

УДК 621.73.043

Титов А. В.  
Басов А. Ю.  
Лавриненков А. Д.  
Вишневский П. С.  
Лысенко О. Н.  
Титов В. А.

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ ТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ТОНКОСТЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В различных областях промышленности (авиастроении, судостроении, в энергетике, газоперекачивающих агрегатах и других) широко используют лопаточные газовые машины: газотурбинные двигатели, гидравлические и газовые центробежные насосы, компрессоры и другие. В этих машинах передача энергии газу для сжатия (компрессоры) или отбор энергии от газа для получения полезной работы на валу (турбины) происходит в результате взаимодействия газа с лопатками специальной формы, которые размещены на отдельных дисках или выполнены совместно с дисками. Тело лопатки (перо) имеет точную аэродинамическую форму.

Лопатки представляют собой тонкостенные элементы, конструктивно выполненные совместно с массивными элементами. Типовым представителем сложных деталей с тонкостенными элементами являются моноколеса.

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.

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, Strarrag 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.

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].

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 [3–6], а применение штампованных моноколес в конструкциях ГТД обеспечит значительное повышение эксплуатационных и весовых характеристик изделий.

Максимальная эффективность процессов точной штамповки может быть достигнута при изготовлении деталей сложных форм с развитой поверхностью, содержащих тонкие полотно, 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.

Изотермическая штамповка лопаток, дисков и дисков с лопатками (моноколес) обеспечивает разработку 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 [7].

Целью настоящей работы являлось установление особенностей реализации процесса изотермической штамповки на примере моноколес на основании обобщения типовых конструкторско-технологических схем и результатов анализа численного расчета процесса.

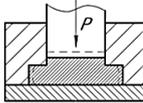
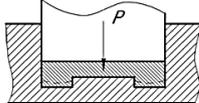
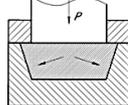
Конструкторско-технологическая классификация деталей с тонкостенными элементами на примере моноколес

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		Направление деформирующего усилия перпендикулярно течению металла	
С расположением пера соосно оси вращения		Направление деформирующего усилия соосно течению металла	
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 моноколес различного типа.

*Численное моделирование процесса изотермической штамповки деталей с радиальным расположением тонкостенных элементов*

Для оценки влияния энергосиловых параметров и напряженно-деформированного состояния при формообразовании моноколеса из алюминиевого сплава АК4-1 в условиях изотермической 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.

При расчете использованы данные для зарубежного аналога по химическому составу сплава АК4-1 – алюминиевого сплава 2618. В библиотеке материалов Deform-3D для сплава 2618 есть три кривых деформирования для температур 260 °С, 370 °С и 480 °С.

Диаграмму истинных напряжений  $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}, T)$  аппроксимировали степенной зависимостью (где  $\sigma_s$  – истинное напряжение,  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформаций,  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформаций,  $T$  – температура).

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 формообразования монолитных колес с готовыми функциональными поверхностями.

Для выявления оптимальных технологических параметров изотермической штамповки 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.

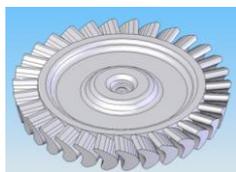


Рис. 1. Трехмерная модель моноколеса с радиальным расположением тонкостенных элементов

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

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 – аэродинамический профиль в поперечном сечении с закруткой вокруг своей оси.

Результаты расчета показали, что на величину технологического усилия при изотермической штамповке монолитного колеса будут влиять форма ручья, форма заготовки, ее расположение в штамповом ручье, а также скорость деформирования, температурный интервал и вид смазки. Рассмотрим подробнее НДС на каждой характерной стадии (рис. 2).

