

## **Изотермическая штамповка титановых лопаток**

### **1. Введение**

Выпуск современных компрессоров и турбин связан с изготовлением большого количества лопаток, выполненных из различных материалов и отличающихся формой, размерами и др. Для каждого типа лопаток существует своя наиболее рациональная технология производства [1]. В частности, для компрессорных лопаток из титановых сплавов такой технологией является штамповка в изотермических условиях с использованием специализированного оборудования и инструмента [2, 3].

Однако освоение технологии изотермической штамповки связано с рядом трудностей, к числу которых относится остаточное коробление лопаток, обуславливающее повышенный расход металла или увеличению трудоемкости штамповки. В связи с этим необходимо разработать технологию изотермической штамповки, обеспечивающую устранение или регулирование остаточного коробления в компрессорных лопатках из титанового сплава ВТЗ-1.

### **1. Результаты и их обсуждение**

Исследования проводили на экспериментальном и производственном участках ГП «Заря – Машпроект» (г. Николаев) и УкрГосНИИКМ «Прометей» (г. Мариуполь), оснащенных гидравлическими прессами ПА 2638 силой 6,3 МН с установленными на них изотермическими штамповыми блоками ГИД-3 и ГИД-280, рассчитанными на штамповые вставки размерами 279x149x87,5 и 380x180x87,5 мм. В качестве смазки использовали стеклоэмаль ЭВТ-24. Предварительно заготовки нагревали в электропечах типа СНО, СНОЛ и ОКБ-210.

Базовый процесс изотермической штамповки компрессорных лопаток с длиной пера до 250 мм, освоенный ГП «Заря – Машпроект», включал следующие основные операции:

- нанесение на заготовку смазки ЭВТ-24, нагрев в электропечи до 930 °С и высадка замка за два перехода на горизонтально-ковочной машине;
- очистка поковки от смазки в дробеметной камере, нанесение на заготовку нового слоя смазки ЭВТ-24, нагрев до 930 °С в электропечи, перенос заготовки в блок ГИД-3 и облойная изотермическая штамповка на гидропрессе ПА 2638 со скоростью деформирования 2 мм/с;
- обрезка облоя на кривошипном прессе, очистка поковки от смазки, нанесение на поковку нитрида бора, нагрев в электропечи до 870 °С и изотермическая калибровка на гидропрессе ПА 2638 с выдержкой под давлением в штампе в течение 30 с.

За многолетний период применения изотермической штамповки в ГП «Заря – Машпроект» базовая технология подвергалась многократным усовершенствованиям. Был изменен состав стеклоэмали ЭВТ-24, в которую добавили окись хрома для улучшения эксплуатационных свойств смазки. По мере расширения номенклатуры штампуемых лопаток изотермическую штамповку стали проводить в два перехода, высадку замков на малогабаритных лопатках с коротким пером – на электровинтовых прессах с дугостаторным приводом, а штамповку части других лопаток – на гидровинтовых прессах силой 16 МН, оставив на гидропрессе ПА 2638 только операции изотермической калибровки. Для каждой лопатки были уточнены скоростные режимы изотермического деформирования по переходам. В результате удалось снизить в поковках компрессорных лопаток припуск на размеры пера с 0,8-2,0 до 0,3-0,6 мм, уменьшить трудоемкость подгонки профиля пера каждой лопатки после штамповки в среднем на 0,25 нормочасов.

Изотермическая калибровка позволила устранить коробление лопаток, штампуемых на кривошипных прессах с припусками на размеры пера 0,8-2,0 мм. Однако уменьшение толщины пера, связанное с уменьшением припусков в 2-3 раза, стало вызывать вторичное коробление лопаток даже после изотермической калибровки. В связи с этим были проведены работы по оптимизации температурно-силовых и временных режимов изотермической калибровки на основе известного правила фаз Гиббса [4], которое указывает на

возможность регулирования температуры фазового превращения металлического материала путем изменения прилагаемого к нему гидростатического давления. На установке высокого давления типа цилиндр-поршень по методикам, изложенным в монографии [5], было изучено влияние гидростатического давления на снижение температуры полиморфного превращения  $T_n$  сплава ВТЗ-1. Полученные результаты аппроксимировали полиномом второй степени:

$$\Delta T = 226,32\gamma^2 + 31,14\gamma + 1,42, \quad (1)$$

где  $\Delta T$  - разность между температурой полиморфного превращения  $T_n$  сплава при нормальном давлении и температурой нагрева заготовки,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\gamma$  - гидростатическое давление на заготовку в процессе эксперимента, МПа.

Сравнение соотношения между параметрами  $\gamma$  и  $\Delta T$  уравнения (1) с режимами калибровки лопаток показало, что вероятной причиной вторичного коробления может быть снижение температуры  $T_n$  сплава ВТЗ-1 ( $T_n = 980^{\circ}\text{C}$  при нормальном давлении) ниже температуры нагрева  $T$  штампа с лопаткой. В этом случае изотермическая калибровка фактически происходит в температурном диапазоне существования  $\beta$ -фазы, то есть с разупрочнением сплава ВТЗ-1, способствующим при неравномерном остывании различных по толщине участков лопатки искажению ее формы.

