

УДК 621.73

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ОБЪЁМНОЙ ШТАМПОВКИ ПОКОВОК КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С ЦЕЛЮ СОКРАЩЕНИЯ РАСХОДА МЕТАЛЛА.

Князев Ярослав Олегович

*Студент 5 курса,
кафедра «Информационные технологии обработки давлением»,
Московский государственный университет приборостроения и информатики*

*Научный руководитель: Лентяшин В.Б.,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии
обработки давлением»*

В турбореактивных двигателях и в компрессорах высокого давления одной из основных деталей является компрессорные лопатки. Как правило, данные детали изготавливаются из титановых сплавов.

В настоящее время на машиностроительных заводах применяются следующие способы штамповки компрессорных лопаток:

- Штамповка в один переход или с предварительной осадкой.
- Штамповка с предварительной высадкой заготовок на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ).
- Штамповка с предварительной высадкой заготовок на электровысадочных машинах.
- Штамповка с предварительной вальцовкой заготовок.
- Изотермическая штамповка.

Рассмотрим более подробно каждый из вышеперечисленных видов.

Штамповка в один переход или с предварительной осадкой применяется в случае, когда размеры лопатки малы, а перепад площадей поперечных сечений велик, что затрудняет использование классических заготовительных переходов. Данный способ штамповки обладает тем преимуществом, что штамповка, как правило, производится с одного нагрева, что позволяет уменьшить глубину альфированного слоя, но при этом повышается расход металла.

Штамповка с предварительной высадкой на ГКМ в настоящее время является наиболее распространённым способом фасонирования заготовок и позволяет снизить расход металла по сравнению со штамповкой в один переход. Стержень высаженной этим способом заготовки имеет постоянное поперечное сечение, площадь которого выбирается по площади максимального сечения пера заготовки лопатки из условия устойчивости заготовки при высадке хвостовой части. Так же необходимо учитывать допустимую степень деформации металла, что приводит к увеличению диаметра стержневой части при значительном перепаде площадей поперечного сечения пера и замковой части лопатки. Учитывая, что ГКМ, как правило, устанавливают отдельно от прессов, то возникает необходимость дополнительного нагрева заготовок перед окончательной штамповкой, что приводит к увеличению альфированного слоя.

Электровысадка заготовок позволяет избежать дополнительного нагрева в печи перед фасонированием заготовки, поскольку нагрев производится непосредственно на электровысадочной машине, кроме того во время данного процесса нагревается только деформируемая часть заготовки. Электровысадка обладает рядом преимуществ перед операцией высадки на ГКМ:

- она не требует нагревательного оборудования (печи);

- поскольку время нагрева и высадки относительно невелико, то глубина альфированного слоя меньше;
- технологическая оснастка значительно проще и дешевле оснастки необходимой для операции высадки на ГКМ.

При электровысадке на диаметр высаженной части, как и при высадке на ГКМ влияет допустимая степень деформации, что приводит к ограничению минимального диаметра стержневой части, а следовательно к увеличению расхода металла.

Вальцовка позволяет получить заготовки с переменным сечением по длине заготовок и позволяет снизить расход металла и повысить трудоёмкость, но данный процесс имеет и ряд недостатков:

- как и штамповка на ГКМ требует предварительного нагрева;
- для удержания заготовки необходимо предусмотреть необжимаемый участок длиной 0,4-0,5 диаметра, что не всегда представляется возможным;
- в процессе вальцовки возникает неконтролируемое удлинение обжимаемых частей заготовки.

В процессе изотермической штамповки в заготовке, инструменте и окружающем их ограниченном пространстве создается и постоянно поддерживается температура, обеспечивающая оптимальную пластичность металла обрабатываемой заготовки. Деформирование осуществляется при малых скоростях, поэтому разупрочняющие процессы успевают протекать в его ходе, что повышает технологическую пластичность металла и резко снижает сопротивление пластическому деформированию. Учитывая что деформирование протекает в условиях статического нагружения для изготовления штампов можно использовать высокожаропрочные и износостойкие материалы с низкой пластичностью. Применение изотермической штамповки позволяет получать точные поковки с высоким коэффициентом использования металла. При изотермической штамповке, как правило в качестве смазки применяют стеклосмазки, что позволяет защитить поверхность поковки от окисления и газонасыщения. Но при всех вышеперечисленных плюсах изотермическая штамповка имеет существенный недостаток: высокая длительность процесса деформирования.

