

Математическое моделирование процессов изготовления осесимметричных деталей авиационного назначения методом локальной деформации

Р. Ю. Сухоруков¹, А. А. Сидоров^{1†}, А. Р. Ибрагимов¹, Ф. З. Утяшев²

[†]alexander.a.sidorov@gmail.com

¹Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Малый Харитоньевский переулок 4, Москва, 101990, Россия

²Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, Уфа, 450001, Россия

Детали типа валов и их комбинации с дисками являются важнейшими элементами конструкции современного газотурбинного двигателя для авиадвигателей и аналогичных наземных энергетических установок. Эти детали эксплуатируются в условиях экстремальных силовых и тепловых воздействий и, поэтому, изготавливаются из жаропрочных сплавов на основе никеля, железа и титана. Формообразование подобных деталей традиционными методами горячей объемной штамповки требует использования мощного, энергоемкого оборудования. Одним из наиболее перспективных способов снижения энергосиловых затрат на изготовление осесимметричных деталей авиационного назначения, снижения количества переходов и увеличения КИМ является изотермическая раскатка в состоянии сверхпластичности на специализированных раскатных станах. Для проектирования данного класса оборудования необходимо определение энергосиловых параметров, которые это оборудование должно обеспечить. Для определения необходимых энергосиловых параметров технологического процесса эффективным способом является математическое моделирование. В настоящей статье предложена методика создания конечно-элементной модели технологического процесса изотермической раскатки в состоянии сверхпластичности при высокой степени локализации пластической деформации, с учетом механических свойств материала с ультра мелкозернистой структурой на примере производства диска из жаропрочного титанового сплава ВТ9. В работе приведены как результаты конечно-элементного расчета энергосиловых параметров процесса раскатки в коммерческом программном коде DEFORM 3D, так и результаты экспериментального измерения сил деформирования при раскатке.

Ключевые слова: изотермическая штамповка, раскатка, конечно-элементный анализ

Mathematical modeling of the manufacturing process of axisymmetric aircraft parts by the local deformation method

R.U. Sukhorukov¹, A.A. Sidorov¹, A.R. Ibragimov¹, F.Z. Utyashev²

¹A.Blagonravov Institute of Machines Science of the RAS, 4 Maly Kharitonievskiy Pereulok, Moscow, 101990, Russia

²Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, 39 Khalturin St., Ufa, 450001, Russia

Parts like shafts and their combinations with discs are very significant elements of the modern aviation gas turbine engines and cognate ground energy propulsions. These parts are usually working in the extremely high loading and temperature conditions and therefore are produced from the highly heat-resistant alloys on the base of Ni, Fe and Ti. The production of these parts with the traditional hot metal forming leads the need of using powerful and energy-consuming equipment. One of the most prospective ways of reducing the load-energy consumption, reducing of the technological operations quantities, increasing of the material efficiency in producing of the axisymmetric aircraft parts is isothermal rolling under the superplastic deformation (SPD) condition using the specialized rolling machines. For the design of this type of machines it is necessary to estimate the load stroke parameters of the process, which the machine has to provide. The effective method of the estimation of the required load stroke parameters is computer simulation of the rolling process. In this paper, the technique to create a finite element model of the process of SPD during isothermal rolling with a high degree of plastic deformation localization is presented and exemplified by the production of disc made of heat-resistant VT9 titanium alloy, in respect to the mechanical properties of the ultra fine grain material microstructure. It is also presented the results of the rolling processes load-stroke, received in the commercial FEM code DEFORM 3D, and the load-stroke data received from the experiment.

Keywords: isothermal forming, rolling, FEM

Введение

Одним из наиболее перспективных способов изготовления осесимметричных ответственных деталей авиационного назначения является изотермическая раскатка методом локальной деформации в состоянии сверхпластичности [1]. Данным методом могут быть получены различные детали, в том числе диски и полые валы из жаропрочных сплавов на основе титана и никеля. В данной статье рассматривается методика построения математической модели процесса изготовления осесимметричных деталей методом локальной деформации на примере раскатки диска, которая может быть применена к подобным процессам, в частности, к процессам раскатки полых валов. Принципиальная схема процесса раскатки диска авиационного назначения представлена на рис.1.

