

УДК 62-226.2:621.73
DOI: 10.12727/17797

А.С. Матвеев, д.т.н.
(Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А. Соловьева,
152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53),
В.В. Андреев, главный специалист,
В.Б. Быстров, начальник сектора штамповки,
Р.А. Казаков, ведущий инженер-технолог
(ОАО "НПО" Сатурн", Ярославская область, г. Рыбинск)
E-mail: matveev_as_1@mail.ru

Инновационная технология производства заготовок широкохордных лопаток газотурбинных двигателей

Изложен метод проектирования крупногабаритных широкохордных заготовок лопаток авиационных газотурбинных двигателей, преднамеренно штампуемых без закрутки профиля пера, рассмотрены целесообразные варианты технологической последовательности их обработки, описана конструкция штампа для выполнения закрутки пера заготовок лопаток и стабилизации полученных геометрических размеров.

Ключевые слова: лопатка; проектирование заготовки; закрутка пера; штамп.

A.S. Matveev, d.en.s.
(P.A. Solov'ev Rybinsk State Aviation Technical University
152934, Yaroslavl region, Rybinsk, Pushkin St., 53),
V.V. Andreev, chief specialist,
V.B. Bystrov, chief of sector of stamping,
R.A. Kazakov, lead manufacturing engineer
(JSC "NPO Saturn", Yaroslavl Region, Rybinsk)

Innovative manufacturing technology of billets of wide-chord blades of gas turbine engines

The method of design of wide-chord billets for blades of aircraft gas turbine engines, deliberately fabricated without twist of the airfoil profile, is described. The feasible options of manufacturing sequence of their processing are considered. The stamp structure for pen twist of the blade billets and stabilizing the obtained geometric dimensions are described.

Keywords: blade; billet design; pen twist; stamp.

В авиационных двигателях IV поколения используют вентиляторы с лопатками, имеющими антивибрационные полки. Полки обеспечивают устойчивость лопатки к автоколебаниям, но их присутствие в области высоких скоростей потока приводит к увеличению потерь и снижению экономичности двигателя.

В авиадвигателях V поколения этот недостаток устранён путем оснащения вентилятора (рис.1), так называемыми, широкохордными бестолочными лопатками, имеющими малое

отношение высоты к хорде лопатки. Вентиляторы, оснащённые лопатками этого типа, имеют более высокую аэродинамическую эффективность, позволяя на 3...4 % снизить удельный расход топлива. Кроме того, имеется целый ряд эксплуатационных преимуществ: более высокие запасы устойчивой работы, повышенная стойкость к попаданию посторонних предметов, снижение затрат на изготовление, сборку и замену лопаток в эксплуатации. Производство широкохордных лопаток по

традиционным технологиям, включает в себя изготовление штамповкой заготовки лопатки с технологическими бобышками, припусками по перу и замку с последующей обработкой заготовки резанием или электрофизическими методами.



Рис. 1. Вентилятор авиадвигателя, оснащенный широкохордными лопатками

Характерные недостатки этих технологий сводятся к следующему. При изготовлении заготовки значительный по величине угол закрутки концевой части пера лопатки относительно прикомлевого (в диапазоне 80...110°), вызывает неуравновешенные сдвигающие силы между элементами штампа, отрицательно влияющие, как на точность изготавливаемой штамповки, так и на равномерность распределения припуска по перу лопатки (рис. 2).

