
**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 621.7.043

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ РАСКАТКИ
В СВЕРХПЛАСТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

© 2020 г. Р. Ю. Сухоруков

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия**e-mail: ryusukhorukov@gmail.com*

Поступила в редакцию 17.04.2019 г.

Принята к публикации 25.12.2019 г.

Перспективной технологией изготовления осесимметричных деталей газотурбинных двигателей (дисков и полых валов) из жаропрочных сплавов является формообразование методом раскатки в условиях сверхпластичности на специализированных раскатных станах. Для определения энергосиловых и термомеханических параметров технологического процесса эффективным методом является математическое моделирование. В настоящей статье приведена методика построения конечноэлементной модели процесса раскатки деталей в условиях сверхпластичности, а также результаты моделирования на примере изготовления диска и полого вала из жаропрочных сплавов. Предлагаемая методика может быть использована при разработке технологии и проектировании оборудования для раскатки осесимметричных деталей (дисков, полых валов) из жаропрочных сплавов в условиях сверхпластичности.

Ключевые слова: сверхпластичность, жаропрочные сплавы, раскатка, конечно-элементное моделирование, полый вал, диск

DOI: 10.31857/S0235711920020133

Ресурс газотурбинных двигателей (ГТД) в значительной степени обеспечивается высокими эксплуатационными характеристиками ответственных деталей (дисков, полых валов), входящих в их конструкции. Поэтому создание высокотехнологичного производства дисков и валов из жаропрочных сплавов на основе титана и никеля — важнейшая задача авиационного двигателестроения [1].

Отечественные технологии (горячая штамповка литых сплавов, газостатическое прессование порошковых сплавов) включают многочисленные операции “нагрева—штамповки—мехобработки”, и не позволяют получить однородную структуру и высокие прочностные характеристики, исключить пористость, а также имеют низкий КИМ (коэффициент использования металла).

Технологические процессы формообразования деталей ГТД из жаропрочных сплавов методом раскатки в режиме сверхпластичности устраняют указанные недостатки и имеют ряд преимуществ [1, 2]. Режим сверхпластичности (СП) заключается в том, что в заготовках из жаропрочных сплавов при температуре $T < T_{\text{пл}}$ (предварительно подвергнутых деформации и термообработке для создания ультрамелкозернистой структуры с размером зерна $d < 10$ мкм в узком интервале температур 1050–1150°C для никелевых сплавов и 950–1000°C — для титановых сплавов) за счет небольших величин сил деформации и скоростей деформации в пределах 10^{-4} – 10^{-1} с⁻¹ можно полу-

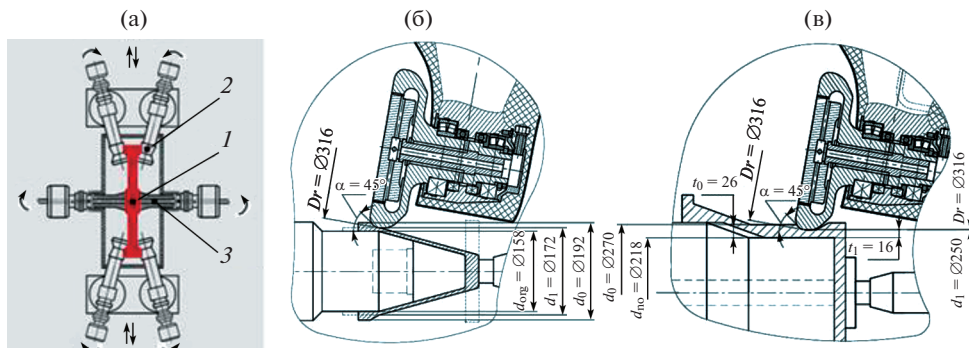


Рис. 1. Принципиальная схема процесса раскатки в условиях сверхпластичности заготовок: (а) — диска; (б) — цилиндрической и конической частей полого вала из листовой заготовки; (в) — цилиндрической части полого вала из штампованной заготовки.

чить детали с заданными геометрическими размерами и с однородной (регламентированной) структурой [1, 2]. Температура и интервалы скорости деформации определяются с учетом свойств каждого жаропрочного сплава.