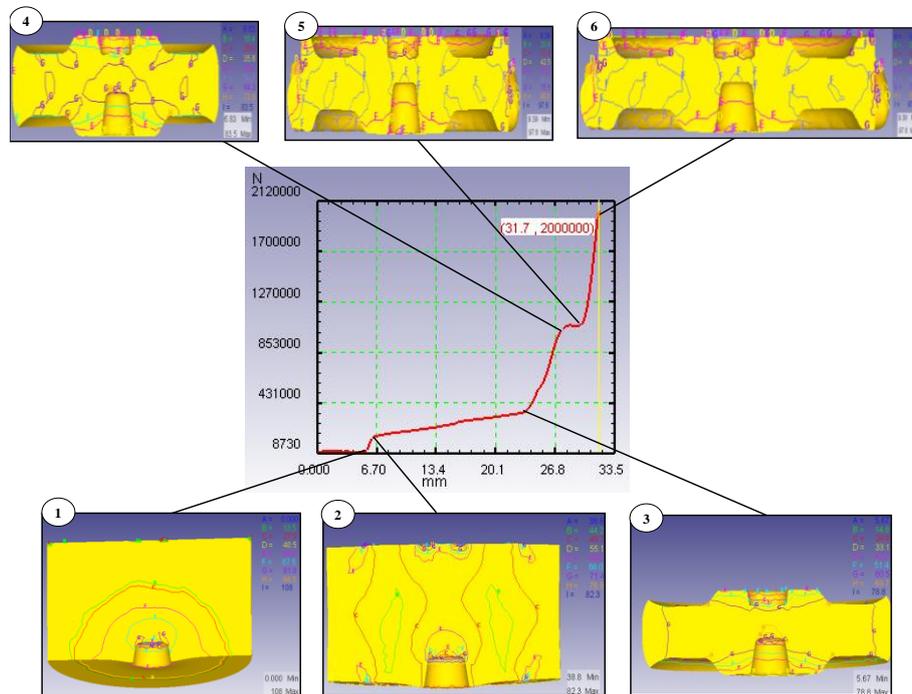


Рис. 2. Зависимость усилия от интенсивности напряжений на различных стадиях деформирования

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 23,5 мм, начинается течение материала в полости формообразования пера лопаток. На ходе пуансона от 23,5 до 27,5 мм происходит увеличение площади контакта действия сил трения, что вызывает резкое повышение усилия. На стадии от 27,5 до 29,7 усилие 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.

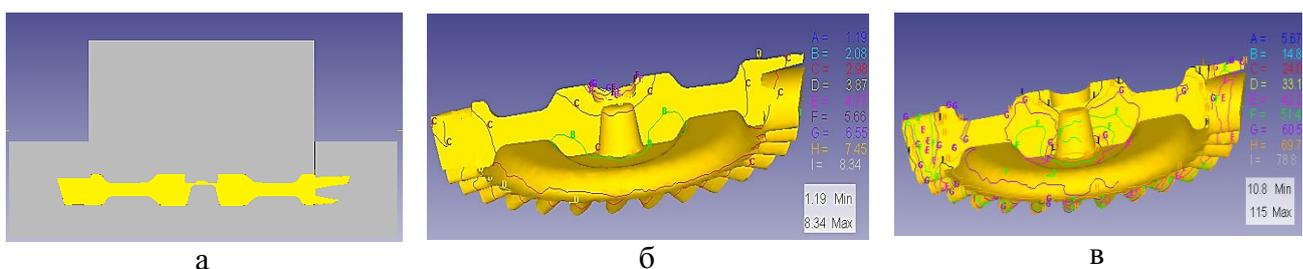


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений и деформаций после перемещения пуансона на конечном этапе:

а – рабочая полость штампа; б – распределение интенсивности деформаций  $e_i$ ; в – интенсивность напряжений  $\sigma_i$

Процесс изотермической штамповки 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 °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.

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.

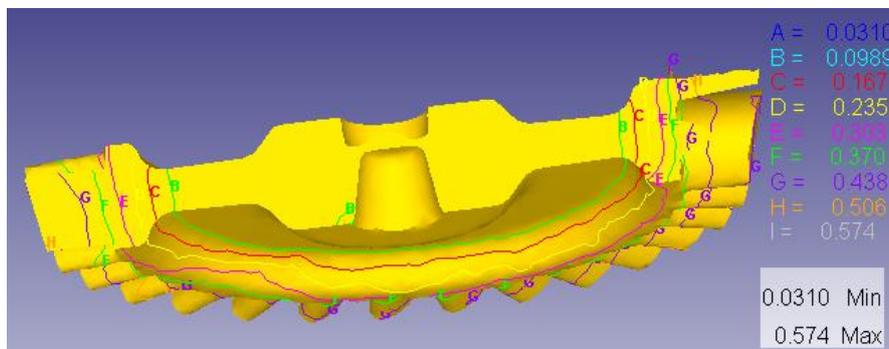


Рис. 4. Распределение коэффициента использования ресурса пластичности параметров на конечном этапе