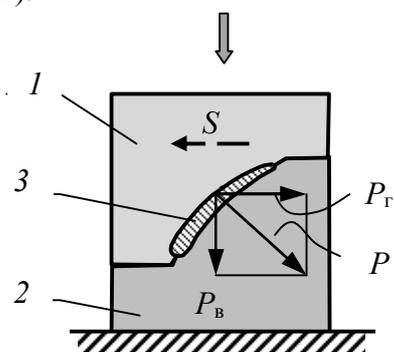


Рис. 2. Схема сил, действующих при штамповке заготовки лопатки с закрученным профилем пера:

1, 2 – верхняя и нижняя половины штампа; 3 – перо заготовки лопатки; P_r , P_v – горизонтальная и вертикальная составляющие силы штамповки P ; S – вектор смещения верхней половины штампа относительно нижней

Для их частичной нейтрализации половины штампа оснащают специальными выступами (замками) одновременно разворачивая гравюру штампа относительно плоскости его разъема для создания встречно направленных гори-

зонтальных составляющих сил при штамповке заготовки. Несмотря на применяемые меры, гравюры половин штампа имеют значительную глубину со сложным пространственным профилем. Это отрицательно сказывается как на технологичности изготовления штампа, так и его стойкости.

При последующем удалении припуска по перу лопатки, например фрезерованием, выполненная на штамповке закрутка профиля пера лимитирует диаметр, а, следовательно, и жесткость используемых концевых или дисковых фрез, не позволяя существенно увеличить режимы резания.

В настоящей статье рассмотрен один из способов повышения рентабельности производства авиационных двигателей в части снижения трудоёмкости изготовления крупногабаритных широкохордных лопаток вентилятора.

В ОАО "НПО" Сатурн" предложен новый способ проектирования технологических процессов изготовления крупногабаритных широкохордных лопаток ГТД с использованием горячей закрутки пера, как базовой формообразующей операции при изготовлении заготовки-штамповки [1].

Способ реализуется следующим образом. На первом этапе перерабатывают конструкторский чертеж лопатки, раскручивая и раздвигая между собою расчетные i -е сечения пера. При этом приняв прикомлеванное сечение 1 (рис. 3, а) пера 2 лопатки за базовое сечение, поворачивают каждое i -е сечение 3 вокруг своего центра масс (рис. 3, б) относительно базового сечения на угол φ_i его закрутки. При этом хорды 6 (рис. 3, 4) каждого i -го сечения 3 располагают параллельно хорде 7 базового сечения 1, выполняя тем самым раскрутку пера 2 и фиксируя новые значения координат его профиля.

Расстояние l_k между двумя характерными точками корректируемого и базового сечений, для каждого i -го сечения 3 выполняют на величину больше сокращения этого расстояния при закрутке и определяют по выражению:

$$l_k = \sqrt{l_i^2 + 4B^2 \left(\sin \frac{\varphi_i}{2} \right)^2},$$

где l_i – расстояние между базовым и корректируемым сечениями готовой лопатки; B – расстояние от точки на корректируемом сечении пера до центра масс этого сечения; φ_i – угол поворота корректируемого сечения пера относительно базового сечения пера лопатки.