Раскатка диска, полого вала в условиях сверхпластичности позволяет варьировать термомеханическими параметрами в локализованном очаге деформации и таким образом обеспечивать заданное структурообразование в сплаве во всем объеме детали, и большая роль в этом отводится ротационной (поворотной) моде деформации [2].

Особенность сверхпластической деформации (СПД) заключается в том, что она не приводит к изменению мелкозернистой структуры деформируемой матрицы, поскольку при этом действует механизм зернограницного проскальзывания. Структура деформированных в условиях СПД сплавов не зависит от степени деформации, а зависит от скорости и температуры деформации. Если температура и скорость деформации находятся в режиме СПД, то структура сохраняется стабильно по размерам и формам зерен и с низкой плотностью дислокаций [2–4].

В статье рассмотрены схемы (рис. 1) процесса раскатки дисков и полых валов, преимущества и особенности формообразования этих деталей из жаропрочных сплавов в сверхпластических условиях.

Принципиальная схема процесса раскатки диска представлена на рис. 1а.

Нагретая до температуры деформации заготовка 1 приводится во вращение пинами 3. Под воздействием пары вращающихся роликов 2, имеющих возможность перемещаться в осевом и радиальном направлении, а также менять угол наклона по отношению к плоскости раскатки, заготовка диаметром около 400 мм и толщиной 65 мм деформируется с уменьшением толщины и увеличением диаметра до 800 мм.

Деформация в заготовке происходит в режиме сверхпластичности, что позволяет формировать регламентированно изменяющуюся по радиусу диска структуру, которая обеспечивает более высокий уровень свойств, чем однородная по радиусу структура. Условия эксплуатации диска таковы, что его обод нагревается до температуры на 250–300°C более высокой по сравнению со ступицей. В то же время в ступице создаются более высокие напряжения, поэтому в ободе диска важна крупнозернистая структура, придающая материалу жаропрочность, а в ступице — мелкозернистая структура, обеспечивающая более высокую прочность. В средней части диска — в полотно, наиболее благоприятной является смешанная структура, т.е. “ожерелье”. Она отличается сочетанием вытянутых в радиальном направлении крупных зерен, разделенных между собой тонкими прослойками мелких зерен [1, 2].

Получение подобной регламентированно изменяющейся структуры в диске – сложная задача, поскольку необходимо получить в диске не только разные типы структур, но и обеспечить монотонный переход между ними.

Процесс формообразования деталей (валов) методом раскатки в режиме сверхпластичности также позволяет улучшить микроструктуру сплава и повысить его механические свойства, но имеет технологические особенности. Поэтому при формообразовании конических и цилиндрических частей полых валов внутренняя геометрия детали соответствует геометрии используемой оправки, на которую ролики раскатывают заготовку (рис. 1б, в). Форма и размеры придаются детали (валу) роликом-инструментом с высокой точностью. При формообразовании вала важно выбрать оптимальную форму заготовки и инструмента, а также обеспечить необходимое усилие деформации [4, 5].

Таким образом, при формообразовании дисков, полых валов методом раскатки в изотермических (в том числе сверхпластических) условиях на специализированных раскатных станах, необходимо обеспечить требуемые для реализации технологического процесса термомеханические и энергосиловые параметры. Для определения этих параметров эффективным методом является математическое моделирование.

Постановка задачи. Изотермическая раскатка дисков и полых валов является медленно протекающим процессом (скорость внедрения ролика в тело заготовки от 0.1 до 3 мм/мин, скорость вращения шпинделей, фиксирующих заготовку от 0.05 до 4 об/мин), поэтому массовыми и инерционными силами, действующими на заготовку, можно пренебречь. Для определения напряженно-деформированного состояния и характера течения металла в процессе раскатки целесообразно использовать математическое конечно-элементное моделирование на основе системы уравнений, реализованной в программном комплексе для конечноэлементного анализа процессов пластического деформирования DEFORM-3D [3, 6, 7]:

– дифференциальное уравнение равновесия, связывающее компоненты тензора напряжений, определяющего напряженное состояние тела

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; x_i – координата, в направлении которой переместилась площадка действия данной компоненты тензора напряжений;