Рассмотрим изготовление компрессорной лопатки 7 ступени двигателя ВК-2500. Данная лопатка имеет значительный перепад толщины по длине, так как площадь поперечного сечения пера значительно меньше площади поперечного сечения замка. По массе поковка лопатки относится к мелким, тип производства – серийный. Так как данная деталь является очень ответственной, то к поковке предъявляются строгие требования, что сказывается на требованиях к штампу, его стойкости и стоимости.

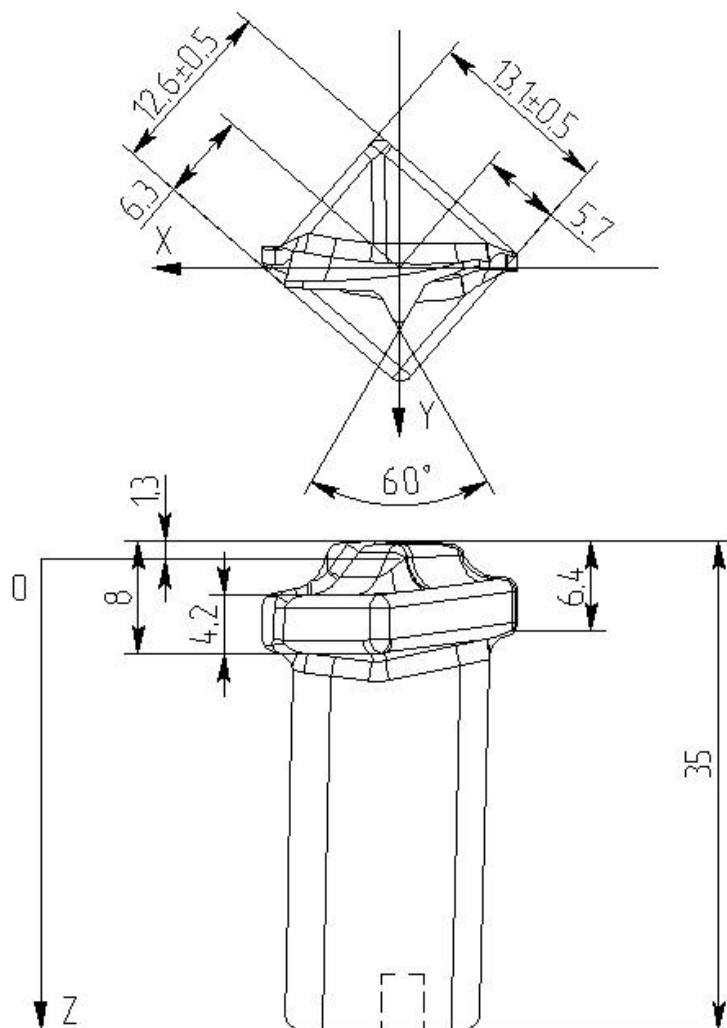


Рис. 1. Эскиз поковки лопатки 7 ступени двигателя ВК-2500

Лопатка изготавливается из сплава ВТ8. Этот сплав относится к деформируемым жаропрочным титановым сплавам. Одним из важнейших качеств титана является его высокая коррозионная стойкость во многих агрессивных средах, обусловленная образованием на его поверхности тонкой инертной пленки из диоксида, взаимодействующего с нижележащим слоем титана с образованием низших оксидов, растворимых в металле, благодаря чему защитная пленка прочно связывается с поверхностью. Если и происходит коррозия титана, то почти всегда она протекает равномерно, без локализации по точкам, язвам или границам зерен. Наряду с этим ценность титана как конструкционного материала обусловлена его значительной удельной прочностью, которая у титана больше, чем у любого другого металла.

Для горячего деформирования титановых сплавов лучше применять оборудование с малыми скоростями: гидравлические и кривошипные прессы. Нагрев титановых сплавов под ковку и штамповку на машиностроительных заводах рекомендуется проводить в электрических печах. При нагреве титана образуется альфированный слой, который понижает физико-механические характеристики поковки.

Сплав ВТ8 имеет ($\alpha+\beta$) структуру, данные сплавы обладают более высокой прочностью, но меньшей пластичностью, чем β -сплавы. Эти сплавы после отжига подвергаются закалке с последующим старением, что значительно повышает их прочность.

