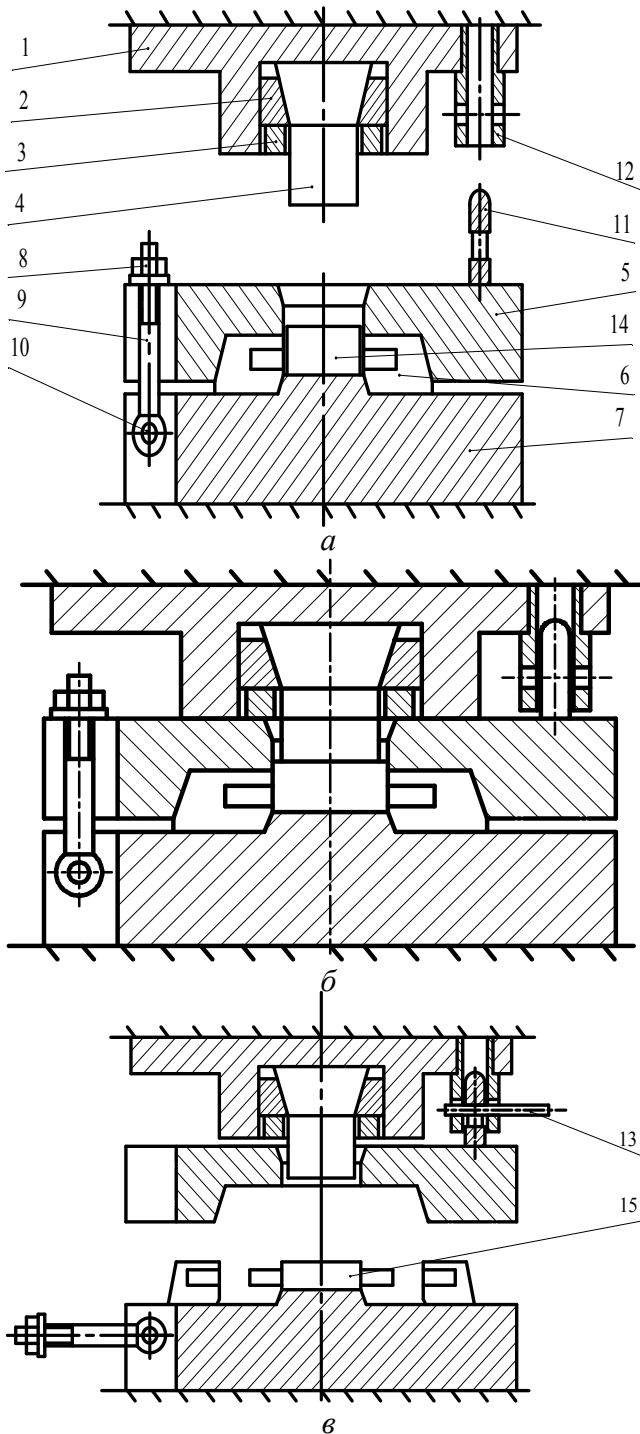


Рис. 2. Схема многоканального разборного штампа:
 1 - пуансонодержатель; 2,3 - крепеж пуансона;
 4 - пуансон; 5 - верхняя плита; 6 - штамповая вставка;
 7 - нижняя плита; 8, 9, 10 - стягивающее устройство матрицы; 11, 12, 13 - устройство разъёма матрицы; 14 - заготовка; 15 - поковка колеса с лопатками

Во всех штампах применяются формоизменяющие элементы (штамповые вставки), образующие профиль канала в процессе деформирования.

Многоразъёмные штампы состоят из двух частей: верхней части, подвижной относительно рамы молота, и относительно неподвижной нижней части.

На рис. 1 приведен многоразъёмный неразборный штамп.

Многоразъёмные (разборные) штампы (конструкции) – это штампы (конструкции), которые могут быть собраны (разобраны) из многих элементов в компактную, напряжённую, неизменяемую в процессе силового нагружения конструкцию (форму), минуя промежуточные сборно-монтажные операции во время штамповки. Использование многоразъёмных (сборных) конструкций в кузнечно-штамповочном производстве является по многим соображениям более предпочтительным по сравнению с другими решениями (традиционными конструкциями).

На рис. 2 приведен многоразъёмный разборный штамп.

Работа штампа заключается в следующем: первый этап – в собранный штамп (рис. 2, а) помещается нагретая заготовка 14; второй этап – формоизменение (рис. 2, б); третий этап – разборка штампа (рис. 2, в) и удаление штамповых вставок из межлопаточных каналов.

Таким образом, из неразборного в процессе деформации соединения (рис. 2, б) после поднятия верхней плиты (рис. 2, в) и извлечения вставок 6 становится возможным извлечь поковку 15 из штампа.

