

УДК 621.73.073

Титов¹ В.А. д.т.н., проф.; Мозговой² В. Ф., к.т.н., Басов² А. Ю.; Титов¹ А.В., к.т.н., доц.;
Гараненко¹ Т.Р.; Лысенко³ О.Н.

1 – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина; 2 – АТ «Мотор Сич», Запорожье, Украина, 3 – ООО «АСКОН-КР», Киев, Украина

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОЦЕССА ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ МОНОКОЛЕС

Titov¹ V., Mozgovoy² V., Basov² A., Garanenko¹ T., Lysenko³ O.1 – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine, 2 – Motor Sich JSC, Zaporozhye, Ukraine, 3 – ASCON-KR, LTd., Kiev, Ukraine (v.a.titov@list.ru)

FEATURES OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF ISOTHERMAL PRESSING BLISKS

Установлены особенности технической подготовки процесса изотермической штамповки моноколеса. Технологический процесс изготовления цельноштамповочных рабочих колес (моноколес) газотурбинного двигателя имеет высокую трудоемкость и низкий коэффициент использования металла. Наиболее перспективным технологическим процессом изготовления таких деталей является изотермическая штамповка, которая позволяет получить благоприятное формирование текстуры материала в теле диска и лопатки. Приведена оценка особенностей течения металла при формообразовании моноколеса с радиальным расположением лопаток при помощи программного комплекса Deform-3D. Установлены энергосиловые параметры и напряженно-деформированное состояние на разных этапах формообразования моноколеса. Разработан типовой штамп и установка для изотермической штамповки.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, моноколесо, изотермическая штамповка, лопатка, многоканальные штампы, текстура материала, энергосиловые параметры, метод конечных элементов.

Введение

Использование цельноштампованных рабочих колес в конструкциях обеспечивает существенное улучшение эксплуатационных показателей газотурбинных двигателей (ГТД), гарантирует повышение надежности и увеличение ресурса. Однако сложная форма колес, трудоемкость их изготовления и необходимость обеспечения высокой точности геометрических параметров и исполнительных размеров существенно ограничивают их применение.

Повышение требований к изделиям вызывают необходимость использования новых и улучшенных материалов, а также способов их обработки для получения высокопрочных деталей, которые работают при высоких нагрузках. При этом первоочередное значение приобретают методы обработки давлением, позволяющие улучшить механические свойства материалов деталей за счет получения мелкозернистой, а в ряде случаев специальной структуры металлов.

На сегодняшнем этапе изготовление моноколес выполняют, как правило, методами механической обработки из поковок на пятикоординатных станках для высокоскоростного фрезерования с числовым программным управлением (типа Liechti, Stragag и других фирм). Как показывает опыт высокотехнологических предприятий, таких как АО «Мотор Сич», ЗМКБ «Прогресс», «Салют» и др., технологический процесс изготовления таких деталей имеет высокую трудоемкость и низкий коэффициент использования металла [1]. Существенно повысить технико-экономические показатели процессов изготовления моноколес позволяет применение также методов точной штамповки.

Опыт внедрения технологического пластического формообразования моноколес связан с использованием мощного, в ряде случаев уникального, прессового оборудования. Например, Германия (1944 год) – гидравлический пресс усилием 30000 тс, США (1964 год) – горячештамповочный пресс усилием 8000 тс с гидравлическим прижимом и другие.

Другим направлением является использование высокоскоростного, высокоэнергетического оборудования, например США (1955-58 гг) – машина для высокоскоростного деформирования ДИНАПАК (фирма Glearing Division of Us Industry), СССР (Воронежское СКБ) – высокоскоростной молот М7352 с энергией удара 16000 кГм [2] и другие.

*В конструкторской подготовке процесса принимали непосредственное участие ведущие специалисты кафедры МПМРП НТУУ «КПИ им. И. Сикорского» Вишневский П.С. и Гаврилов И.В.