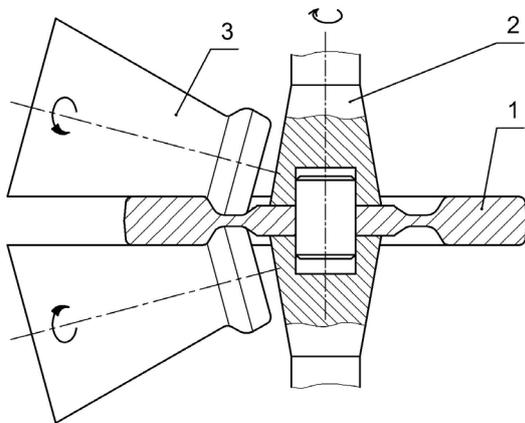


Рис. 1. Принципиальная схема процесса изотермической раскатки в состоянии сверхпластичности.

Fig. 1. The principal scheme of the isothermal rolling in superplastic condition.

Нагретая до температуры деформации заготовка 1 приводится во вращения пинолями 2. Под воздействием пары вращающихся роликов 3, имеющих возможность перемещаться в осевом и радиальном направлении, а также менять угол наклона по отношению к плоскости раскатки, заготовка деформируется с уменьшением толщины и с увеличением диаметра. Деформация в заготовке происходит в состоянии сверхпластичности, что позволяет обеспечить заданное структурообразование во всем объеме диска, а, следовательно, получить высокие эксплуатационные характеристики конечной детали.

Процесс изотермической раскатки в состоянии сверхпластичности может быть осуществлен исключительно на специально сконструированном для этого оборудовании — раскатном стане [2]. Для создания подобного оборудования важным моментом является определение энергосиловых параметров технологического процесса, так как конструкция раскатного стана должна обеспечить необходимые для процесса изотермической раскатки дисков скорости деформирования, силы и моменты деформирования. Необходимо учитывать как разброс типоразмеров дисков, так и разницу

свойств материалов из которых эти диски производятся.

В настоящей работе приведена методика расчета необходимых энергосиловых параметров изотермической раскатки дисков в состоянии сверхпластичности на основе метода конечных элементов.

Постановка задачи

В силу того, что изотермическая раскатка дисков в состоянии сверхпластичности является медленно протекающим процессом, массовыми и инерционными силами, действующими на заготовку, можно пренебречь, а для определения напряженно-деформированного состояния и характера течения металла в процессе раскатки использовать математическое конечно-элементное моделирование на основе следующей системы уравнений [3].

1) Дифференциальные уравнения равновесия, связывающие 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.

2) Кинематические уравнения, связывающие 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.

3) Уравнения 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.

4) Условия несжимаемости (4) и пластичности Мизеса (5):

$$\dot{\epsilon}_v = 0 \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_s \quad (5)$$

где $\dot{\epsilon}_v$ — скорость объемной деформации, σ_s — напряжение течения, определяемое по реологической модели материала.

Решение системы уравнений 1—5 в методе конечных элементов принято осуществлять с помощью функционала Маркова, представляющего собой разность мощности пластической деформации и мощности внешних

сил, приложенных к объекту, принимающего минимальное значение на истинном поле скоростей:

$$\Phi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} dV - \int_F v_i p_i dF \quad (6)$$

где V — объем материала, F — площадь поверхности объекта, p_i — проекция удельной внешней силы на соответствующую координатную ось.

Уравнения 1—6 реализованы во множестве различных коммерческих и некоммерческих программных пакетов. Руководствуясь опытом работ [4—6] по моделированию процессов сверхпластической формовки, а также опытом работы [7] по моделированию процессов раскатки с высокой локализацией деформации, в качестве пакета конечно-элементного моделирования процесса раскатки дисков в состоянии сверхпластичности был выбран коммерческий программный пакет SFTC DEFORM 3D.

Построение полной трехмерной конечно-элементной модели процесса изотермической раскатки включает в себя три основных этапа: построение геометрической модели процесса раскатки, построение конечно-элементной модели заготовки и построение реологической модели материала.

Геометрическая модель процесса раскатки представляет собой систему из четырех тел: формовочного ролика, выглаживающего ролика, пиноли и заготовки. Процесс рассматривается как симметричный относительно плоскости, проходящей через центр тяжести заготовки.

Пиноль вращается вокруг собственной оси с постоянной угловой скоростью. Формовочный и выглаживающий ролики вращаются вокруг своей оси с переменной во времени угловой скоростью, а также движутся в радиальном направлении от центра заготовки к ободу с постоянной линейной скоростью. Заготовка собственного закона движения не имеет и вращается от взаимодействия с другими объектами модели.