– кинематическое уравнение, связывающее компоненты тензора скоростей деформаций и скоростей материальных точек тела

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}$ – компоненты тензора скоростей деформаций, v_i, v_j – проекция скорости движения материальной точки на соответствующую координатную ось;

– уравнение пластического течения Леви–Мизеса, связывающие напряженное и деформированное состояние тела

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij}, \quad (3)$$

где $\dot{\bar{\epsilon}}$ – интенсивность скоростей деформации, $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжений, σ'_{ij} – девиатор напряжений;

– выполнение условия несжимаемости ($\dot{\epsilon}_v = 0$) и пластичности Мизеса ($\bar{\sigma} = \sigma_s$), где $\dot{\epsilon}_v$ – скорость объемной деформации; σ_s – напряжение течения, определяемое по реологической модели материала.

Решение системы уравнений при использовании метода конечных элементов осуществляется с помощью функционала Маркова, представляющего собой разность мощности пластической деформации и мощности внешних сил, приложенных к объекту, принимающего минимальное значение на истинном поле скоростей

$$\Phi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV - \int_F v_i p_i dF, \quad (4)$$

где V — объем материала; F — площадь поверхности объекта; p_i — проекция удельной внешней силы на соответствующую координатную ось; v_i — проекция вектора скорости движения материальной точки на соответствующую координатную ось.

Численное решение системы уравнений обеспечивает возможность расчета распределения напряжений при формообразовании, степени и скорости накопленной деформации, площади пятна контакта инструмента с заготовкой, осевых и радиальных усилий инструмента для формоизменения заготовки в течение процесса и окончательные размеры заготовки диска и вала [3, 6, 7].

Методика моделирования процесса формообразования. Моделирование процесса раскатки диска и полого вала из жаропрочных сплавов проводилось для реализации условий сверхпластической деформации при постоянной температуре. Для моделирования использовали программный продукт “DEFORM-3D”. Условия и допущения, принятые при моделировании, были характерными для таких задач: материал заготовки в исходном состоянии (до деформации) является изотропным, в нем отсутствуют начальные напряжения и деформации; ролик, оправка и прижим считаются абсолютно жесткими телами; геометрические 3D модели инструмента были предварительно созданы в программе “Компас-3D”; заготовка считается вязко-пластичным телом; температура заготовки и инструмента принята одинаковой.

Построение трехмерной конечно-элементной модели процесса формообразования дисков и полых валов [3, 7] включает в себя этапы:

— построение геометрической модели процесса формообразования дисков и полых валов;

Геометрическая модель процесса раскатки для диска представляет собой систему из четырех тел: формовочный ролик, выравнивающий ролик, пиноль и заготовка. Процесс рассматривается как симметричный относительно плоскости, проходящей через центр тяжести заготовки. Пиноль вращается вокруг собственной оси с постоянной угловой скоростью. Формовочный и выравнивающий ролики вращаются вокруг своей оси с переменной во времени угловой скоростью, а также движутся в радиальном направлении от центра заготовки по радиусу к периферии диска с постоянной линейной скоростью (рис. 2а). Заготовка собственного закона движения не имеет и вращается от взаимодействия с другими объектами модели. Геометрическая модель процесса формообразования полых валов представляет собой систему из трех тел: исходная заготовка, шпиндельный узел с оправкой и формообразующий инструмент (рис. 2б, в). С помощью CAD системы осуществлена конвертация модели в формат программного комплекса для конечноэлементного анализа процессов пластического деформирования — DEFORM-3D¹ [3, 8]. Процесс также рассматривается как симметричный относительно плоскости, проходящей через центр тяжести заготовки. Заготовка закреплена на охлаждаемом шпинделе, на котором установлена оправка (рис. 2б, в).

Шпиндель вращается с постоянной угловой скоростью. Формовочный ролик вращается вокруг своей оси с переменной во времени угловой скоростью и перемещается в осевом направлении вдоль оси заготовки с постоянной линейной скоростью. Заго-

¹ Использование КПП “DEFORM-3D” разрешено в соответствии с “Сублицензионным договором NTES-107/20014-AS от 19 ноября 2014 г. Лицензия № 8143.