Обобщая опыт научных школ США, Германии, стран СНГ и работ, выполненных под руководством известных ученых Богоявленского К.Н., Атрощенко А.П., Мещерина В.Т., Воробьева В.М. и другими, можно констатировать, что основным недостатком статических методов штамповки является возможность получения заготовок моноколес с очень большими припусками на мощном прессовом оборудовании. Использование динамических методов требует очень больших капиталовложений, использования уникального специализированного оборудования, больших затрат на его эксплуатацию. Наряду с этим отсутствует теория которая отражала реальную картину деформирования в многоканальных штампах, а также данные по механическим, структурным и физическим свойствам металла штамповок [2].

Среди методов пластического формоизменения наиболее перспективным технологическим процессом является изотермическая штамповка лопаток, дисков и дисков с лопатками (моноколес). Общая тенденция в обработке металлов давлением наблюдается в разработке безприпусковой и малоприпусковой технологии. Это позволяет в 2,0 - 3,5 раза сократить расход металла, а также свести к минимуму механическую обработку резанием и объем слесарно-доводочных работ [3].

Максимальная эффективность процессов точной штамповки может быть достигнута при изготовлении деталей сложных форм с развитой поверхностью, содержащих тонкие полотна, ребра, лопатки сложного аэродинамического профиля вместе с диском. Процессы штамповки обеспечивают высокую степень однородности деформаций и получения равномерной структуры материала необходимой дисперсности. В результате достигаются увеличение уровня стабильности механических свойств и надежности изделий.

Как видно из приведенных данных, перспективным способом получения моноколес является изотермическая горячая объемная штамповка, применение которой позволяет получить благоприятное формирование текстуры материала в теле диска и лопатки. Это обеспечивает повышенное сопротивление нагрузкам, возникающим в ходе эксплуатации, обеспечивает увеличение ресурса детали, уменьшает расход материала, а также значительно уменьшает трудоемкость изготовления. При горячей штамповке моноколес можно получить деталь с рабочими поверхностями (перо лопатки), которые не требуют дальнейшей механической обработки или с минимальными припусками и напусками под последующую механическую обработку. Это позволяет сохранять полученные механические свойства материала, как результат течения его в полость ручья штампа [5 - 7], а применение штампованных моноколес в конструкциях ГТД обеспечит значительное повышение эксплуатационных и весовых характеристик изделий.

Целью настоящей работы являлось установление особенностей технической подготовки процесса изотермической штамповки моноколес на этапах обобщения типовых конструкторско-технологических схем, результатов анализа численного расчета процесса на примере моноколеса с радиальным расположением пера лопатки, проектирования установки и оснастки для формообразования с учетом условий нагружения.

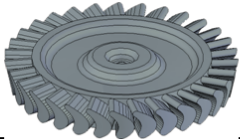
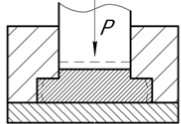
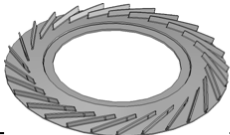
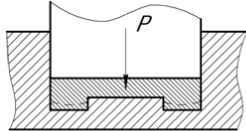
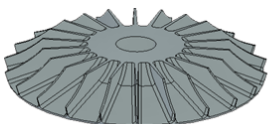
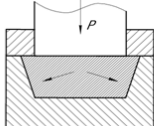
Исследование.

Конструкторско-технологическая классификация моноколес в зависимости от функционального назначения по конструктивному признаку моноколеса делятся на типы, которые отличаются взаимным расположением пера лопатки с диском [8].

В работе предложены основные классы моноколес, которые отличаются расположением элементов лопаток относительно конструктивной оси вращения детали: соосно, с радиальным расположением и под углом к оси (табл. 1). Каждый класс содержит подклассы, которые разделяют номенклатуру элементов лопаток моноколеса по форме поверхности (плоские, одинарной кривизны и двойной кривизны).

Таблица 1

Конструкторско-технологический классификатор типовых деталей

Конструктивный признак	Типовой представитель	Технологический признак	Схема процесса формообразования
С расположением пера перпендикулярно оси вращения		Радиальное прессование пера лопатки	
С расположением пера соосно оси вращения		Аксиальное прессование пера лопатки	
С расположением пера под углом к оси колеса (смешанный тип)		Прессование пера лопатки при комбинированном течении металла	

Принципиальным отличием рассматриваемых схем реализации процесса является различное направление течения металла при формообразовании тонкостенных элементов по отношению к направлению приложения деформирующего усилия. Это отличие определяет величину сопротивления деформированию заполнения тонкостенных элементов и требует изучения особенностей распределения напряжений и деформаций в переходной зоне тонкостенного элемента.