При этом характерные точки, принадлежащие базовому и корректируемому сечениям,

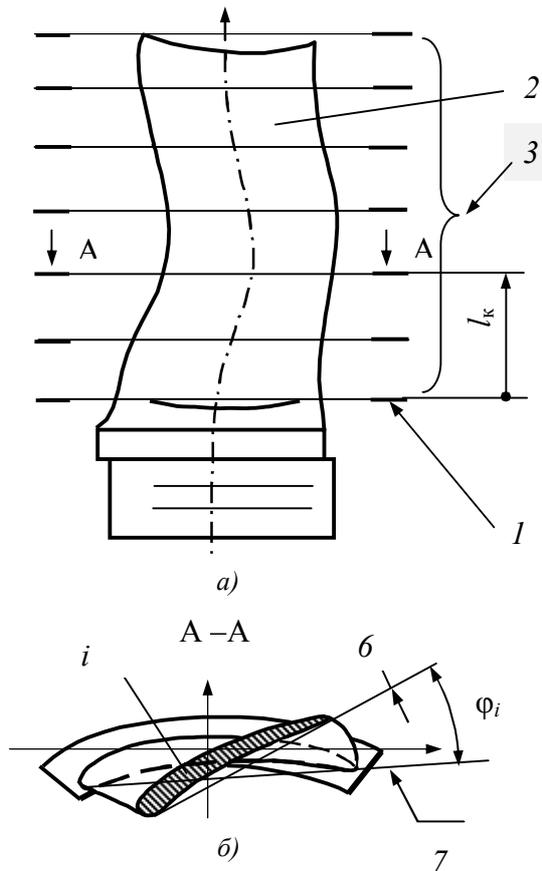


Рис. 3. Фрагмент конструкторского чертежа лопатки

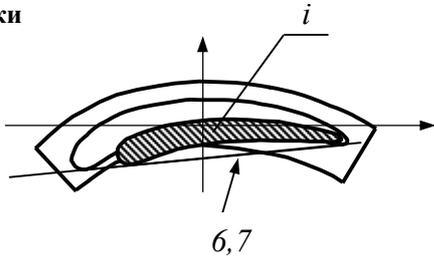


Рис. 4. "Раскрученное" *i*-е сечение пера лопатки

выбирают как принадлежащие к входной или выходной кромкам сечений, или к наиболее утолщенной зоне сечений со стороны спинки или корыта.

Затем определяют длину кромок пера заготовки и сравнивают с длиной кромок готовой лопатки. В общем случае длина кромок готовой лопатки больше на некоторую величину длины кромок раскрученной заготовки лопатки. При этом определяют степень деформации удлинения кромок пера заготовки лопатки при его будущей закрутке до чертежных размеров по выражению

$$\varepsilon = (L_{л} - L_3) / L_3,$$

где $L_{л}$ – длина кромки пера готовой лопатки; L_3 – длина кромки пера заготовки лопатки.

При степенях деформации удлинения кромок, близких, равных или превышающих предельно допустимые, т.е. "критических", чертеж заготовки лопатки подвергают корректировке.

Цель корректировки – выровнять длины кромок раскрученной заготовки лопатки (по средней линии) и готовой лопатки. Для этого кромку заготовки лопатки, имеющую "критические" степени деформации, выполняют волнообразной [2]. При этом точки, принадлежащие кромкам пера заготовки, смещают относительно самих себя в плоскостях, расположенных параллельно и перпендикулярно оси лопатки.

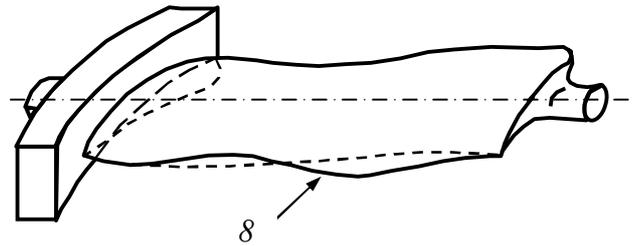


Рис. 5. Заготовка лопатки с волнообразной выходной кромкой 8 [2]

На рис. 5 показана волнообразная выходная кромка заготовки лопатки.

Полученный модифицированный чертеж лопатки является основой для проектирования заготовки лопатки с раскрученным профилем пера, технологическими базами и припусками под дальнейшую обработку, например резанием (рис. 6).

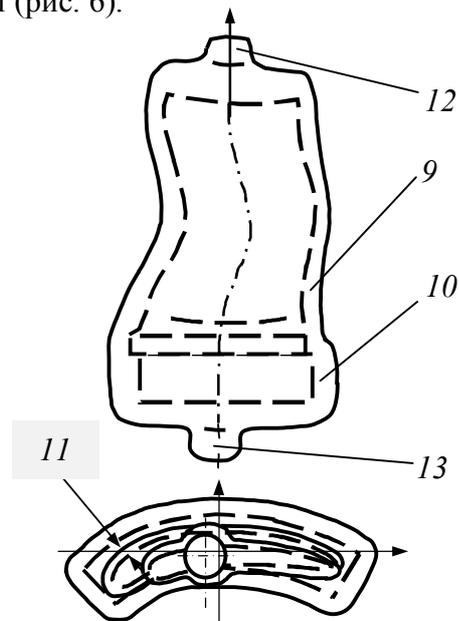


Рис. 6. Общий вид заготовки лопатки: 9, 10 – припуски по хорде сечений пера и замку; 11 – припуск по профилю пера; 12, 13 – технологические бобышки

Заготовку лопатки изготавливают методами объёмной штамповки. При этом раскрученный профиль пера позволяет разработать штамп с уменьшенной глубиной гравюр, существенно снизить сдвигающие силы между гравюрами при его работе, уменьшить габариты, повысить технологичность и снизить себестоимость изготовления.