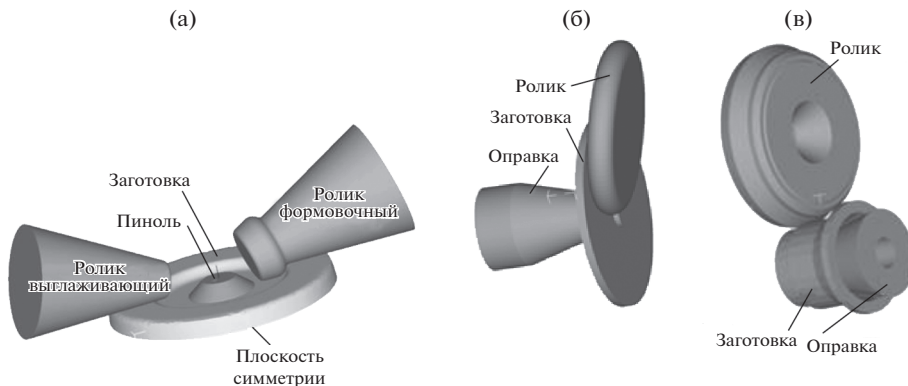


Рис. 2. Геометрическая модель процесса формообразования методом раскатки: (а) – диска; полых валов; (б) – вал № 1 из листа; (в) – вал № 2 из штампованной заготовки.

товка собственного закона движения не имеет и вращается от взаимодействия с другими объектами модели.

– построение конечно-элементной модели заготовки и ее взаимодействие с инструментом – роликом;

Исходные заготовки диска, полого вала № 1 (плоская шайба диаметром D и высотой h) и полого вала № 2 (цилиндр, переходящий в конус с фланцем) показаны на рис. 3а.

Конечно-элементная модель заготовки представляет собой вязкопластическое тело с нелинейным упрочнением, объем которого разбит приблизительно на 100000 тетраэдральных конечных элементов. Внешние узлы сетки конечных элементов, находящиеся на плоскости симметрии, зафиксированы в направлении нормали к этой плоскости. Заготовка и инструмент, представляющий собой абсолютно твердое тело, имеют равную температуру (рис. 3б).

– определение граничных условий конечно-элементной модели заготовки, в частности определение характера ее взаимодействия с инструментом с помощью гибридной модели трения, сочетающей в себе закон трения Амантона–Кулона и закон трения Зибеля

$$\tau_K = \begin{cases} \mu p : \mu p < mk, \\ mk : \mu p \geq mk, \end{cases} \quad (5)$$

где τ_K – внешние удельные касательные силы; μ – коэффициент трения согласно закону трения Амантона–Кулона; m – фактор трения согласно закону трения Зибеля; k – максимальное касательное напряжение в материале; p – нормальное давление материала на стенку инструмента.

– построение реологической модели материала заготовки диска;

В силу того, что процесс протекает в изотермических условиях, реологическая модель вязко-пластичного материала с нелинейным упрочнением может быть определена уравнением [8, 14, 15]

$$\sigma_s = A \epsilon^u \dot{\epsilon}^z + \sigma_0, \quad (6)$$

где σ_s – напряжение течения материала; A , u , z – поправочные коэффициенты уравнения; ϵ – накопленная деформация; σ_0 – предел текучести материала, $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации.