Конечно-элементная модель заготовки представляет собой жестко-пластическое тело с нелинейным упрочнением, объем которого разбит приблизительно на 105 тетраэдральных конечных элементов.

Внешние узлы сетки конечных элементов, находящиеся на плоскости симметрии, зафиксированы в направлении нормали к этой плоскости.

Взаимодействие заготовки с инструментом описывается гибридной моделью трения, сочетающей в себе закон трения Амантона-Кулона и закон трения Зибеля:

$$\tau_k = \begin{cases} \mu p : \mu_p < mk \\ mk : \mu_p \geq mk \end{cases} \quad (7)$$

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.

Конечно-элементная модель инструмента в данной задаче не строится, инструмент представляет собой абсолютно твердое тело постоянной температуры.

В силу того, что процесс протекает в изотермических

условиях, реологическая модель жестко-пластичного материала с нелинейным упрочнением может быть определена следующим уравнением:

$$\sigma_s = A \cdot \varepsilon^u \cdot \dot{\varepsilon}^z + \sigma_0 \quad (8)$$

где σ_s — напряжение течения материала, A , u , z — поправочные коэффициенты уравнения, ε — накопленная деформация, σ_0 — предел текучести материала.

Результаты исследований и их обсуждение

В работе [8] приведены результаты экспериментальных исследований процесса изотермической раскатки диска. Исходные технологические параметры этих исследований были взяты в качестве эталонных для оценки адекватности построенной математической модели. На рис.2 приведены размеры исходной заготовки из титанового сплава VT9, на рис.3 приведены графики силы деформирования, полученные экспериментально.

В результате моделирования получены графики зависимости силы деформирования на формовочном ролике в процессе изотермической раскатки по ходу его перемещения, представленные на рис.4.

Как видно из графиков, силы и момент деформирования падают по мере увеличения диаметра заготовки, что связано с уменьшением пятна контакта между формовочным роликом и заготовкой, а также уменьшением количества деформируемого металла (под уменьшением количества деформируемого металла понимается, в данном случае, снижение площади участка заготовки, где скорость деформации отлична от нуля).

Значительные осцилляции расчетных графиков рис.4 связаны с погрешностью расчета пятна контакта, представленного в модели поверхностными треугольными конечными элементами. Сгущение сетки конечных элементов в очаге деформации может значительно снизить эту погрешность. Однако, в силу того, что очаг деформации

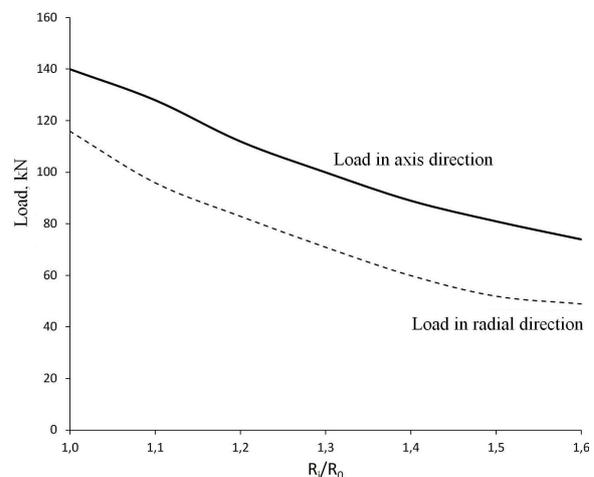


Рис. 2. Размеры исходной заготовки для изотермической раскатки из сплава VT9.

Fig. 2. Dimensions of the initial workpiece for isothermal VT9 alloy rolling.

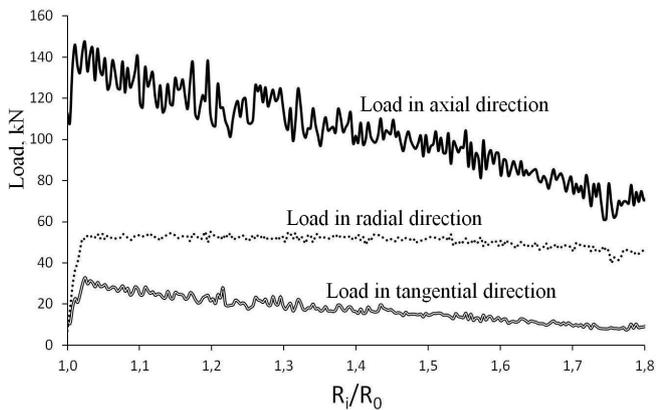


Рис. 3. Экспериментальные графики измерения силы деформирования при изотермической раскатке из сплава ВТ9. (R_i – текущий радиус раскатки, R_0 – начальный радиус раскатки).