В настоящей работе приведена оценка особенностей течения металла при формообразовании моноколеса с радиальным расположением лопаток.

Численное моделирование процесса изотермической штамповки моноколеса с радиальным расположением лопаток

Для оценки влияния энергосиловых параметров и напряженно-деформированного состояния при формообразовании моноколеса из алюминиевого сплава АК4-1 в условиях изотермического штамповки было проведено математическое моделирование процесса с использованием программного комплекса DEFORM-3D, который позволяет отслеживать перемещения материальных частиц заготовки при заполнении рабочей полости штампа. Это дает возможность оптимизировать технологические параметры процесса, такие как скорость деформирования, необходимое усилие деформирования, температуру нагрева и также геометрию рабочей полости штампа.

Моноколесо с радиальным расположением пера лопатки имеет форму диска который состоит из 31 лопатки, ступицы и перехода пера лопатки в ступицу (рис. 1). Перо лопатки имеет сложную форму – крыло с закруткой вокруг своей оси. Эта деталь относится к ответственным в двигателе и поэтому для нее устанавливают размеры с высокой точностью и низкой шероховатостью. Это обусловлено требованиями и особенностями эксплуатации.

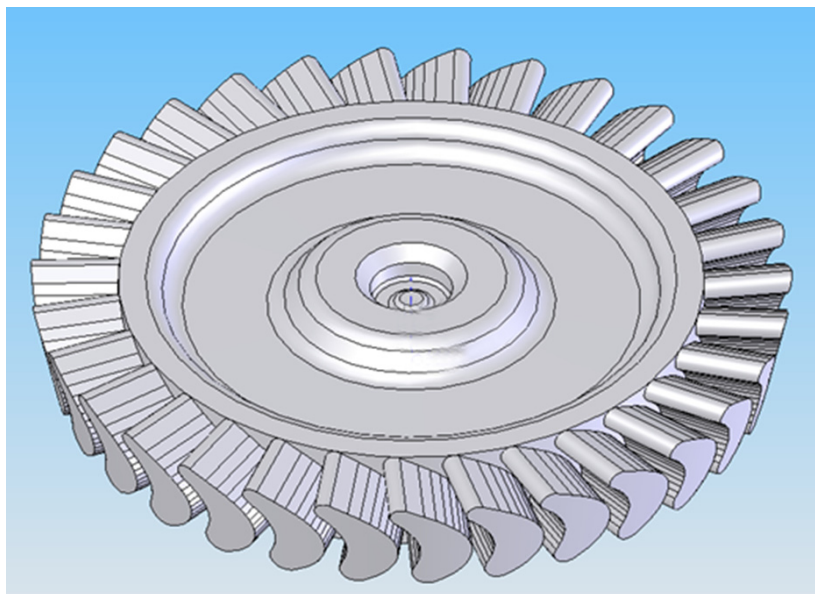


Рис. 1. Трехмерная модель моноколеса с радиальным расположением пера лопатки – «диск турбины»

На точность формы, размеров изделия влияют: точность изготовления штампового инструмента, формы и размеры заготовок, энергосиловые и термомеханические параметры деформации. Правильное проектирование и точное изготовление штампов является основой успешного использования изотермического прессования монолитных колес с готовыми функциональными поверхностями.

Для выявления оптимальных технологических параметров изотермического прессования точных заготовок монолитных колес было выполнено моделирование и расчет процесса методом конечных элементов в DEFORM-3D. Деформирующий инструмент считался абсолютно жестким. Трение учитывали на поверхности заготовки, которая контактирует с поверхностями матрицы, коэффициент трения принимали равным 0,3. Нагрузку прикладывали в виде шагового перемещения пуансона.

В процессе расчета определено напряженно-деформированное состояния (НДС) заготовки, которое отражает схему действующих сил, определяет характер формоизменения, предопределяет характер изменения физико-механических свойств металла при деформации.

Результаты расчета показали, что на величину технологического усилия при изотермической штамповке монолитного колеса - «диск турбины», будут влиять форма ручья, форма заготовки, ее

расположение в штамповом ручае, а также скорость деформирования, температурный интервал и вид смазки. Рассмотрим подробнее НДС на каждой характерной стадии (рис. 2).