Как вариант при последующем удалении припуска по перу отштампованной заготовки, например фрезерованием, ее раскрученный профиль пера позволяет использовать более жёсткий режущий инструмент, например концевые фрезы увеличенного диаметра или дисковые фрезы с большей шириной режущей части. Это в свою очередь позволяет увеличить режимы обработки профиля пера (глубину резания, подачу и т.д.), увеличив тем самым производительность изготовления лопаток, а также улучшить качество обрабатываемой поверхности. В отдельных случаях появляется возможность использовать менее сложное металлорежущее оборудование (например, применить при обработке профиля пера четырёхкоординатные фрезерные станки с ЧПУ вместо пятикоординатных и т.д.).

По другому варианту раскрученный профиль пера позволяет существенно уменьшить величину припуска по перу при изготовлении заготовки лопатки высокоточными методами обработки металлов давлением, например изотермическим деформированием. При этом стойкость штампа можно увеличить за счет снижения технологической температуры изотермической штамповки заготовки лопатки, например из титанового сплава, предварительно создав ультрамелкозернистую структуру материала в исходной прутковой заготовке, подвергнув ее интенсивной пластической деформации равноканальным угловым прессованием [3].

При этом по обоим вариантам в структуру технологического процесса изготовления лопатки включают операцию закрутки профиля пера. Выбор метода закрутки сечений пера и фиксация его закрученного состояния определяется как геометрическими характеристиками лопатки, так и механическими свойствами ее материала. В зависимости от механических свойств материала лопатки операция закрутки пера может быть выполнена как в диапазоне ковочных температур при нагреве заготовки вне штампа, так и в изотермических условиях. В процессе закрутки волнообразные кромки заготовки лопатки, удлиняясь, приобретают

¹ В работе принимали участие Кузьмин Е.Г., Бажан Т.Ю.

требуемую, например прямолинейную форму. При этом растягивающие напряжения по длине кромок близки или равны нулю.

Для реализации операции горячей закрутки профиля пера широкохордных лопаток выполнен комплекс опытно-конструкторских работ и создано несколько вариантов полупромышленного оборудования [4–7]. Учитывая значительные капитальные затраты на его изготовление и доводку, принято решение об апробации операции горячей закрутки профиля пера в более дешевом специальном штампе [8]¹, устанавливаемом на универсальном прессовом оборудовании. В качестве объекта закрутки выбрана заготовка крупногабаритной широкохордной титановой лопатки вентилятора двигателя Sam-146 (рис.7).



Рис. 7. Лопатка вентилятора авиационного двигателя (высокопрочный титановый сплав ТА6V, 600×250×300 мм)

В состав штампа входят плиты 1, 2 (рис. 8) с направляющими колонками 3. При этом плита 2 имеет возможность вертикального перемещения вдоль колонок 3. На плите 1 жестко установлены матрица 4 с нижним копиром 5 и направляющие колонки 6. На колонках 6 установлена платформа 7, центральное отверстие которой охватывает матрицу 4 и копир 5. Аналогично на верхней плите 2 жестко установлен пуансон 8 с копиром 9 и направляющие колонки 10 с платформой 11. Рабочие гравюры матрицы 4 и пуансона 8 имеют, соответственно профили корыта и спинки заготовки лопатки с припуском на дальнейшую

обработку, или профили корыта и спинки готовой лопатки с минимально необходимым припуском на финишную обработку пера.