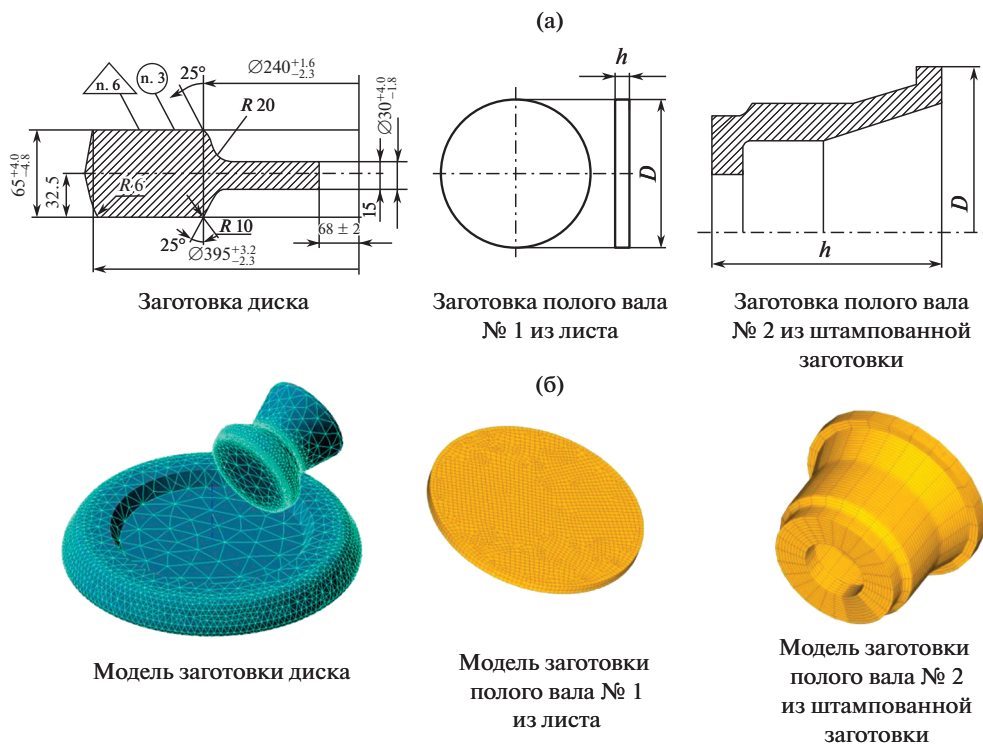


Рис. 3. Исходные заготовки и конечноэлементные модели заготовок для раскатки полых валов: (а) — заготовки: диска, полого вала № 1 из листа, полого вала № 2 из штампованной заготовки; (б) — модели заготовок: диска (11200 конечных элементов); полого вала № 1 (4200 конечных элементов), полого вала № 2 (11760 конечных элементов).

Исходные данные для моделирования и материалы. Для определения температурно-скоростных режимов деформации титанового сплава рассмотрен интервал рабочих температур 800–1000°C. Исследование реологических характеристик материала проводились при температурах ~900°C и ниже с целью определения влияния деформации на структурные параметры материала, обеспечения варьирования режимами деформирования для повышения эксплуатационных свойств раскатанной заготовки. Исследуемый скоростной интервал составлял 10^{-4} – 10^{-1} с⁻¹, что соответствует скоростному интервалу сверхпластической деформации.

В исследованиях зависимости напряжения течения (σ) от скорости деформации ($\dot{\epsilon}$) при различных температурах для титанового сплава ВТ9 с мелкозернистой структурой (средний размер зерна $d = 2.5$ – 3 мкм) при $\dot{\epsilon}$ равной 10^{-2} с⁻¹ оптимальная температура сверхпластической деформации равна 900°C [9, 10, 16] (табл. 1).

В табл. 2, 3 представлены данные для проведения моделирования диска из сплава ВТ9 и полых валов из сплавов ЭИ962-Ш, ЭК79. В качестве модели вала для расчетов была взята деталь из никелевого сплава ЭК79, эскиз которой приведен на рис. 3в.

Из этой модели, с учетом сохранения объема при раскатке, расчетом были определены форма и размеры заготовки (табл. 3).

Таблица 1. Данные зависимости напряжения текучести от скорости деформации сплава ВТ9 (размер зерна 2.5 мкм) при разных температурах

Скорость деформации, $\dot{\epsilon}$, с^{-1}	Температура, $^{\circ}\text{C}$			
	850	900	950	1000
	Напряжение текучести, МПа			
1.3×10^{-4}	11	8	7	5
2.0×10^{-3}	28	17	14	10
2.8×10^{-2}	86	68	47	21

Таблица 2. Исходные данные для моделирования с учетом построенной реологической модели материала заготовки диска из сплава ВТ9