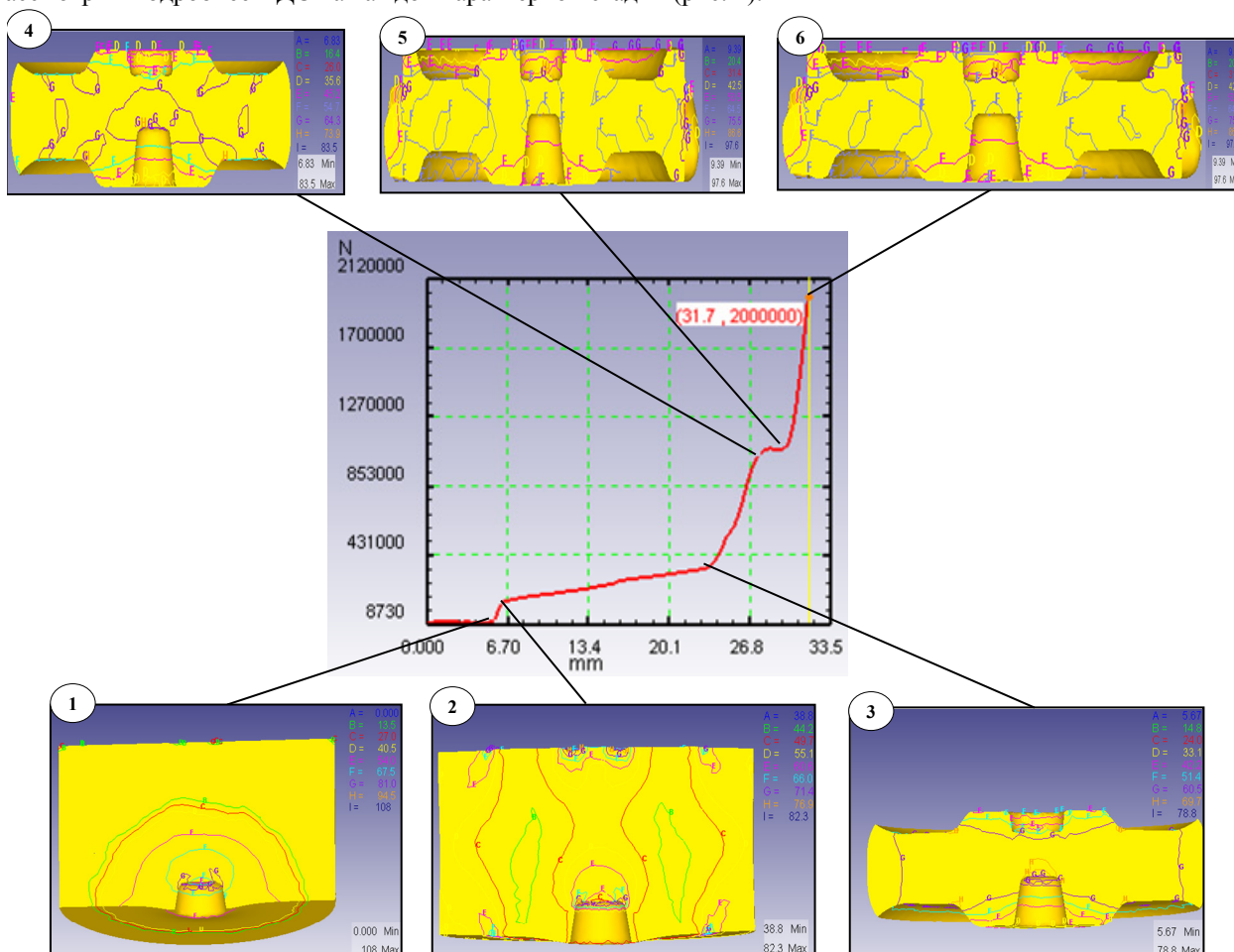


Рис. 2. Зависимость усилия от интенсивности напряжений на различных стадиях деформирования