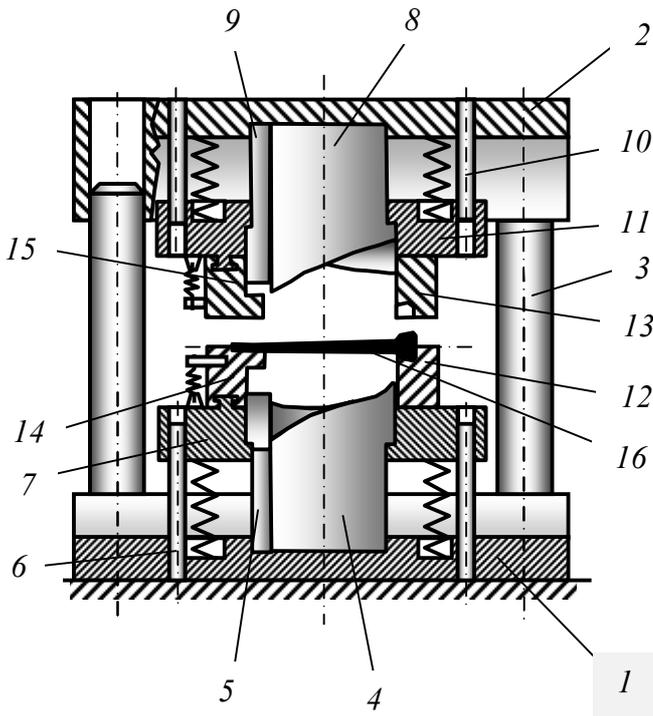


Рис. 8. Положение штампа на позиции загрузки заготовки лопатки

На платформах 7 и 11 противоположно друг другу жестко установлены прижимы 12, 13 и полуколеса 14, 15. При этом на торцевых зонах прижимов 12 и 13, обращенных друг к другу, выполнены гравюры, форма которых соответствует форме замка заготовки лопатки 16. В сомкнутом положении (рис. 9, 10) полуколеса 14 и 15 образуют единое колесо, ось вращения которого совпадает с осью пера заготовки лопатки 16 при ее прямолинейной оси, или с центром тяжести сечения заготовки, охватываемого гравюрами полуколес 14 и 15 при криволинейной оси заготовки. Полуколеса 14 и 15 связаны с платформами 7 и 11, например, посредством Т-образных пазов и имеют возможность вращения в сомкнутом положении на угол равный углу закрутки хорды конечного сечения пера заготовки относительно хорды ее прикомлевого сечения. Плоскость разъема колеса, образованного полуколесами 14 и 15 при смыкании, проходит через ось вращения колеса, параллельно хордам конечного и прикомлевого сечений заготовки в ее исходном, (т.е. при раскрученном пере) состоянии.

Дополнительно на торцах полуколес 14 и 15 со стороны, обращенной в сторону заготовки лопатки 16, выполнены ложементы 17 и 18

(рис. 11), соответственно. Указанные ложементы имеют гравюры, охватывающие, при смыкании полуколес 14 и 15, концевое сечение заготовки 16 со стороны корыта и спинки, а так же образуют выступ с плоскопараллельными гранями 19 и 20. При этом стороны 19 и 20 ложементов имеют возможность взаимодействия с копирами 5 и 9.