*Численное моделирование процесса изотермической штамповки деталей с соосным расположением тонкостенных элементов*

Расчет выполнен для колеса второго типа, имеющего круглую, осесимметричную форму и состоящего из диска с лопатками, которые расположены соосно оси вращения. Относительная толщина диска моноколеса составляет  $S_{омн} = h / D = 0,009$ , где  $h$  – толщина диска моноколеса,  $D$  – диаметр диска. Одновременно с этим соотношение высоты пера лопатки  $h_n$  к толщине диска составила  $k = 3,5$ . Материал детали – алюминиевый сплав АК 4-1. Модель моноколеса показана на рис. 5. Схема процесса штамповки показана на рис. 6.

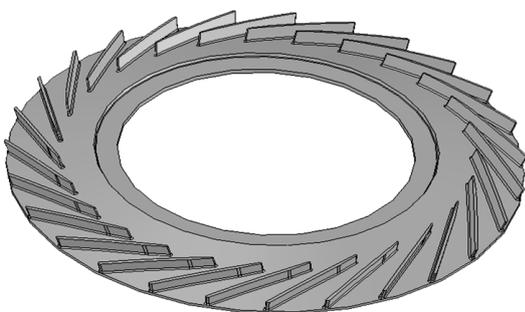


Рис. 5. Модель моноколеса с соосным расположением тонкостенных элементов

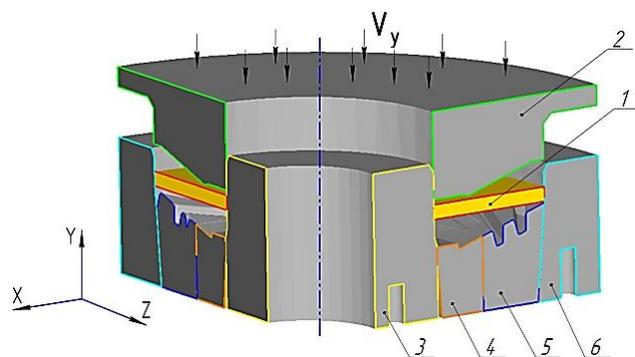


Рис. 6. Схема процесса:  
1 – заготовка; 2 – пуансон; 3 – центральная вставка; 4, 5 – формовочные матрицы; 6 – внешняя вставка

Заготовка 1 укладывается в штамповое пространство, которое состоит из центральной вставки 3, формовочных матриц 4 и 5, и внешней вставки 6. Штамповка детали происходит при ходе пуансона 2 вниз с постоянной скоростью  $V_y$ . По данным, приведенным в [9], при моделировании процесса температура детали и инструмента соответствовала 450 °С. Принимая во внимание относительную толщину диска  $S_{отн}$ , выполнена оценка технологического усилия процесса в зависимости от геометрии заготовки и скорости деформирования.

Исходя из этого, моделирование процесса проводилось с разными скоростями деформирования и формой заготовки. Параметры технологического процесса для математического моделирования представлены в табл. 2. Влияние геометрии заготовки на технологическое усилие штамповки проводилось при одинаковой скорости перемещения пуансона (рис. 7). Размеры заготовки на рис. 5 соответствуют размерам, указанным в табл. 2.

Таблица 2

Параметры технологического процесса

№	Параметры технологического процесса	Показатель			
1	Материал заготовки	АК4-1			
2	Температура заготовки, °С	450			
3	Температура оснастки, °С	450			
4	Размеры заготовки, мм	а	б	в	г
	$d$	184	236	226	236
	$D$	344	344	315	326
	$H$	9,3	12,4	15,9	15,2
5	Материал заготовки	АК4-1			
6	Материал инструмента	абсолютно жесткий			
7	Смазка	жидкая			
8	Коэффициент трения	0,3			
9	Скорость пуансона, мм/с	0,001–10			

Как видно из рис. 7, резкий рост усилия связан с полным заполнением рабочей полости штамповочных матриц. Это усилие зависит от геометрии заготовки. Максимальные усилия штамповки соответствуют геометрии заготовки на рис. 7, а, б. При геометрии заготовки показанной на рис. 7, а, заполнение полостей формовочной матрицы 4 (рис. 6) происходит быстрее, чем заполнение полостей штамповочной матрицы 5. Схема напряженного состояния в данной области – всестороннее сжатие. Компоненты тензора напряжения более интенсивно увеличиваются, чем в других областях заготовки, что обуславливает резкий рост усилия.