Детали 2, 3, 11, 12, 13 выполнены из стали 45, остальные детали – из стали 5ХНВ или 5ХНТ.

При этом возникает ряд инженерных проблем, среди которых можно выделить: необходимость высокой степени собираемости (взаимозаменяемости), учёта сил раскрытия, надёжности механизма сжатия (силового замыкания или размыкания), строгую регламентацию сборки соединений (узловых), допусков, жёсткости и динамических характеристик.

Исходя из схем штампов и их элементарного анализа систем, деталей, показанных на рис. 1 и рис. 2, из которых собираются конструкции штампов, а также способа их установки и способа (характера) сборки элементов, предложено рассматривать в качестве основных четыре варианта многоразъёмных конструкций штампов.

Вариант 1 сводится к цельной, многоэлементной конструкции, использующей как связь обойму для фиксации всех элементов.

В варианте 2 конструкции, приводящие в движение устройство разъёма штампа,

конструктивно связаны так, что разъем элементов производится с помощью бабы - молота.

Для варианта 3 характерным является последовательная (по одному) установка вкладышей (составных элементов конструкции).

Вариант 4 подобен третьему, за исключением того, что последовательный разъем штампа осуществляется одним внешним приводом.

В качестве средства разема можно применять целый ряд устройств: от гидropодъемников, бабы – молота, пневмоприводов до сжатых пружин.

Построение теоретических решёток полостей многоканальных штампов

Важным инструментом многоразъемного штампа с большим числом каналов является плоская решётка, позволяющая пространственную кольцевую решётку, соответствующую рабочим каналам штампа, расчленить на элементы с двумерными (плоскими) сечениями, через которые проходит поток деформируемого металла и которые называются теоретическими решётками.

Учитывая, что рабочие колеса лопаточных машин являются осесимметричными деталями, в качестве секущей поверхности выбираем поверхность вращения, проходящую через некоторую среднюю линию канала, через которую проходит осреднённый поток деформируемого металла (осреднённая поверхность тока).

Если многоканальную составную матрицу многоразъемного штампа расчесть цилиндрической поверхностью, а затем развернуть её на плоскость, то получим плоские решётки профилей каналов сложной аэродинамической формы [2].

Основные параметры профиля и решётки каналов штампа

Решётка каналов штампа состоит из бесконечного числа одинаковых профилей, расположенных по окружности, которая является фронтом решётки каналов многоразъемного штампа. Для построения решётки используем теорию лопаточных машин.

На рис. 3 показаны основные параметры профиля канала 1, где различают вогнутую сторону 2 (или антиспинку) и выпуклую

сторону 3 (или антикорыто). Радиусы r_1 и r_2 канала соответствуют входной и выходной кромкам колеса. Центры окружностей, вписанных в профиль канала, образуют среднюю линию.

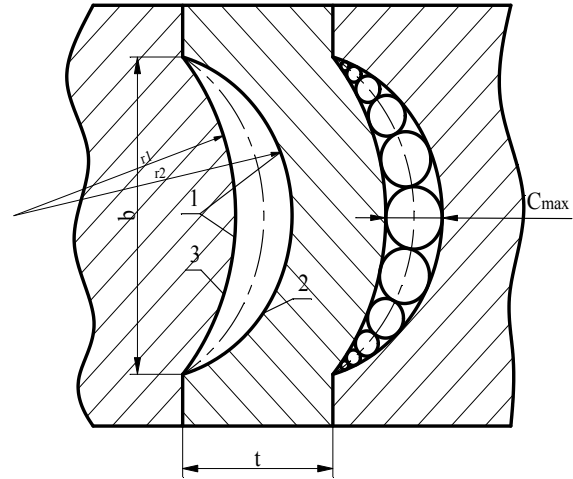


Рис. 3. Профиль канала штампа

Прямая, соединяющая концы средней линии, представляет собой хорду длиной b . Диаметр C_{max} наибольшей из вписанных окружностей является максимальной толщиной профиля канала.

Профиль лопатки часто задают двумя координатами его точек: абсциссой X , отсчитываемой по хорде обычно от входной к выходной части, и ординатой Y точек, образующих вогнутую (Y_k) и выпуклую (Y_c) стороны. Аналогично задают профиль канала, но с введением поправок, учитывающих действие различных факторов при заполнении канала металлом.

Профиль канала штампа можно характеризовать относительными величинами его основных параметров, выраженными отношением этих параметров в хорде b (рис. 4): относительной абсциссой $\bar{X} = X/b$; относительными ординатами антиспинки и антикорыта: $\bar{Y}_{ac} = Y_{ac}/b$ и $\bar{Y}_{ak} = Y_{ak}/b$; относительной толщиной профиля $\bar{C} = C_{max}/b$; относительной вогнутостью (кривизной) профиля $\bar{f} = f_{max}/b$, относительной абсциссой $\bar{X}_c = X_{ac}/b$ в месте максимальной толщины профиля; относительной абсциссой $\bar{X}_y = X_f/b = a/b$ в месте максимальной вогнутости.