Первый этап соответствует ходу пуансона 0 – 6 мм, на котором происходит проникновение выталкивателя в материал (рис. 2). Из графика зависимости технологического усилия P от хода пуансона, видно что усилие постоянное и равно $P = 2$ кН. На втором этапе (6,0 – 6,5 мм), происходит резкое увеличение усилия к $P = 143$ кН, что обусловлено увеличением площади контакта заготовки и матрицы, соответственно влияние сил трения. На участке (6,5 – 23,3 мм) видим постепенный рост усилия, которое связано с постепенным увеличением контакта заготовки и матрицы. А при усилии $P = 342$ кН, которое соответствует ходу пуансона 23,5мм начинается течение материала в полости формообразования пера лопаток. На ходе пуансона от 23,5 до 27,5мм происходит увеличение площади контакта действия сил трения, что вызывает резкое повышение усилия. На стадии от 27,5 до 29,7 усилия постоянное $P = 1090$ кН, наблюдается устойчивая стадия. На участке от 29,7 мм до конечного шага происходит резкий рост усилия $P = 2080$ кН (рис. 3), что объясняется калибрующим эффектом.

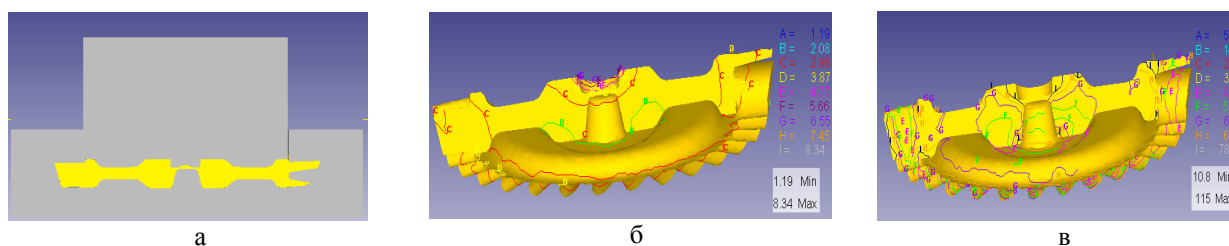


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений и деформаций после перемещения пуансона на конечном этапе: а - рабочая полость штампа; б - распределение интенсивности деформаций e_i , в - интенсивность напряжений σ_i

Результаты расчета показывают, что при проектировании процессов необходимо учитывать использование ресурса пластичности в опасных зонах штамповки, которые совпадают с местом перехода внешней части диска в тело лопатки (рис. 4). При этом уменьшение коэффициента использования ресурса пластичности целесообразно достигать управлением формой исходной заготовки.

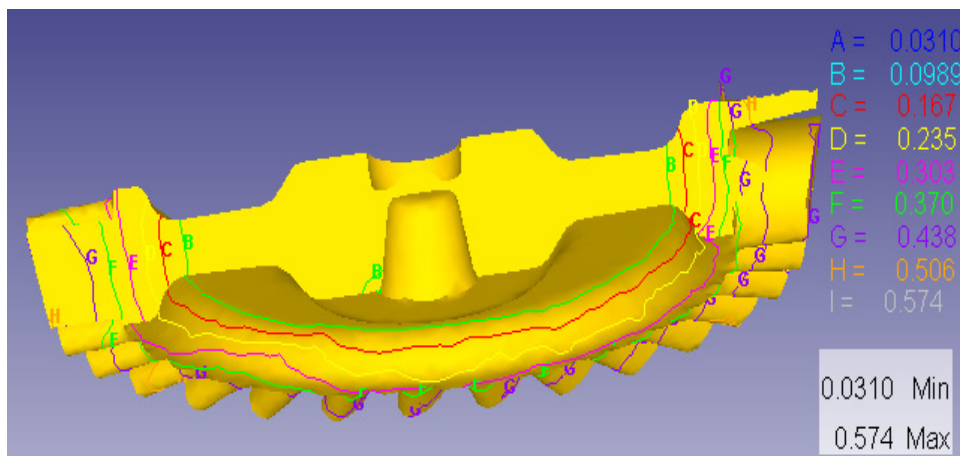


Рис. 4. Распределение коэффициента использования ресурса пластичности параметров на конечном этапе