Исходные данные		Значение
Коэффициенты реологической модели	σ МПа	23.8
	A	175
	u	0
	z	0.32
Температура заготовки	$T_{\text{заг}}$, $^{\circ}\text{C}$	950
Скорость вращения пиноли	$\omega_{\text{п}}$, рад/сек	0.10472
Изменение скорости вращения формовочного ролика во времени t , сек	$\omega_{\text{ф}}$, рад/сек	0.1972727 при $t = 0$
		0.4323 при $t = 2340$
Изменение скорости вращения выглаживающего ролика во времени t , сек	$\omega_{\text{в}}$, рад/сек	0.2954545 при $t = 0$
		0.649 при $t = 2340$
Линейная скорость формовочного ролика	$V_{\text{ф}}$, мм/сек	0.04167
Линейная скорость выглаживающего ролика	$V_{\text{в}}$, мм/сек	0.04167
Фактор трения между заготовкой и инструментом	m	0.7
Коэффициент трения между заготовкой и инструментом	μ	0.15
Размер шага по времени (процесс разбит на 11756 шагов)	$t_{\text{шаг}}$, сек/шаг	0.2

При моделировании использованы данные аналогичного по химическому составу никелевого сплава FGH96. Кривая напряжения—деформация при различных температурах у сплава аналога такая же.

Результаты моделирования и их обсуждение. Анализ конечноэлементного моделирования позволил определить термомеханические и энергосиловые параметры, необходимые для раскатки осесимметричных деталей в условиях сверхпластичности при разработке технологии и оборудования. В результате моделирования получены графики зависимости сил деформирования на ролике-инструменте в процессе изотермической раскатки по ходу его перемещения от ступицы до периферии диска (т.е. отношение R_i/R_0 , где R_0 — радиус диска в начале процесса раскатки, т.е. ступицы, R_i — текущее значение радиуса раскатываемого диска) (рис. 4).

Как видно из графиков, силы и момент деформирования падают по мере увеличения диаметра заготовки в процессе изотермической вытяжки диаметр исходной заготовки с 400 мм увеличивается до 800 мм. Это связано с уменьшением пятна контакта между формовочным роликом и заготовкой, а также с уменьшением количества деформируемого металла заготовки в очаге деформации.

Таблица 3. Исходные данные для моделирования с учетом построенной реологической модели материала заготовок полых валов из сплавов ЭИ962-Ш и ЭК79

Реологическая модель материала		Значение для вала № 1 (материал ЭИ962)	Значение для вала № 2 (материал ЭК79)
Коэффициенты реологической модели	σ_0 , МПа	34	65
	A	76	180
	u	0	0
	z	0.16	0.15
Инструмент:	Скорость	Вал № 1	Вал № 2
Оправка	Угловая (об/мин)	60	10
Ролик	Осевая линейная (мм/сек)	1.17	0.15
	Радиальная линейная (мм/сек)	0.427	0

Для оценки адекватности построенной математической модели, приведены результаты экспериментальных данных [9], полученные при раскатке диска из сплава ВТ9 на раскатном стане АЛРД-800 (F_o – сила в осевом направлении, F_r – сила в радиальном направлении, R_i/R_0 – соотношение текущего и начального радиуса раскатки). Так, в процессе раскатки диска из сплава ВТ9 при соотношении $R_i/R_0 = 1.4$, сила деформирования в осевом направлении $F_o = 90$ кН, а в радиальном $F_r = 60$ кН [9].

Сравнительный анализ показал, что между результатами моделирования и экспериментом есть хорошая корреляция, что подтверждает корректность разработанной модели.

Полученные в результате математического моделирования графики (рис. 4) изменения силы деформирования в радиальном F_r и осевом F_o направлениях в зависимости от величины подачи за один оборот при различных скоростях вращения заготовки показывают, что при увеличении величины подачи ролика-инструмента силы деформирования существенно возрастают при увеличении скорости вращения заготовки.