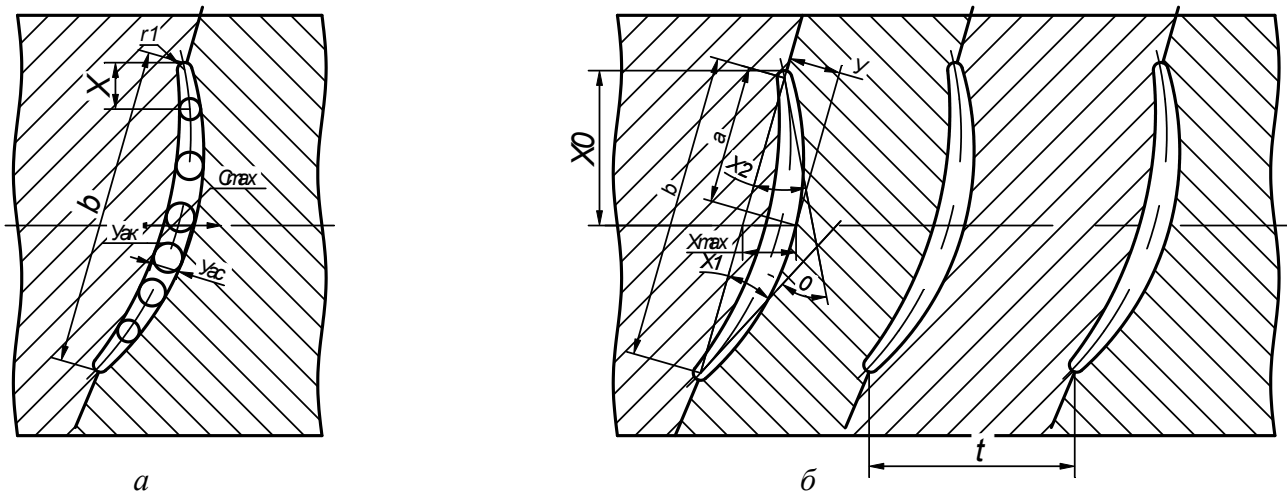


Рис. 4. Геометрические параметры профиля канала штампа (а) и средней линии профиля канала (б)

Решётки штамповых каналов, их образование и графическое представление

В том случае, когда профиль канала образуется сопряжением дуг окружностей и прямых линий, его очертания могут быть заданы координатами центров окружностей, радиусами окружностей и координатами точек сопряжения в зависимости от расположения средней линии.

Профиль решётки каналов (рис. 4) характеризуется углами X_1 и X_2 изгиба кромок профиля и углом V_p выноса (установки) профиля. Решётка каналов штампа характеризуется высотой H_p решётки; шагом t_p решётки, равным расстоянию между двумя одноименными точками соседних штамповых вставок; густотой b/t_p решётки (обратная величина шага или относительный шаг) и углом β расположения (установки) решётки (относительно горизонтальной плоскости).

Штамповые каналы, как правило, непрерывно сужаются в направлении от входной кромки к концу канала, что приводит к уменьшению площадей проходных сечений.

Решётка каналов штампа, являясь наиболее общим объектом исследований течения деформируемого металла в многоразёмных штампах, переходит в одиночный канал при $t_p \rightarrow \infty$ и $b = \text{const}$. Другим предельным случаем является бесконечно густая решетка: $t_p \rightarrow 0$ и $b = \text{const}$.

Построение средней линии профиля канала штампа

Среднюю линию исходного профиля (по конструкторскому чертежу) изгибаем по дуге окружности или параболы, чтобы положение центров радиусов r_1 и r_2 , находящихся на линиях под углами X_1 и X_2 , соответствовало полученному в теоретических расчётах. Затем осуществляем коррекцию с учётом сил давления в канале штампа, так как под влиянием этих сил теоретический профиль искажается.

Для повышения точности среднюю линию профиля канала, как и всего профиля, следует строить в увеличенном масштабе (1:10). При графическом построении средней линии проводим отрезки AB и CB из концов хорды $AC = b$ под углами X_1 и X_2 (рис. 5).

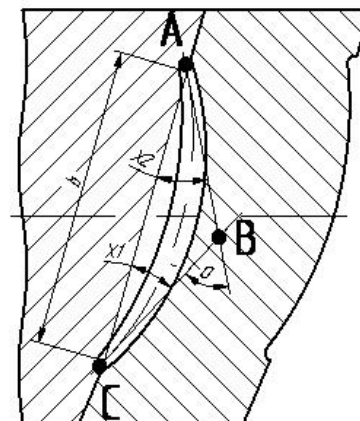


Рис. 5. Построение средней линии

Отрезки AB и CB разбиваем на равные части (1, 2, 3). Одноимённые точки соединя-

ем прямыми, затем строим огибающую, которая является средней линией, изогнутой по параболе.