При форме заготовки, показанной на рис. 7, б, заполнение полостей формовочной матрицы 5 соответствующим перьям лопатки происходит быстрее, чем заполнение формовочной матрицы 4. В случае геометрии заготовки, показанной на рис. 7, а и б, интенсивный рост усилия связан с затрудненным перераспределением металла из областей штамповочных матриц, где заполнение уже произошло в незаполненные области.

Минимальные технологические усилия штамповки обеспечиваются при форме заготовки, которые представлены на рис 7, г. При данных размерах заготовки заполнение полостей обеих формовочных матриц происходит более равномерно, чем в случаях с заготовками на рис. 4, а и б. Уменьшение необходимого усилия штамповки происходит также и за счет изменения геометрии формовочной матрицы 4.

Уменьшение необходимого технологического усилия штамповки обеспечивается за счет точного подбора геометрии формы заготовки, а именно внутреннего и наружного радиусов, и упрощения элементов формовочных матриц, где возможны зоны повышенного сопротивления деформированию. Форма заготовки должна быть такой, при которой в момент завершения хода пуансона заполнение полостей штамповочных матриц происходило практически одновременно, без возникновения зон затрудненных деформаций.

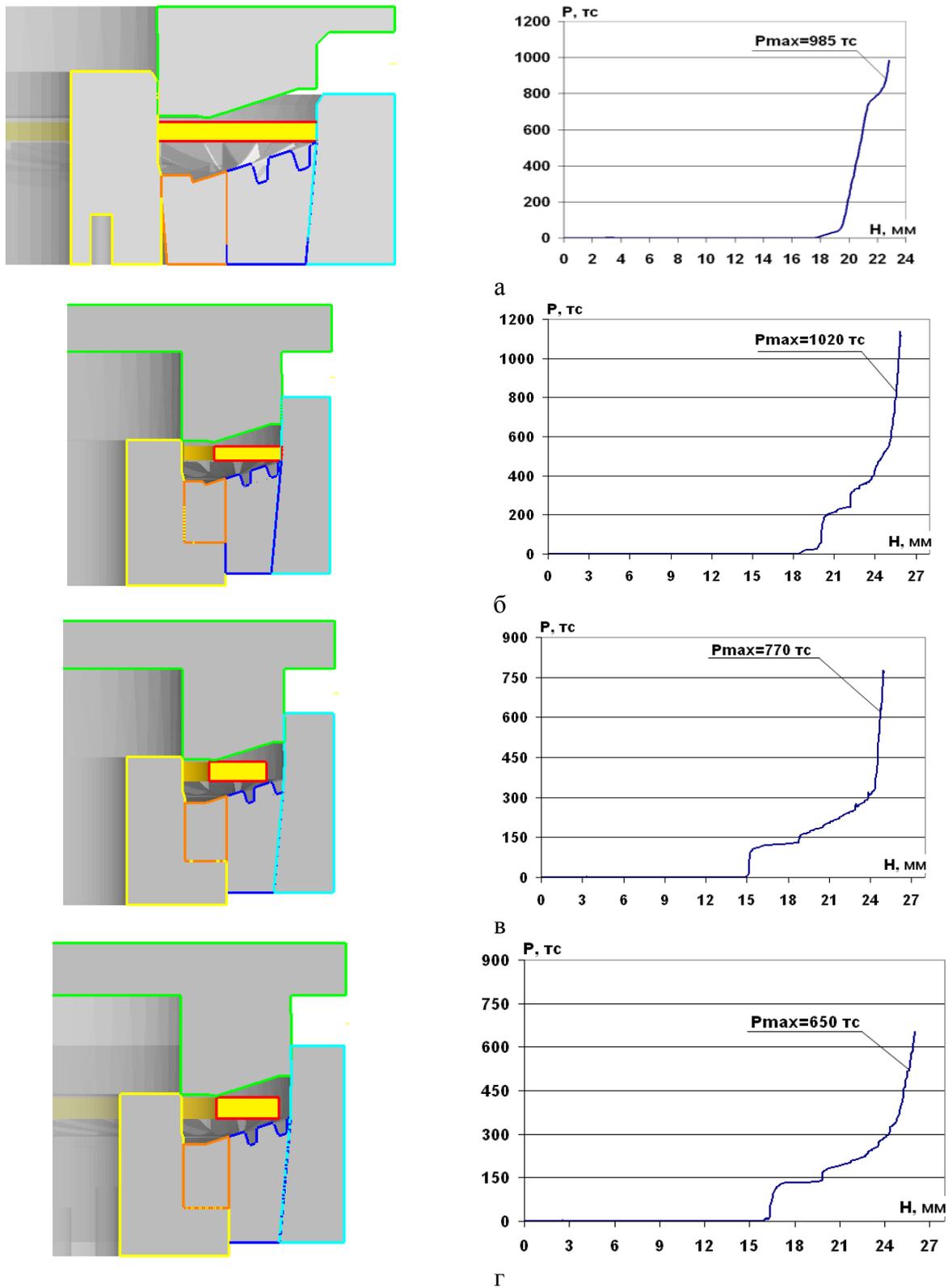


Рис. 7. Зависимость технологического усилия  $P$  от геометрии заготовки