Процесс изотермического прессования «диска турбины» можно разделить на два этапа: осадка и выдавливание профиля лопаток. Элементы сечения лопатки, которые находятся ниже оси бокового канала, заполняются лучше, чем те, что находятся выше, то есть увеличиваются энергозатраты. При формообразовании пера лопаток в зоне перехода от диска монолитного колеса к лопаткам интенсивность напряжений имеет максимальную величину, при этом максимальные средние напряжения являются сжимающими. При температуре 420°C и скорости деформирования 1 мм/с в зонах перехода от диска монолитного колеса к лопаткам интенсивность напряжений составляет 115 МПа , при этом средние напряжения по объему металла являются сжимающими и равны 528 МПа .

Разработка установки для изотермического прессования

В результате компьютерного моделирования формообразования монолитных колес ГТД в системе CAD/CAE DEFORM 3D выполнен расчет технологического усилия процесса, выполнен выбор формы и размеров заготовки, а также технологических параметров процесса, что позволило разработать конструкцию установки для изотермического прессования. Установка спроектирована под гидравлический пресс усилием 400 тс и предназначена для базирования и нагрева штампов для изотермического прессования точных заготовок моноколес ГТД.

Схема установки приведена на рис. 5. Нижний комплект плит отличается от верхнего наличием грибка 1 и выталкивателя 2, которые используются для удаления изготовленных деталей из штампа. Плиты 3 имеют Т-образные пазы, через которые болтами 4 и гайками 5 к установке крепится сменная оснастка (штампы). Между плитами 3 и 6 размещены нагревательные элементы – тэны 7. Через плиты 8 и промежуточные слои асбеста 9, 10 установка крепится к столу и к плите ползуна прессы болтами 11. Промежуточные слои асбеста 9, 10 и 12, 13 служат для термоизоляции и предотвращения потери тепла.

Разработка штампа для изотермического прессования моноколеса радиального

Штамп предназначен для изотермического прессования поковки радиального моноколеса турбины показан на рис. 6. Поковка детали имеет припуск $1,5\text{ мм}$ и напуски. Напуски позволяют выполнить технологические уклоны для лучшего удаления поковки из рабочей зоны штампа. В связи с тем, что изготавливаемая деталь имеет сложную геометрию, в конструкции штампа предусмотрено сборную матрицу, которая обеспечивает несколько плоскостей разреза. Технологические припуски и напуски удаляются при дальнейшей обработке на станках с ЧПУ.

Схема штампа изображена на рис. 6. Штамп крепится к установке болтами через плиту верхнюю 1 (в верхней части) и обойму 2 (в нижней части).

Детали штампа 3, 4, 5, 6, 1 принимают участие в формообразовании поковки. Заготовка в виде цилиндра или шайбы устанавливается между выступающими частями комплекта вставок 6.