Силы, действующие на штамповый инструмент

Штамповый инструмент для радиального выдавливания с решётками каналов профиля турбинных лопаток подвергается действию вращательной силы, возникающей из-за разности контактных площадей антиспинки и антикорыта.

Эту силу можно определить по формуле

$$P_{вр} = (lP_{ас} - lP_{ак})p_{уд}n,$$

где l – длина лопатки (отростка); $P_{ас}$ и $P_{ак}$ – площади антиспинки и антикорыта; $p_{уд}$ – удельная сила; n – число лопаток.

Сила $P_{вр}$ может достичь больших значений, а диаметр поковки колеса лопаточной машины составляет 100...300 мм, в связи с чем возникает момент, который приводит к изгибу отштампованных лопаток в корневом сечении. С целью исключения данного явления на 3 – 5-й вставках вводят элементы, размеры которых больше размеров лопатки. Эти элементы воспринимают указанную силу и для них необходимо проводить расчёт на смятие [3].

Силы раскрытия в каналах многоразъёмного составного штампа

В процессе заполнения деформируемым металлом каналов сложного аэродинамического профиля в них возникают силы раскрытия (по аналогии с аэродинамической подъемной силой). Суть этого заключается в том, что под действием потока деформируемого металла за счёт разности контактных поверхностей двух рядом стоящих штамповых вставок возникают силы раскрытия, которые могут быть различными.

Отмечается большая разница в величине контактных площадей антиспинки и антикорыта, что приводит к возникновению сил раскрытия в каждом канале. Сила раскрытия действует по окружности, на которой расположены штамповые вставки, в зависи-

мости от направления больших площадей в канале штампа.

Суммарная сила раскрытия достигает больших значений и определяется выражением

$$P_{раск} = (P_{ас} - P_{ак})p_{уд}n,$$

где $p_{уд}$ – удельная сила.

Выводы

1. Разработана классификация цельноштампованных рабочих колёс типа «диск вместе с лопатками», которые могут изготавливаться точной объёмной штамповкой в многоразъёмных штампах.

2. Разработаны опытно-промышленные схемы и конструкции многоразъёмных штампов, позволяющие изготавливать точные заготовки рабочих колёс лопаточных машин в производственных условиях с минимальной механической обработкой и высокими значениями коэффициента использования материала.

3. С использованием графоаналитического метода построены теоретические решётки каналов многоразъёмных штампов, которые позволяют определить силы раскрытия и вращения, действующие в этих штампах.

Библиографический список

1. Воробьёв, В.М. Классификация цельноштампованных колёс лопаточных машин [Текст] / В.М. Воробьёв // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2010. - №11. - С. 23 – 27.
2. Воробьёв, В.М. Построение теоретических решёток каналов многоразъёмных штампов и расчёт действующих в них сил [Текст] / В.М. Воробьёв // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2011. - №1. - С. 25 – 28.
3. Воробьёв, В.М. Разработка схем и конструкций многоразъёмных штампов для производства точных заготовок с отростками [Текст] / В.М. Воробьёв // Заготовительные производства в машиностроении. - 2011. - №2. - С. 30 – 32.

THEORETICAL BASIS OF FORMING FORGING IMPELLERS OF BLADE MACHINES IN MULTICHANNEL STAMPS

© 2012 V. M. Vorobjev

Moscow Science and Technical Centre «AVERT»

It is proposed the classifier of solid stamped impellers used in gas and hydraulic impeller machines produced by hoy (semi-hot) stamping, which were produced in aviation industry. Article recounts information about research and development of schemes and structures of the multisectional stamps, non-dismountable (tyre supported) and dismountable wheels after forming. Extruding insertions are being pulled from interblade channels. It is considered the principle of constructing theoretical cylindrical lattices of channels for multi-split stamps, due to which it is possible to calculate the forces of disclosure in stamps' channels and rotational forces of the compound matrixes during extrusion.

Precise bulk stamping, impeller machines, impellers, integrated blade disc configuration (mono-disc), multi-split stamp, dismountable and non-dismountable stamps, precise blanks of impeller machines, turbine-driven sets, centrifugal pumps, stamps' channel, theoretical channels lattices, disclosure force, rotational force.

Информация об авторах

Воробьев Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, генеральный директор Московского научно-технического центра «АВЕРТ». E-mail: avert_msk@mail.ru. Область научных интересов: разработка и производство малошумных циркуляционных насосов.

Vorobjev Vladimir Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, General Director of Moscow Science and Technical Centre «AVERT». E-mail: avert_msk@mail.ru. Area of Research: Precise bulk stamping, impeller machines, impellers.