В настоящее время данная деталь изготавливается используется заготовка диаметром 18мм, длиной 34мм и массой 38,9г. Заготовку нагревают до 980°C и

осаживают на высоту 30мм. Затем её зачищают, контролируют на наличие дефектов и снова нагревают. После нагрева заготовку штампуют в окончательном штампе, снова зачищают, отправляют на травление и контролируют дефекты. Данная технология имеет несколько недостатков: во-первых, это дополнительный нагрев и промежуточный контроль дефектов, данные операции можно исключить, во-вторых, высокий расходный коэффициент. Повышенный расход металла связан с тем, что использование стандартных заготовительных переходов представляется затруднительным: для высадки на ГKM и электровысадки: высаживаемая часть может потерять устойчивость, и будет превышена допустимая степень деформации, а применение вальцовки не представляется возможным так как длина замковой части очень мала и её не хватит для удержания заготовки клещами. Учитывая, что изотермическая штамповка обладает малой производительностью, то была предложена следующая последовательность изготовления данной лопатки: нагрев до 980°C, выдавливание стержневой части с площадью, равной максимальной площади поперечного сечения пера поковки лопатки с учётом облоя затем производится высаживание замковой части и окончательная штамповка. Диаметр заготовки для предложенного технологического процесса равен 9мм, длина 33мм, а масса 9,5г.

Данная технология имеет ряд преимуществ по сравнению с базовой:

- все операции производятся с одного нагрева, что позволяет уменьшить глубину альфированного слоя;
- Расход металла на заготовку в 4 раза меньше, чем в базовом варианте

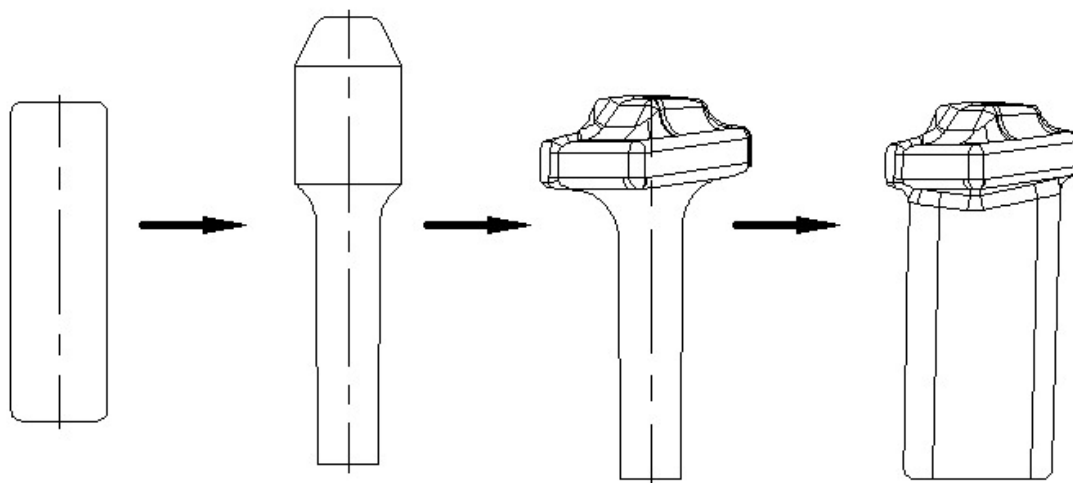


Рис. 2. Переходы штамповки

Поскольку все операции будут выполняться на кривошипных прессах, то данный способ штамповки будет более производительным чем изотермическая штамповка. Но при высадке замковой части происходит удлинение стержневой части (Δl), которое необходимо учесть, что бы обеспечить заполнение полости штампа, для этого нужно учесть ряд факторов, поэтому было принято решение промоделировать процесс высадки в программе QForm и выявить зависимость относительного удлинения от геометрических параметров поковки и коэффициента трения. В процессе исследования было выяснено, что квадратную замковую часть можно заменить осесимметричной, равной по площади, поэтому моделирование проводилось в QForm 2D.

Для того что бы определить удлинение стержневой части, было проведено многофакторное исследование влияния на относительное удлинение конкретных геометрических параметров и коэффициента трения. В настоящем докладе этот этап представлен лишь в конечном виде:

$$\Delta l = (k_1 - 0,036n - k_2\rho - k_3\xi_1 + 0,133\varepsilon_{\text{выс}}^2 - 0,005\varepsilon_{\text{выс}} - 0,009\alpha - 0,044f) \cdot l - 0,009 \frac{l^2}{d},$$

где

n – относительный диаметр высаженной части, рассчитывается по формуле

$$n = \frac{D}{d},$$

ρ – относительный радиус скругления стержневой части, рассчитывается по

$$\text{формуле } \rho = \frac{R}{d},$$

ξ_1 – относительный радиус скругления дна матрицы, рассчитывается по формуле

$$\xi_1 = \frac{r_1}{d},$$

$\varepsilon_{\text{выс}}$ – степень деформации при высадке, рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{\text{выс}} = 1 - \frac{D_1^2}{D^2},$$

α – угол наклона стержневой части,

f – коэффициент трения,

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты которые берутся из таблицы 1,

Остальные параметры согласно рисунку 3.