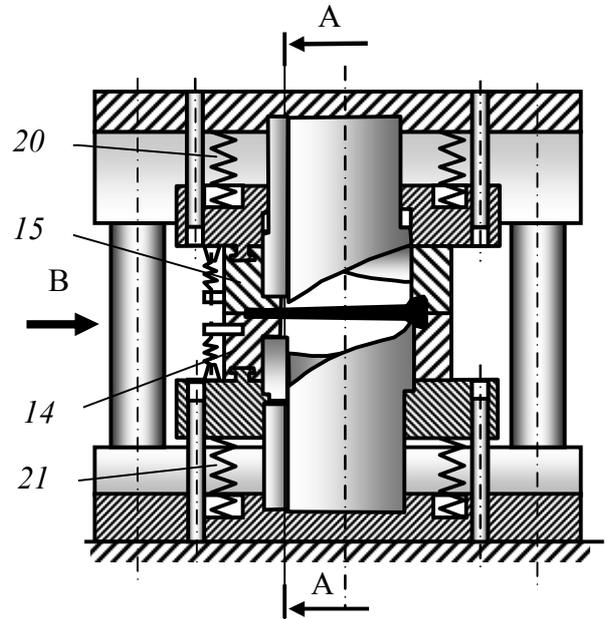


Рис. 9. Промежуточный этап фиксации раскрученной заготовки лопатки в штампе

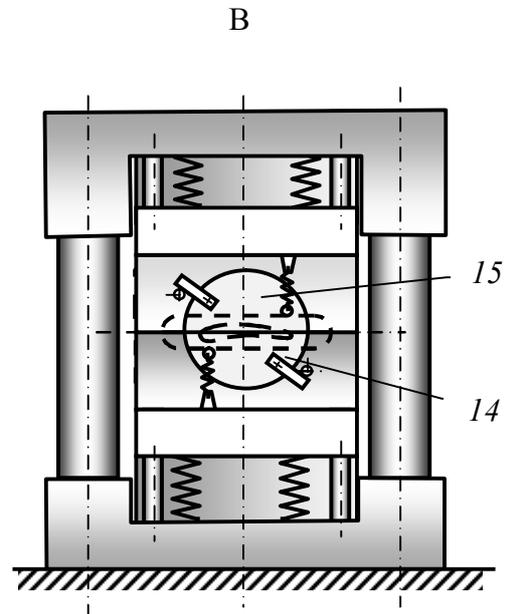


Рис. 10. Вид по стрелке В рис. 9

Операцию закрутки профиля пера заготовки лопатки осуществляют следующим образом. В исходном положении плита 2, (см. рис. 8) жестко связанная с траверсой прессы, пуансон 8, плита 11 и полуколесо 15 находятся в крайнем верхнем положении.

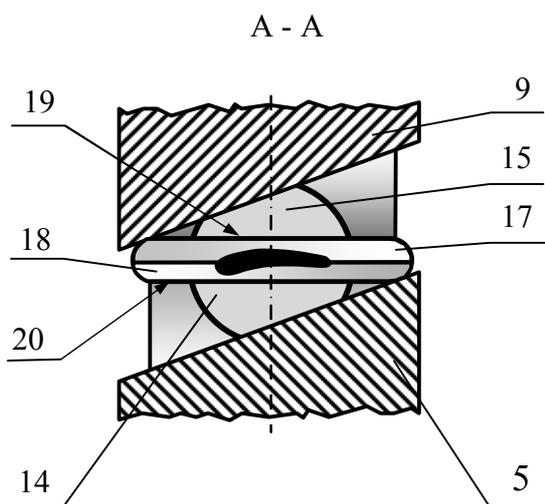


Рис. 11. Сечение А – А рис. 9

В открытую рабочую зону штампа помещают заготовку лопатки с раскрученным пером в нагретом, например, до ковочных температур состоянии (рис. 12). Включают кнопку "Пуск". При этом траверса пресса начинает перемещение вниз. Прижим 13 (см. рис. 9), встретившись с замком заготовки лопатки 16, жестко фиксирует его между гравюрами прижимов 12 и 13, а полуколеса 14 и 15 жестко фиксируют концевую зону пера заготовки 16 соответственно своими гравюрами. При этом сила фиксации замка и концевой зоны заготовки лопатки 16 увеличивается по мере перемещения траверсы пресса вниз и сжатия, за счет этого, пружин 20 и 21. При охвате концевой зоны заготовки 16 (см. рис. 11) гравюрами, выполненными на ложементы 17 и 18 полуколес 14 и 15 соответственно, образуется выступ, с которым начинают взаимодействовать копиры 5 и 9, жестко связанные с матрицей и пуансоном штампа. Отмеченный выступ начинает выполнять роль рычага, который приводит во вращение колесо, образованное сомкнутыми полуколесами 14 и 15. Осуществляется свободная закрутка пера заготовки лопатки 16 (рис. 13). Процесс закрутки пера заготовки заканчивается при совпадении рабочих поверхностей копиры 5 и 9 с прямолинейными гранями 19 и 20 выступа, образованного ложементы 17 и 18.