В целом графики силы деформирования в осевом направлении, полученные в ходе моделирования (рис. 5), хорошо соотносятся с результатами эксперимента как качественно, так и количественно [11, 13]. Результаты математического моделирования

**Рис. 4.** Изменения сил деформирования на ролике в процессе раскатки диска.

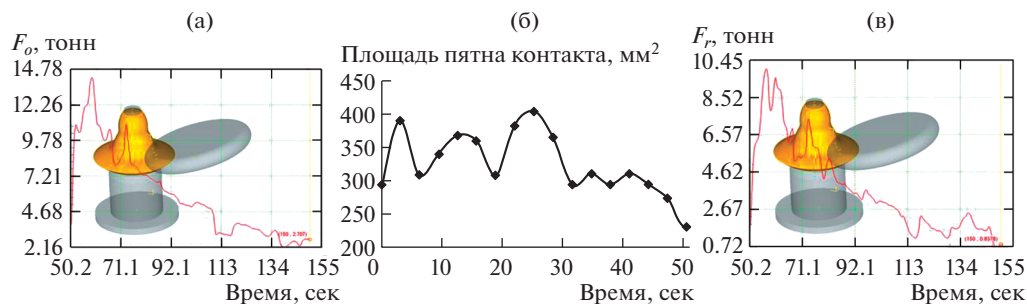


Рис. 5. График изменения силы при формообразовании вала № 1: (а) – F_o в осевом направлении; (б) – изменения площади пятна контакта; (в) – F_r в радиальном направлении.

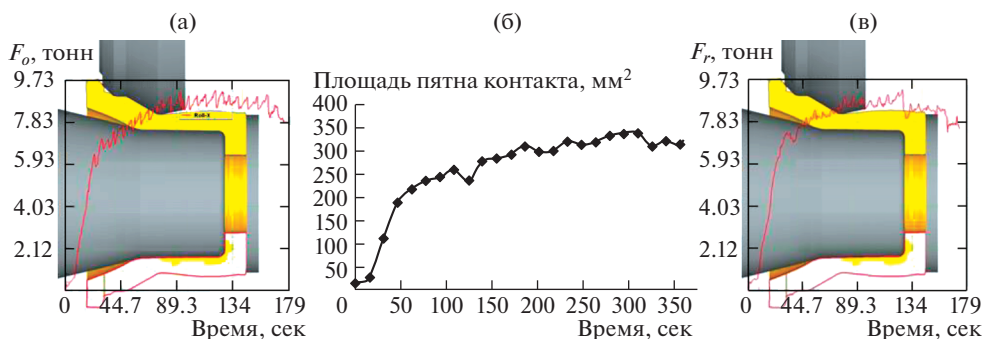


Рис. 6. График изменения силы при формообразовании вала № 2: (а) – F_o в осевом направлении; (б) – график изменения площади пятна контакта; (в) – F_r в радиальном направлении.

процесса раскатки полых валов представлены на рис. 5, 6 и показывают изменение величины силы деформации в осевом и радиальном направлении, изменение площади пятна контакта при формообразовании вала № 1 и № 2.

Результаты экспериментальных исследований, а также данные из литературных источников [6, 8, 13], показали, что с увеличением величины подачи ролика, наблюдается рост площади пятна контакта заготовки с роликом и повышение напряжения течения материала, поэтому увеличивается сила, которую необходимо приложить к ролику для формообразования вала. Раскатка проведена при температуре 1100°C со скоростью деформации 10^{-2} с^{-1} (размер зерна 5–7 мкм).

Усилия, действующие на ролик в процессе раскатки вала № 2 из сплава ЭК79 [6] в осевом направлении составляют 6.5–8 тс, а в радиальном – 5.7–6.5 тс, что коррелирует с полученными в статье результатами (рис. 6а, в).

Выводы. 1. Разработана методика построения математической модели процесса изготовления осесимметричных деталей из жаропрочных сплавов методом локальной деформации в условиях сверхпластичности на примере раскатки дисков газотурбинных двигателей. Данная методика позволяет определять необходимые энергосиловые параметры при разработке технологии и проектировании оборудования для раскатки осесимметричных деталей из жаропрочных сплавов на основе титана и никеля. 2. Сравнение результатов экспериментальных исследований энергосиловых парамет-