На рис. 8, а, показано распределение интенсивности деформации  $\varepsilon_i$  сформированной заготовки. Наибольшая интенсивность деформаций  $\varepsilon_i$  соответствует областям радиусного перехода от диска моноколеса к перу лопатки. Этим же зонам соответствует максимальная интенсивность напряжений  $\sigma_s$  (рис. 8, б). Максимальная величина интенсивности напряжений в местах радиусного перехода составляет 42–48 МПа.

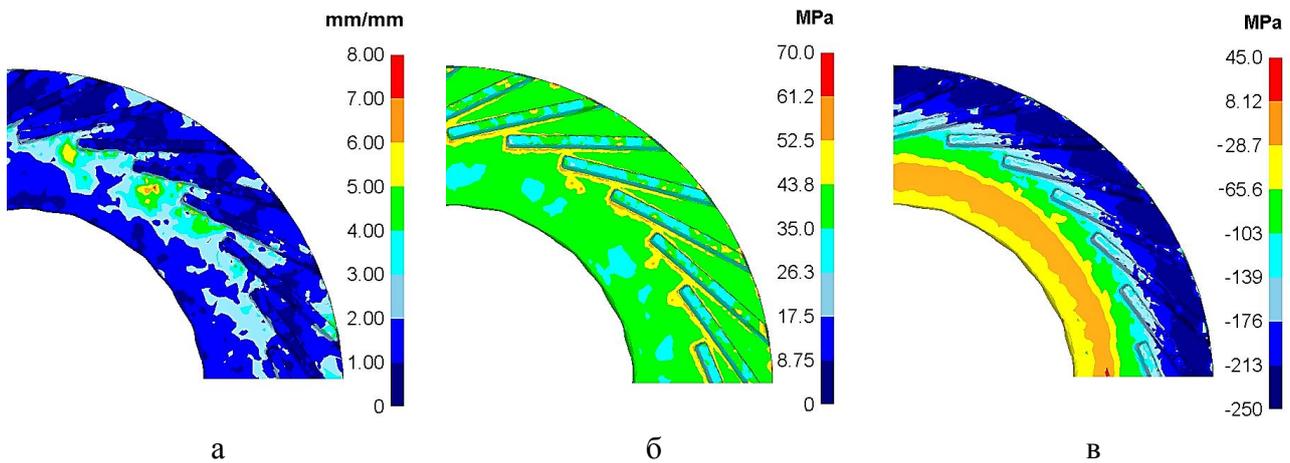


Рис. 8. Распределение интенсивности деформации  $\varepsilon_i$  (а), интенсивности напряжений  $\sigma_s$  (б) и осевых напряжений  $\sigma_Y$  (в) деформированной заготовки

Осевые напряжения  $\sigma_Y$  по объему металла детали являются сжимающими (рис. 8, в) с максимальным значением  $-247$  МПа в местах полного заполнения металлом полостей штамповочной матрицы 5, соответствующим перьям лопаток. Несколько ниже сжимающие напряжения в местах заполнения металлом полостей штамповочной матрицы 4, так как полное заполнение матрицы 4 происходит позже, чем заполнение полостей матрицы 5. На рис. 9, а и б, показано распределение интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  и интенсивности напряжений  $\sigma_s$  на конечном этапе штамповки в теле пера лопатки. Наибольшие значения интенсивности деформаций и напряжений соответствуют зонам радиусного перехода от диска моноколеса к перу лопатки. После прохождения металлом радиусного перехода происходит формовка пера лопатки, где значения  $\varepsilon_i$  и  $\sigma_s$  практически одинаковые по объему пера лопатки.