При этом, в зависимости от технологических целей, гравюры пуансона 8 и матрицы 4 смыкаясь (см. рис. 8, 9, 14), осуществляют калибровку закрученного профиля пера заготовки лопатки 16 без его деформации по толщине или первоначально деформируют закрученное перо по толщине, а затем осуществляют фиксацию закрученного профиля пера.

При горячей закрутке пера заготовки лопатки на гидравлическом прессе штамп позволяет на конечном этапе закрутки выполнить фиксацию закрученного профиля путем выдержки во времени его сомкнутого состояния, необходимо, например, для остывания заготовки лопатки до определенных температур.



Рис. 12. Установка нагретой заготовки лопатки в рабочую зону штампа

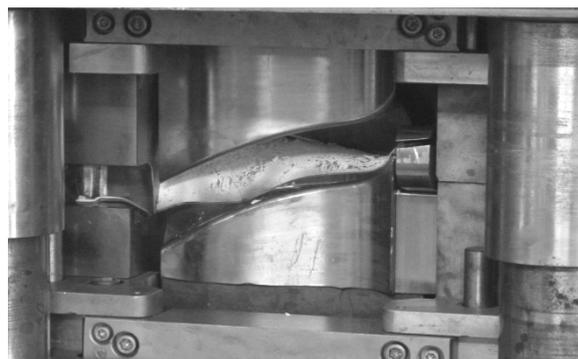


Рис. 13. Промежуточный этап закрутки пера заготовки лопатки в штампе



Рис. 14. Заключительный этап закрутки пера заготовки лопатки в штампе

Закончив операцию закрутки профиля пера заготовки лопатки, срабатывает или конечный выключатель или реле времени и траверса пресса начинает перемещение вверх, занимая

исходное положение. Из открытой рабочей зоны штампа извлекают закрученную заготовку лопатки (рис. 15). После ее удаления растянутые пружины штампа вращают полуколеса 14 и 15 (см. рис.10) в направлении, противоположном их вращению при закрутке пера заготовки лопатки. При этом штамп вновь готов для выполнения операции закрутки пера следующей заготовки лопатки авиационного газотурбинного двигателя.

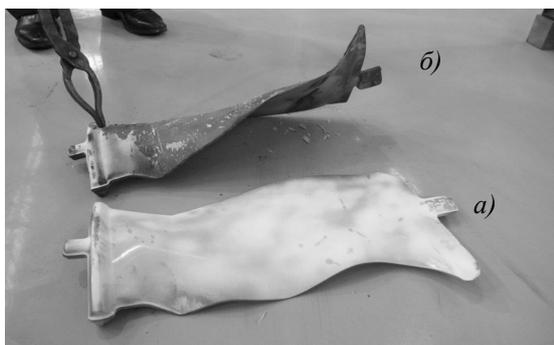


Рис. 15. Исходная заготовка лопатки с раскрученным профилем пера и волнистой выходной кромкой (а); заготовка лопатки с закрученным профилем пера (б)

Для уменьшения теплоотвода от закручиваемой заготовки лопатки в горячем состоянии в элементы штампа и окружающую среду, а так же управления скоростью охлаждения закрученной заготовки лопатки на заключительном этапе в сомкнутых пуансоне и матрице, последние могут быть оснащены электрически управляемыми нагревательными элементами. Для этих же целей штамп может быть помещен в теплоизоляционный кожух или нагревательную камеру.