Fig. 3. Experimental load-stroke data of the isothermal VT9 alloy rolling (R_i – current rolling radius, R_0 – initial rolling radius).

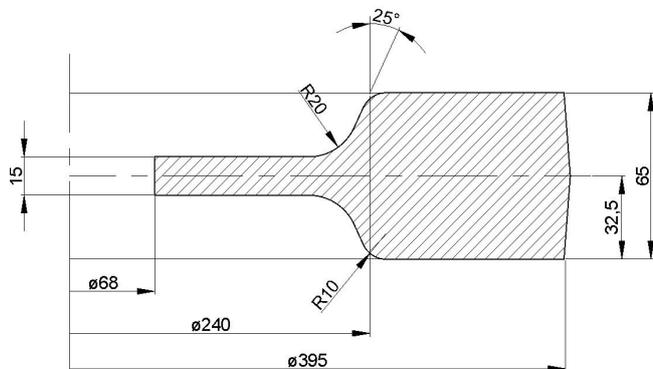


Рис. 4. Графики силы деформирования на формовочном ролике.
Fig. 4. Load-stroke graph of the forming roll.

ции в данной задаче сильно локализован и перемещается по телу заготовки, это обязательно приведет либо к значительному замедлению расчета в случае, если сгущение сетки конечных элементов будет сделано по всему радиусу заготовки, либо к накоплению ошибок при интерполяции узловых переменных в случае локального сгущения сетки конечных элементов, так как в этом случае появляется необходимость перестроения сетки в момент, когда очаг деформации покидает область сгущения.

В целом график зависимости силы деформирования в осевом направлении от радиуса, полученный в ходе моделирования (рис.4), согласуется с результатами эксперимента (рис.3) как качественно, так и количественно. Некоторые количественные расхождения могут быть связаны с неточностью реологической модели сплава ВТ9.

Выводы

Разработана методика построения математической модели процесса изготовления осесимметричных деталей авиационного назначения методом локальной деформации 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.

Сравнение результатов экспериментального исследования энергосиловых параметров технологического процесса с расчетными подтвердило адекватность математической модели и возможность ее использования для прогнозирования энергосиловых параметров технологии и оборудования, обеспечивающих заданную регламентировано-изменяющуюся структуру жаропрочного сплава в условиях сверхпластической деформации.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России, в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» (соглашение № 14.604.21.0091 от 08 июля 2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI60414X0091).

Acknowledgements. The work has been done with the financial support of the Russian Ministry of the Education and Science within the realization of the purpose-orientated federal program «Research and development of the priority direction of the scientific-technological complex of Russia in 2014-2020» (The agreement № 14.604.21.0091 08.07.2014, project id RFMEFI60414X0091).

Литература / References

1. F. Z. Utyashev, I. A. Burlakov, V. A. Geikin, V. V. Morozov, R. R. Mulyukov, A. A. Nazarov, R. Y. Sukhorukov. J. of Machinery Manufacture and Reliability. **42** (5), 419—426 (2013).
2. F.Z. Utyashev, R. Y. Sukhorukov, A. A. Nazarov, A. I. Potekaev. Russian Physics Journal. 1—9 (2015).
3. S.I. Oh, T. Altan. Metal forming and the finite-element method. Oxford university press. (1989) 230p.
4. A. A. Shitikov. KShP OMD. **2**, 34—40 (2014) (in Russian). [A. A. Шитиков КШП ОМД. **2**, 34—40 (2014).]
5. N.V. Lopatin, E. A. Kudriavtsev, G. A. Solishev. Engineering systems 191—196 (2013). (In Russian). [Н. В. Лопатин, Е. А. Кудрявцев, Г. А. Салищев. Инженерные системы. 191—196 (2013).]
6. M. A. M. Hossain, K. Y. Park, S. T. Hong. Superplastic Behavior of Al5083 Alloy during Microforming Process. (2010).
7. X. Song. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. **71** (1-4), 207—217 (2014).
8. O. A. Kaibyshev, F. Z. Utyashev. Superplasticity, Structure Refining, and Processing of Hard-to-deform Alloys. M. Nauka. (2002) 438 p. (in Russian) [О. А. Кайбышев, Ф. З. Утяшев. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. М. Наука. (2002) 438 с.]