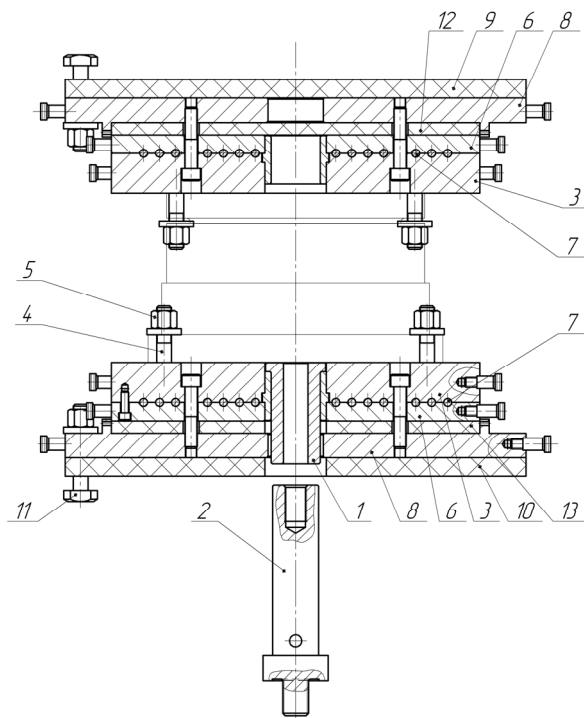


Рис. 5. Схема установки для изотермического прессования

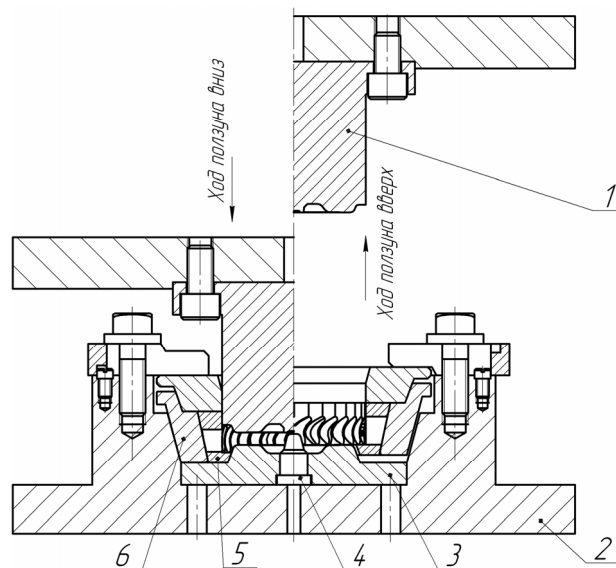


Рис. 6. Схема штампа для изотермического прессования моноколеса радиального

В штампе предусмотрено два комплекта съемных деталей, а именно: набор вставок 5, образует сборную матрицу, и обойма съемная 6, с помощью которой набор вставок устанавливается в рабочую зону штампа и удаляется после формирования поковки.

Представленный комплексный подход к технической подготовке процесса изотермической штамповки моноколеса – «диск турбины» может быть использован для разработки процессов изготовления других типов моноколеса согласно выполненной классификации на предложенной установке.

Выводы:

1. Установлены общие особенности процесса формообразования моноколеса с радиальным расположением пера лопатки относительно оси вращения.

2. Установлено, что наибольшая интенсивность деформаций и интенсивность напряжений в процессе формообразования наблюдается в зонах перехода деформированной заготовки от диска монолитного колеса к лопаткам. При формообразовании пера лопаток в зоне перехода от диска монолитного колеса к лопаткам интенсивность напряжений имеет максимальную величину, при этом средние напряжения являются сжимающими. При температуре 420 °С и скорости деформирования 1 мм/с в зонах перехода от диска монолитного колеса к лопаткам интенсивность напряжений составляет 115 МПа, при этом средние напряжения по объему металла являются сжимающими и равны 528 МПа.

3. Комплексный подход к проектированию штамповой оснастки позволил оптимизировать конструктивно-технологические параметры и спроектировать установку для формообразования колес для реализации процесса на универсальном оборудовании.

Анотація. Встановлені особливості технічної підготовки процесу ізотермічного штампування моноколеса. Технологічний процес виготовлення цілісноштамповочних робочих коліс (моноколіс) газотурбінного двигуна має високу трудомісткість і низький коефіцієнт використання металу. Найбільш перспективним технологічним процесом виготовлення таких деталей є ізотермічне штампування, яке дозволяє отримати сприятливе формування текстури матеріалу в тілі диска і лопатки. Наведено оцінку особливостей течії металу при формоутворенні моноколеса з радіальним розташуванням лопаток за допомогою програмного комплексу Defor-3D. Встановлено енергосилові параметри і напружено-деформований стан на різних етапах формоутворення моноколеса. Розроблено типовий штамп і установка для ізотермічного штампування.

Ключові слова: газотурбінний двигун, моноколесо, ізотермічне штампування, лопатка, багатоканальні штампи, текстура матеріалу, енергосилові параметри, метод кінцевих елементів.

Abstract.

Purpose. The establishment of technical features of the preparatory process for isothermal pressing blisks.

Design/methodology/approach. The technical process of manufacturing solid-forging vane wheel (blisks) of gas-turbine engine has a high labor content and low coefficient of metal use. The most promising process for manufacturing such parts is isothermal pressing, which provides a favorable formation of the texture of the material in the body of the disc and blades.

Findings. The estimation of the flow characteristics of the metal in forming blisks from a radial arrangement of the blades using the Deform-3D software complex. The installation and typical stamp for isothermal pressing was developed.

Originality/value. Energy and power parameters and stress-strain state installed at different stages of forming blisks.

