Materials Physics and Mechanics 33 (2017) 171-177 Received: November 1, 2017

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ ПОЛОГО ВАЛА ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Р.В. Шахов[1], М.И. Нагимов[1], Ш.Х. Мухтаров[1*], Ф.З. Утяшев[1], Р.Ю. Сухоруков[2], А.А. Сидоров[2]

[1] Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, Уфа, 450001, Россия

[2] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Малый Харитоньевский переулок 4, Москва, 101990, Россия

*e-mail: shamilm@imsp.ru

Аннотация. Проведено компьютерное моделирование процесса изотермической раскатки полого вала из жаропрочного никелевого сплава в условиях сверхпластической деформации. Варьировались конструкции заготовки и ролика, также расположение плоскости вращения ролика относительно заготовки. Рассматривались различные исходные заготовки в виде конусов с образующими, составляющими углы от 15° до 45° к оси, и начальные положения раскатного ролика. В результате определены оптимальные конструкции заготовки и инструмента, позволяющие получить требуемую форму и размеры вала при допустимой для раскатки силе деформации на имеющемся оборудовании. На основании этого выбран оптимальный вариант заготовки с углом конуса 30°.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; изотермическая раскатка; сверхпластичность; никелевый сплав; полый вал.

1. Введение

Валы газотурбинных двигателей работают при высоких оборотах, повышенных температурах, передают значительные крутящие моменты, подвержены высокочастотным колебаниям. Соответственно, такие детали ответственного назначения изготавливаются из высокопрочных сплавов и должны иметь повышенный комплекс механических свойств, что достигается не только за счет подбора химического состава сплава, но и за счет формирования в нем однородной структуры надлежащего типа. Технологический процесс изготовления типового вала из деформируемых жаропрочных никелевых сплавов включает в себя операции горячей штамповки, термообработки и механической обработки. Из-за низкой деформируемости и малой пластичности этих сплавов, при обычной горячей штамповке коэффициент использования металла (КИМ) не превышает 0,2 - 0,3. При изготовлении крупногабаритных валов такая деформация не обеспечивает однородности микроструктуры и изотропности механических свойств. Изготовление валов с использованием порошковых сплавов позволяет получать такие детали с более высокими механическими свойствами, применяя операцию штамповки в условиях сверхпластической деформации [1]. Другой способ изготовления вала из порошков заключается в использовании горячего изостатического прессования в специализированной капсуле. Порошковая технология является дорогостоящей, к тому

© 2017, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
© 2017, Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS

же, после горячего изостатического прессования высока вероятность сохранения пор в детали. Менее дорогостоящим методом формообразования валов по сравнению со штамповкой является метод раскатки в условиях сверхпластичности, который позволяет улучшить микроструктуру сплава и, после проведения термической обработки, повысить его механические свойства [1-4]. Отличительной особенностью операции раскатки является локальный характер приложения деформирующего усилия, что позволяет существенно снизить усилие деформирования, расходы на инструмент, а также повысить КИМ [1]. При раскатке полых валов внутренняя геометрия детали соответствует геометрии используемой оправки, на которую раскатывают заготовку. Внешние форма и размеры придаются детали давильным роликом с высокой точностью. При разработке операции раскатки важно подобрать оптимальную форму заготовки и инструмента, а также обеспечить необходимую силу деформации с учетом возможностей давильного станка. Для решения такой задачи целесообразно использовать моделирование в рамках решения таких задач, заложенных в известных компьютерных программах. Особенно эффективно компьютерное моделирование при разработке процесса раскатки относительно простых по форме валов, отличающихся небольшим перепадом диаметральных размеров и малой протяженностью конических участков. В этом случае использование известных пакетов компьютерных программ расчета, которые, как известно, широко применяют для анализа стационарных процессов, можно использовать и в отношении нестационарных процессов раскатки деталей с простой конфигурацией.

Целью данной работы явилось определение рациональной конструкции инструмента и исходной заготовки, а также расчет сил деформации для процесса раскатки полого вала типичной формы.

2. Методика моделирования и эксперимента

Моделирование процесса раскатки вала из жаропрочного никелевого сплава проводилось для случая реализации условий сверхпластической деформации [1]. То есть, были приняты постоянные значения температуры, скорости деформации характерные для сверхпластической деформации. Для моделирования использовали программный продукт «Deform». Для моделирования процесса раскатки вала был выбран модуль «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» и сохранены в двоичной форме формата stl;
- заготовка считается пластичным телом.