Для проверки высказанного предположения были изменены режимы калибровки лопаток с учетом уравнения (1). Перед калибровкой по давлению на манометре пресса, изменяемому в диапазоне 2-10 МПа, и площади гидропривода ( $3115,67 \text{ см}^2$ ) определяли общее усилие калибровки, воспринимаемое пером лопатки. Затем по известным габаритным размерам пера рассчитывали давление калибровки  $p$ , по которому с помощью зависимости (1) устанавливали температуру нагрева  $T$  лопатки. Схема напряженного состояния при калибровке компрессорных лопаток (с малым углом закрутки пера) позволяла приравнивать давление калибровки  $p$  к гидростатическому давлению  $\gamma$  в установке цилиндр-поршень. Время

выдержки лопатки под давлением в штампе варьировали в диапазоне 15-120 с (с шагом 15 с).

Отработка новых режимов изотермической калибровки позволила определить оптимальную технологию, обеспечивающую отсутствие вторичного коробления лопаток при выполнении следующих требований:

- температура нагрева лопаток должна быть в пределах  $T = (0,95-0,98) T_n$ , поскольку при  $T < 0,95T_n$  давление калибровки  $p$  будет соизмеримо с пределом циклической ползучести материала штампа и приведет его к преждевременному пластическому деформированию, а нагрев лопаток до температуры выше  $0,98T_n$  обусловит в соответствии с уравнением (1) весьма малое давление калибровки  $p$ , которое даже при большом времени выдержки лопаток в штампе не гарантирует устранение вторичного коробления;

- давление калибровки  $p$  следует определять из уравнения (1) с учетом допущения  $p = \gamma$ ;

- зависящее от  $\Delta T$  время  $\tau$  выдержки лопатки под давлением в штампе необходимо определять из экспериментально установленного соотношения:

$$\Delta T = 0,51\tau^2 - 4,167\tau + 101.$$

Внедренная на ГП «Заря – Машпроект» технология изотермической калибровки компрессорных лопаток из титанового сплава ВТЗ-1 позволила в существенной мере устранить вторичное коробление и обеспечить тем самым снижение трудоемкости штамповки на 6-8 %.

Однако возникла проблема извлечения лопаток со сложным контуром пера из штампа после изотермической калибровки. Если гравюра штамповых вставок достаточно глубока, что характерно для лопаток с ложкообразным контуром пера и двумя замками, имеющими скрещивающиеся оси, то даже замена смазки – стеклоэмали ЭВТ-24 – на нитрид бора (антисмазку) не устраняет залипания лопаток в штампе при изотермической калибровке. Трудоемкость выбивания лопатки вручную из гравюры нижней вставки зачастую превышает по объему работ трудоемкость всего цикла штамповки или обуславливает неустраняемый брак по размерам.

Для решения этой проблемы была разработана технология, предусматривающая самоизвлечение лопатки из гравюры нижней штамповой вставки за счет ее вторичного коробления в пределах допуска на размеры. Согласно технологии, после изотермической калибровки верхнюю штамповую вставку поднимают, затем через загрузочное окно вводят в штамповый блок спрейер и обдувают сжатым газом поверхность обоих замков лопатки. В результате некоторого охлаждения замков при сохранении температуры пера лопатки происходит небольшое коробление лопатки – незначительное скручивание (поскольку оси у замков скрещиваются), тем не менее достаточное для самоизвлечения из нижней штамповой вставки.

В процессе производственных испытаний установлено, что если лопатка имеет увеличенные габаритные размеры, охлаждение всей поверхности замков нецелесообразно, так как для самоизвлечения лопатки требуется продолжительное время обдувки массивных замков струей сжатого газа. Продолжительность обдувки можно сократить, если струю сжатого газа направлять на участки поверхности замков, находящиеся в зонах контакта с гравюрой нижней штамповой вставки. Во избежание охлаждения поверхности пера лопатки не следует охлаждать поверхность замков, сопрягаемую с поверхностью пера лопаток, так как в противном случае коробление последних при выскальзывании из нижней штамповой вставки превысит допустимые пределы.

Для лопаток с замками размером от 62x30 до 86x44 мм, углом между скрещивающимися осями замков  $20-22^{\circ}$ , длиной и шириной ложкообразного пера соответственно 62-250 и 42-73 мм при толщине пера 2,5-12 мм время обдувки до самоизвлечения из нижней штамповой вставки составило 10-15 с. Линейное отклонение размеров пера при короблении скручиванием не превышало 0,2 мм.

#### **Список использованных источников:**

1. Богоявленский К.Н. Изготовление деталей пластическим деформированием / К.Н. Богоявленский [и др.].- М.: Машиностроение, 1975.- 424с.

2. Анищенко А.С. Состояние и перспективы внедрения изотермического деформирования и деформирования в режиме сверхпластичности /А.С. Анищенко, М.А. Цепин, Д.И. Чашников // Судостроительная промышленность, серия «Металлургия и металловедение», 1987, вып. 4, С.48-52.
3. Анищенко А.С. Штамповый блок для изотермического деформирования металлов / А.С. Анищенко, М.П. Найденов, А.П. Андрющенко // Технология и организация производства, 1984, №1, С.24-25.
4. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев.- М.: Metallurgy, 1978.- 647с.
5. Шиняев А.Я. Фазовые превращения и свойства сплавов при высоком давлении / А.Я. Шиняев.- М.: Наука, 1973.- 155с.