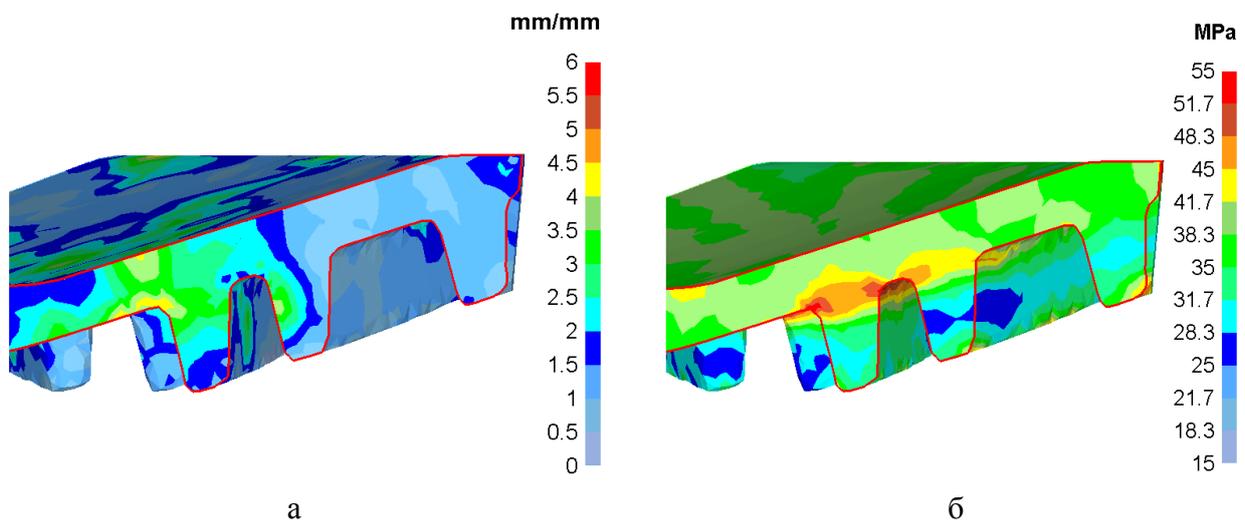


Рис. 9. Распределение интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  и интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в характерном сечении – области пера лопатки

При штамповке данной заготовки происходит интенсивное перераспределение и течение всего металла заготовки. На рис. 10 показано направление течения материала в плане (а) и в характерном сечении детали – теле лопатки (б).