Штамп позволяет выполнить непрерывную нормированную закрутку как расчетных сечений пера заготовки лопатки, так и зон между сечениями, совместить процесс закрутки профиля пера с его калибровкой или термофиксацией.

Разработанная технология получения заготовки крупногабаритных широкохордных лопаток может служить основой для совершенствования производства гаммы лопаток авиационных двигателей, позволяя снизить трудоемкость и себестоимость изготовления, а также повысить рентабельность их производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 2 257 277 РФ. Способ изготовления лопаток газотурбинного двигателя / А.С. Матвеев, Г.И. Зубарев,

В.В. Андреев. 2005. Бюл. № 21.

2. Пат. № 2 323 810 РФ. Способ изготовления лопаток газотурбинных двигателей / А.С. Матвеев, В.В. Андреев, Г.И. Зубарев. 2008. Бюл. № 13.

3. Матвеев А.С., Казаков Р.А., Шумкина Ю.С. Метод и устройство для получения ультрамелкозернистой структуры материала прутковых заготовок // Научно-технические технологии в машиностроении. 2014. № 11. С. 10–13.

4. Пат. 2 284 240 РФ. Устройство для закрутки детали / В.А. Федосов, А.С. Матвеев, В.В. Андреев. 2006. Бюл. № 27.

5. Пат. 2 358 825 РФ. Устройство для закрутки детали. / А.С. Матвеев, Д.В. Волков, В.В. Андреев, И.В. Ильин. 2009. Опубл. 20.06.2009.

6. Пат. 2 542 215 РФ. Устройство для закрутки детали / А.С. Матвеев, В.Б. Белов, В.В. Андреев, В.Б. Быстров. 2015. Бюл. № 5.

7. Матвеев А.С., Зубарев Г.И., Андреев В.В., Ильин И.В. Метод проектирования и технологический процесс изготовления широкохордных лопаток газотурбинных двигателей // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2006. № 9. С.10–14.

8. Пат. 2 557 7821 РФ. Устройство для закрутки пера лопатки газотурбинного двигателя / В.В. Андреев, А.С. Матвеев, В.Б. Быстров, Е.Г. Кузьмин, Т.Ю. Бажан. 2015. Бюл. № 21.

REFERENCES

1. Patent No. 2 257 277 of the Russian Federation. Method of manufacturing a gas-turbine engine blades. A.S. Matveev, G.I. Zubarev, V.V. Andreev. 2005. Bull. no. 21.

2. Patent No. 2 323 810 of the Russian Federation. Method of manufacturing blades of gas turbine engines. A.S. Matveev, V.V. Andreev, G I. Zubarev. 2008. Bull. no. 13.

3. Matveev A.S., Kazakov R.A., Shumkina Yu.S. Method and device for obtaining ultrafine-grained structure of material for barstock. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2014. No. 11. Pp. 10–13.

4. Patent No. 2 240 284 of the Russian Federation. Device for parts twisting. V.A. Fedosov, A.S. Matveev, V.V. Andreev. 2006. Bull. no. 27.

5. Patent No. 2 358 825 of the Russian Federation. Device for parts twisting. A.S. Matveev, D.V. Volkov, V.V. Andreev, I.V. Il'in. 2009. Publ. 20.06.2009.

6. Patent No. 2 542 215 of the Russian Federation. Device for parts twisting. A.S. Matveev, V.B. Belov, V.V. Andreev, V.B. Bystrov. 2015. Bull. no. 5.

7. Matveev A.S., Zubarev G.I., Andreev V.V., Il'in I.V. Method of design and technological process of production of wide-chord blades of gas-turbine engines. *Press-forging production. Metal forming*. 2006. No. 9. Pp. 10–14.

8. Patent No. 2 557 7821 of the Russian Federation. Device for twisting the pen of gas-turbine engine blade. V.V. Andreev, A.S. Matveev, V.B. Bystrov, E.G. Kuz'min, T.Yu. Bazhan. 2015. Bull. no. 21.

Рецензент д.т.н. В.А. Дёмин