Keywords: gas-turbine engine, blisks, isothermal pressing, blade, multichannel die, texture of the material, energy and power parameters, the finite element method.

Библиографический список использованной литературы

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть 1. / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко и др. – 3.: Мотор Сич, 2003. – 396 с.
2. Воробьев В. М. Развитие процессов точной штамповки при производстве двигателей и турбоагрегатов / В. М. Воробьев, А. В. Соколов // Двигатель. - 2010.-№ 5(71). – С. 51- 54.
3. Кутин А. А. Передовые технологии производства сложнопрофильных изделий авиадвигателестроения на примере изготовления моноколес газотурбинных двигателей // А. А. Кутин., М.В. Туркин / Межотраслевая информационная служба [Электронный ресурс]. – 2012. - №4. –С. 52 – 57. — Режим доступа до журн. : <http://www.vimi.ru>
4. Теорія та практика обробки металів тиском / Під ред. Богуслаєва В.О., Бобиря М.І., Тітова В.А., Качана О.Я. – Запоріжжя, вид., АТ «Мотор Січ», 2016, 522 с.
5. Данилов Ю.П. Новые технологии получения турбинных колес с лопатками / Ю. П. Данилов, И. И. Осипов, В. М. Воробьев // Авиационная промышленность. – 1974. - №12. – С. 18-19.
6. Осипов И.И. Высокоскоростная радиальная штамповка рабочих колес турбоагрегатов / И. И. Осипов, В. М. Воробьев // Авиационная промышленность. – 1976. - №2.
7. Основы теории и реализация технологических решений процессов выдавливания металлов в многоканальных штампах : / В. М. Воробьев. – Москва, 2012. - 289 с.
8. Зубов В.П. Анализ конструктивно-технологических особенностей монолитных колес газотурбинных двигателей / В.П. Зубов, Г.А. Пудовина // Приложение к журналу “Авиационная промышленность”. – 1990. - №2.

References

1. Boguslaev, V.A., Muravchenko, F.M., Zhemanjuk, P.D. and Kolesnikov, V.I. (2003) Tehnologicheskoe obespechenie jekspluacionnyh harakteristik detalej GTD. Lopatki kompressora i ventiljatora. Chast' 1. [Engineering support performance turbine engine parts. The blades of the compressor and fan. Part 1.], Motor Sich, Zaporozh'e, Ukraine.
2. Vorob'ev, V.A. and Sokolov, A.V. (2010) “Razvitie processov tochnoj shtampovki pri proizvodstve dvigatelej i turboagregatov”, *Dvigatel'*. no 5 (71), pp. 51- 54.
3. Kutin, A.A. and Turkin, M.V. (2012) “Peredovye tehnologii proizvodstva slozhnoprofil'nyh izdelij aviadvigatelestroenija na primere izgotovlenija monokoles gazoturbinyh dvigatelej”, *Mezhotraslevaja informacionnaja sluzhba* no 4, pp. 52 – 57.
4. Boguslaev, V.A., Bobir, M.I., Titov, V.A. and Kachan, O.Ja (ed.) (2016), *Teorija ta praktika obrobki metaliv tiskom*, Motor Sich, Zaporozh'e, Ukraine.
5. Danilov, Ju.P., Osipov, I.I. and Vorob'ev, V.M. (1974) “Novye tehnologii poluchenija turbinyh koles s lopatkami”, *Aviacionnaja promyshlennost'*, no 12, pp. 18-19.
6. Osipov, I.I., and Vorob'ev, V.M. (1976) “Vysokoskorostnaja radial'naja shtampovka rabochih koles turboagregatov”, *Aviacionnaja promyshlennost'*. no 2.
7. Vorob'ev, V.A. (2012) *Osnovy teorii i realizacija tehnologicheskikh reshenij processov vydavlivanija metallov v mnogokanal'nyh shtampah*, Moscow, Russia
8. Zubov, V.P. and Pudovina, G.A. (1990) “Analiz konstruktivno-tehnologicheskikh osobennostej monolitnyh koles gazoturbinyh dvigatelej” *Prilozhenie k zhurnalu “Aviacionnaja promyshlennost'”*, no 2.

Подана до редакції 14.11.2016