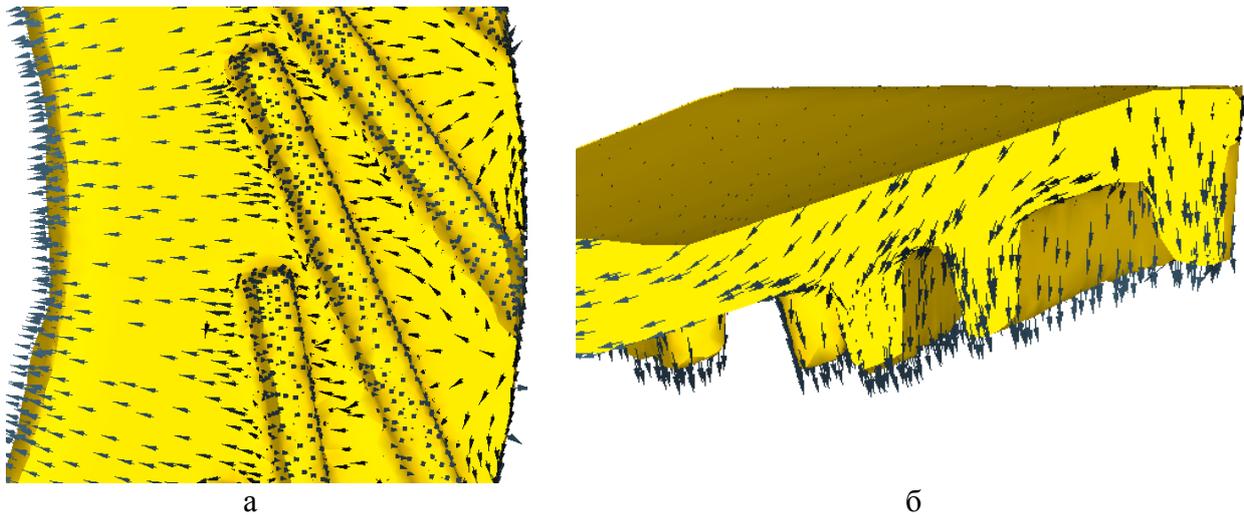


Рис. 10. Векторы перемещения металла при заполнении штамповочных матриц

Влияние скорости деформирования на технологическое усилие процесса было проведено при самой неблагоприятной форме и расположении заготовки, соответствующей рис. 4, а. Для этого была задана различная скорость перемещения пуансона, которая варьировалась от 0,001 до 10 мм/с. По результатам моделирования получен график зависимости технологического усилия от логарифма скорости перемещение пуансона (рис. 11).

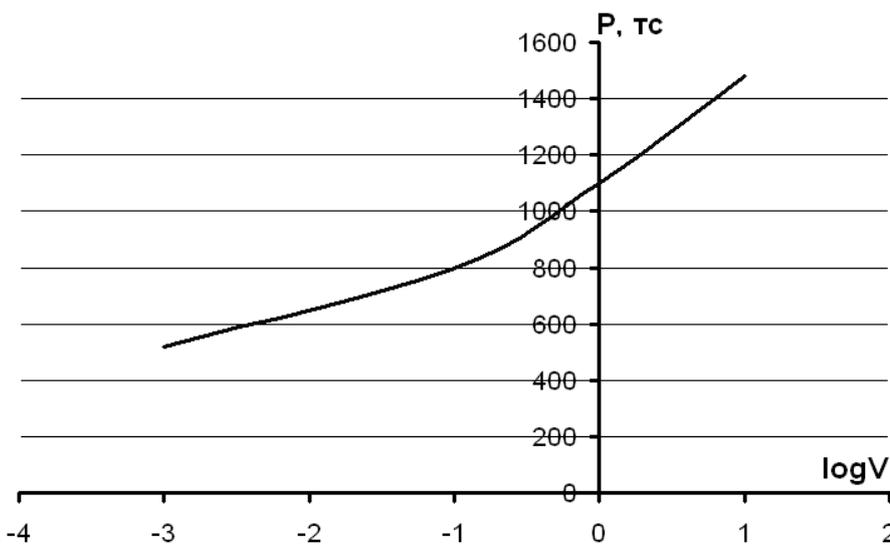


Рис. 11. Зависимость технологического усилия от скорости деформирования  $V$ , мм/с

Как видно из графика, скорость деформирования оказывает существенное влияние на технологическое усилие, это связано с тем, что данная деталь имеет множество очагов деформации – радиусных переходов от диска моноколеса к перьям лопаток.

Анализ процесса формообразования типовых конструкций с тонкостенными элементами позволил выбрать перспективные процессы, провести обобщение условий деформирования, установить основные технологические параметры управления условиями деформирования металла, и перспективные модели деформирования металл в конкретных процессах. Результаты анализа приведены на рис. 12.

В результате анализа показано, что перспективными процессами формообразования являются изотермическая штамповка, формообразование в условиях малых скоростей деформаций, а именно кратковременной ползучести или сверхпластичности, а также формообразование в твердо-жидком состоянии.



Рис. 12. Анализ перспективных процессов формообразования тонкостенных элементов конструкций

## ВЫВОДЫ

Рассмотрены особенности изотермической штамповки деталей с тонкостенными элементами на примере моноколес, широко используемых в различных отраслях промышленности для турбогенераторов, компрессорных машин и др. На основании конструкторско-технологической классификации для типовых представителей моноколес определены особенности процесса формообразования по технологическому признаку направления течения металла.

Для типовых представителей моноколес с радиальным и соосным расположением лопаток с использованием CAD/CAE Deform-3D определены силовые параметры процесса формообразования и напряженно-деформированное состояние в очаге деформации численными методами в вязкопластической постановке для материала АК 4-1. 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. Такая тенденция сохраняется и для моноколес с осевым расположением лопаток.