Таблица 1. Коэффициенты для расчета относительного удлинения.

Ограничения	k_1	k_2	k_3
$\rho > 0,89, \xi_1 > 0,157$	0,1527	0	0
$\rho < 0,89, \xi_1 > 0,157$	0,2707	0,135	0
$\rho > 0,89, \xi_1 < 0,157$	0,2077	0	0,309
$\rho < 0,89, \xi_1 < 0,157$	0,3257	0,135	0,309

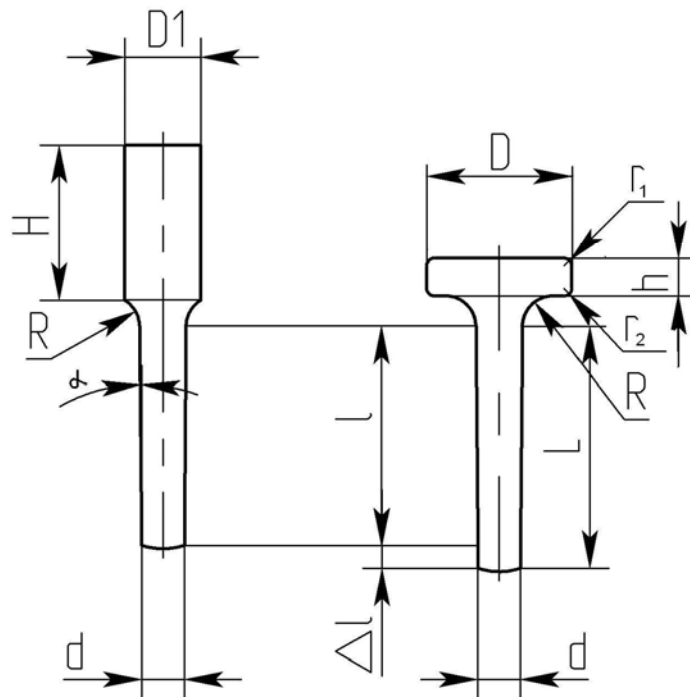


Рис. 3. Эскиз предварительно выдавленной и высаженной осесимметричной заготовки.

Так как при исследовании были выявлены ограничения на геометрические параметры, то и на вышеприведённую зависимость они будут действовать:

$$m > 4,24,$$

$$d + 2l \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \leq D_1 \leq \frac{d}{\sqrt{1 - \varepsilon_{\text{выд}}}},$$

$$R \geq \frac{D_1 - d - 2l \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{2},$$

$$r_1 \leq h - r_2,$$

где

m – отношение длины стержня (l) к диаметру стержневой части (d),

$\varepsilon_{\text{выд}}$ – степень деформации в процессе выдавливания.

Как правило, перед технологами стоит следующая задача: зная длину стержневой части после высадки найти длину стержневой части заготовки перед высадкой. Учитывая, что длина стержневой части после высадки равна:

$$L = l + \Delta l$$

Получаем следующую зависимость:

$$l = \frac{-d(1+m) + d \sqrt{(1+m)^2 + \frac{0,036}{d} \cdot L}}{0,018},$$

где

$$m = k_1 - 0,036n - k_2\rho - k_3\xi_1 + 0,133\varepsilon_{\text{выс}}^2 - 0,005\varepsilon_{\text{выс}} - 0,009\alpha - 0,044f$$

Рассчитаем длину стержневой части заготовки под высадку для лопатки 7 степени двигателя ВК-2500.

$$m = 0,2707 - 0,036 \cdot 2,83 - 0,135 \cdot 0,8 + 0,133 \cdot 0,6^2 - 0,005 \cdot 0,6 - 0,009 \cdot 0,5 - 0,044 \cdot 0,3 = 0,088$$

$$l = \frac{-5,6(1+0,088) + 5,6 \sqrt{(1+0,088)^2 + \frac{0,036}{5,6} \cdot 28}}{0,018} = 25 \text{ мм}$$

По результатам моделирования критическая длина стержневой части, при которой происходит заполнение полости ручья штампа равна 26,9мм. Так как расчётная длина стержневой части меньше критической, то полость ручья штампа заполнится.

Таким образом проведённое исследование показало, что программа QForm, является универсальным инструментом, в том числе и по разработке информационных технологий в процессах объёмного деформирования металлов.

В заключении необходимо отметить, что предложенная технология горячей штамповки поковок компрессорных лопаток из сплава ВТ8 для двигателя ВК-2500 позволяет использовать заготовку Ø9х33мм, массой 9,5г, что сократило расход металла в 4 раза по сравнению с действующей технологией штамповки лопаток из заготовок Ø18х34мм, массой 38,9г.