ров технологического процесса с расчетными подтвердило адекватность математической модели и возможность ее использования для прогнозирования энергосиловых параметров технологического процесса, обеспечивающих заданную регламентированоизменяющуюся структуру жаропрочного сплава в условиях сверхпластической деформации при изготовлении деталей ГТД. 3. С использованием программного комплекса DEFORM-3D решена задача математического моделирования процесса формообразования полых валов в сверхпластических условиях. В результате многовариантного варьирования формой и размерами исходной заготовки, скоростью ее вращения, величиной подачи инструмента, температурой были получены технологические решения для реализации процесса формообразования полых валов из листа и штампованной заготовки в соответствии с требованиями повышения прочностных характеристик сплава и обеспечением заданных размеров деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. М.: Наука, 2002. 438 с.
2. Утяшев Ф.З., Рааб И.Г. Деформационные методы получения обработки ультрамелкозернистых и наноструктурных материалов. Уфа: Гилем, НИК Башк. энцикл., 2013. 376 с. ISBN: 978-5-88185-115-6.
3. Sukhorukov R. Y., Sidorov A. A., Utyashev F. Z., Ibragimov A. R. The determination of power characteristics of isothermal roll formation of critical parts of gas-turbine engines. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015 44(8). P. 737.
<https://doi.org/10.3103/S1052618815080075>
4. Utyashev F. Z., Sukhorukov R. U., Nazarov A. A., Potekaev A. I. The Values of Strain Components and Their Role in Formation of Ultrafine-Grained and Nanosized Structure in Materials by Means of Severe Plastic Deformation. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Fizika*, January, 2015. № 1. P. 64.
<https://doi.org/10.1007/s11182-015-0464-2>
5. Utyashev F., Mulyukov R., Sukhorukov R., Valitov V. New technologies development and equipment for local shape-forming of the complicated parts made of heat-resistant alloys under superplastic deformation conditions. *Materials Science Forum*. 2016. 838–839, с. 615–620. 12th International Conference on Superplasticity in Advanced Materials, ICSAM 2015; Tokyo; Japan. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.838-839.615
6. Утяшев Ф.З. и др. Разработка научных основ высокоэффективной технологии и оборудования для изготовления в условиях сверхпластичности широкой номенклатуры полых валов газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов и сталей (Отчет о ПНИ, заключительный Этап № 5. Соглашение с Минобрнауки РФ № 14.604.21.0091 от 08 июля 2014 г. Номер государственной регистрации 114092270017 от 22.09.2014. Инв. АААА-Б17-217041770123-9 от 17.04.2017, 255 с.
7. Shakhov R. V., Nagimov M. I., Mukhtarov Sh. Kh., Utyashev F. Z., Sukhorukov R. U., Sidorov A. A. Numerical simulation of superplastic roll-forming of a hollow shaft out of nickel-based superalloy. *Materials physics and mechanics* 2017. № 33. P. 171.
8. Bewlay B. P., Gigliotti M. F. X., Utyashev F. Z., Kaibyshev O. A. Super plastic roll forming of Ti alloys // *Materials & Design*. 2000. 21 (4). P. 287.
9. Морозов С.В. Силовые параметры при изотермической раскатке на автоматической линии АЛРД-800 // *Ж. Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2014. № 1. С. 165.
10. Li Q., Wu L., Li F., Liu T., Wang S., Wei Z., & Su C. Experiments study on the rolling process for heavy disk // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. V. 65. Iss. 5–8. P. 1171.
11. Oh S. I., Altan T. Metal forming and the finite-element method. – Oxford University Press, 1989.
12. Шитиков А.А. Моделирование предварительного перехода при пневмоформовке в состоянии сверхпластичности // *КШП ОМД*. 2014. № 2. С. 34.

-
13. *Лопатин Н.В., Кудрявцев Е.А., Салищев Г.А.* Моделирование формообразования и эволюции структуры наноструктурного титанового сплава ВТ6 при изотермической формовке с использованием DEFORM 2D // Труды международного форума Инженерные системы. 2013. С. 191.
 14. *Song X. et al.* Diametrical growth in the forward flow forming process: simulation, validation, and prediction // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. V. 71. № 1–4. P. 207.
 15. *Anjami N., Basti A.* Investigation of rolls size effects on hot ring rolling process by coupled thermo-mechanical 3D-FEA // Journal of Materials Processing Technology. 2010. V. 210. Iss.10. P. 1364.
 16. *Бурлаков И.А.* Влияние режимов раскатки на структуру и механические свойства дисков из сплава ВТ9 // Заготовительные производства в машиностроении. М. 2008. № 5. С. 21.