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

Установлено, что с уменьшением скорости деформирования можно значительно снизить технологическое усилие процесса, а заполнение тонкостенных элементов происходит более устойчиво. Показано, что перспективными процессами формообразования являются в условиях изотермической штамповки формообразование при малых скоростях деформаций, а именно кратковременной ползучести или сверхпластичности, а также формообразования в твердо-жидком состоянии.

## 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. Теорія та практика обробки металів тиском / Під ред. Богуслаєва В. О., Бобиря М. І., Тітова В. А., Качана О. Я. – Запоріжжя : АТ «Мотор Січ», 2016. – 522 с.
4. 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.
5. Осипов И. И. Высокоскоростная радиальная штамповка рабочих колес турбоагрегатов / И. И. Осипов, В. М. Воробьев // Авиационная промышленность. – 1976. – № 2.
6. Воробьев В. М. Основы теории и реализация технологических решений процессов выдавливания металлов в многоканальных штампах / В. М. Воробьев. – Москва, 2012. – 289 с.
7. 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: <http://www.vimi.ru>.
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.
9. Атрошенко А. П. Горячая штамповка труднодеформируемых материалов / А. П. Атрошенко, В. И. Федоров. – Ленинград : Машиностроение, 1979. – 287 с.

## REFERENCES

1. Tehnologicheskoe obespechenie jekspluatacionnyh harakteristik detalej GTD. Lopatki kompressora i ventiljatora. Chast' 1 / V. A. Boguslaev, F. M. Muravchenko i dr. – Z. : Motor Sich, 2003. – 396 s.
2. Vorob'ev V. M. Razvitie processov tochnoj shtampovki pri proizvodstve dvigatelej i turboagregatov / V. M. Vorob'ev, A. V. Sokolov // Dvigatel'. – 2010. – № 5(71). – С. 51–54.
3. Teorija ta praktika obrobki metaliv tiskom / Pid red. Boguslaeva V. O., Bobirja M. I., Titova V. A., Kachana O. Ja. – Zaporizhzhja : AT «Motor Sich», 2016. – 522 s.
4. Danilov Ju. P. Novye tehnologii poluchenija turbinnih koles s lopatkami / Ju. P. Danilov, I. I. Osipov, V. M. Vorob'ev // Aviacionnaja promyshlennost'. – 1974. – № 12. – S. 18–19.
5. Osipov I. I. Vysokoskorostnaja radial'naja shtampovka rabochih koles turboagregatov / I. I. Osipov, V. M. Vorob'ev // Aviacionnaja promyshlennost'. – 1976. – № 2.
6. Vorob'ev V. M. Osnovy teorii i realizacija tehnologicheskij reshenij processov vydavlivaniya metallov v mnogokanal'nyh shtampah / V. M. Vorob'ev. – Moskva, 2012. – 289 s.
7. Kutin A. A. Peredovye tehnologii proizvodstva slozhnoprofil'nyh izdelij aviadvigatelestroenija na primere izgotovlenija monokoles gazoturbinnih dvigatelej // A. A. Kutin, M. V. Turkin / Mezhotras-levaja informacionnaja sluzhba [Elektronnyj resurs]. – 2012. – № 4. – С. 52–57. — Rezhim dostupa: <http://www.vimi.ru>.
8. Zubov V. P. Analiz konstruktivno-tehnologicheskij osobennostej monolitnyh koles gazoturbinnih dvigatelej / V. P. Zubov, G. A. Pudovina // Prilozhenie k zhurnalju «Aviacionnaja promyshlennost'». – 1990. – № 2.
9. Atroschenko A. P. Gorjachaja shtampovka trudnodeformiruemyh materialov / A. P. Atroschenko, V. I. Fedorov. – Leningrad : Mashinostroenie, 1979. – 287 s.

Титов А. В.	– канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»;
Басов А. Ю.	– нач. отдела АО «Мотор Сич» г. Запорожье;
Лавриненков А. Д.	– канд. техн. наук, ассист. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского»;
Вишневецкий П. С.	– ст. преп. КПИ им. И. Сикорского;
Лысенко О. Н.	– ген. дир. ООО «Аскон-КР», г. Киев;
Титов В. А.	– д-р техн. наук, проф., зав. каф. НТУУ «КПИ им. И. Сикорского».

НТУУ «КПИ» им. И. Сикорского – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев.

E-mail: [avt.kpi@gmail.com](mailto:avt.kpi@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 02.03.2018 г.