В качестве модели вала для расчетов была взята реальная деталь из никелевого сплава ЭК79, эскиз которой приведен на Рис. 1. Из этой модели, с учетом сохранения объема при раскатке, расчетом были определены форма и размеры заготовки для раскатки.

В связи с отсутствием в базе данных программы «Deform-3D» определяющих соотношений для жаропрочного сплава ЭК79, в работе использовали данные аналогичного по химическому составу никелевого сплава FGH96 (Таблица 1) [5].

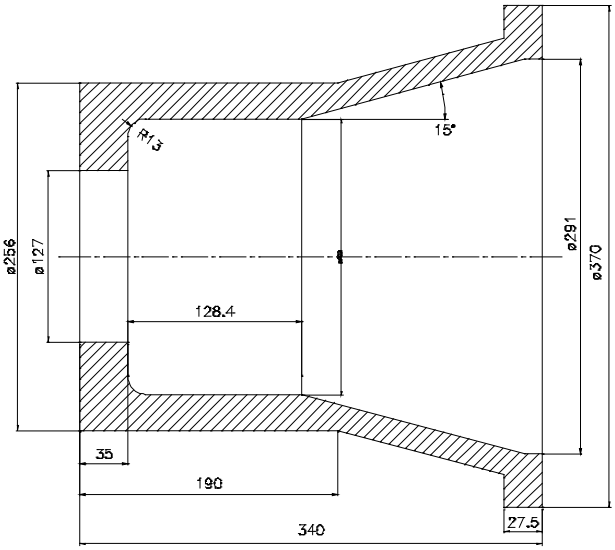


Рис. 1. Эскиз раскатанной детали из никелевого сплава ЭК79.

Таблица 1. Химический состав никелевых сплавов.

Сплав	Mo	Co	Al	W	Ti	Cr	Nb	V	Fe	Ni
ЭК79	4,0-5,0	12,5-16,0	2,8-3,3	2,0-3,0	2,4-2,8	10,0-12,0	2,5-3,0	0,4-0,8	<1,0	Осн.
FGH96	4,0	13,0	2,2	4,0	3,7	16,0	0,8	-	-	Осн.

3. Результаты и их обсуждение

Были рассмотрены пять вариантов процесса раскатки полого вала, в которых варьировали форму заготовки, ролика и расположение плоскости его вращения. Для первого варианта раскатки вала была разработана модель заготовки, в которой раскатывалась и, соответственно, удлинялась цилиндрическая часть, коническая часть была близка по размерам к готовой детали и подвергалась лишь калибровке (Рис. 2а). Второй вариант отличался от первого тем, что раскатка производилась роликом с измененными конструкцией и расположением: его снабдили полкой, предотвращающей образование наплыва материала заготовки, и повернули плоскость его вращения на 15° относительно плоскости вращения заготовки. Третий вариант (Рис. 2д) отличался от второго конструкцией ролика, плоскостью вращения и формой заготовки. Ролик имел больший радиус передней части и полку для предотвращения наплыва за роликом, плоскость вращения совпадала с плоскостью вращения детали. Раскатываемая часть заготовки имела конусную форму с наклоном образующей к оси оправки 15°. Для четвертого варианта моделирования была выбрана конусная заготовка с углом конуса 45°, а ролик имел переднюю конусную часть, направленную под углом 55° по отношению к оси заготовки (Рис. 2ж). Пятый вариант раскатки выполнили таким же роликом, как в четвертом варианте, но изменили угол конусности заготовки с 45° до 30° (Рис. 2и).

По результатам раскатки по первому варианту (Рис. 2б) видно, что при данной форме ролика образуется наплыв перед роликом, переходящий в складку. В результате раскатки по второму варианту образовался наплыв металла после ролика (Рис. 2г). На Рис. 2 е показан результат третьего варианта раскатки, в котором также образовался наплыв металла перед роликом. В результате раскатки по четвертому варианту произошло чрезмерное вытягивание металла из торцевой части заготовки и утонение вала (Рис. 2з).

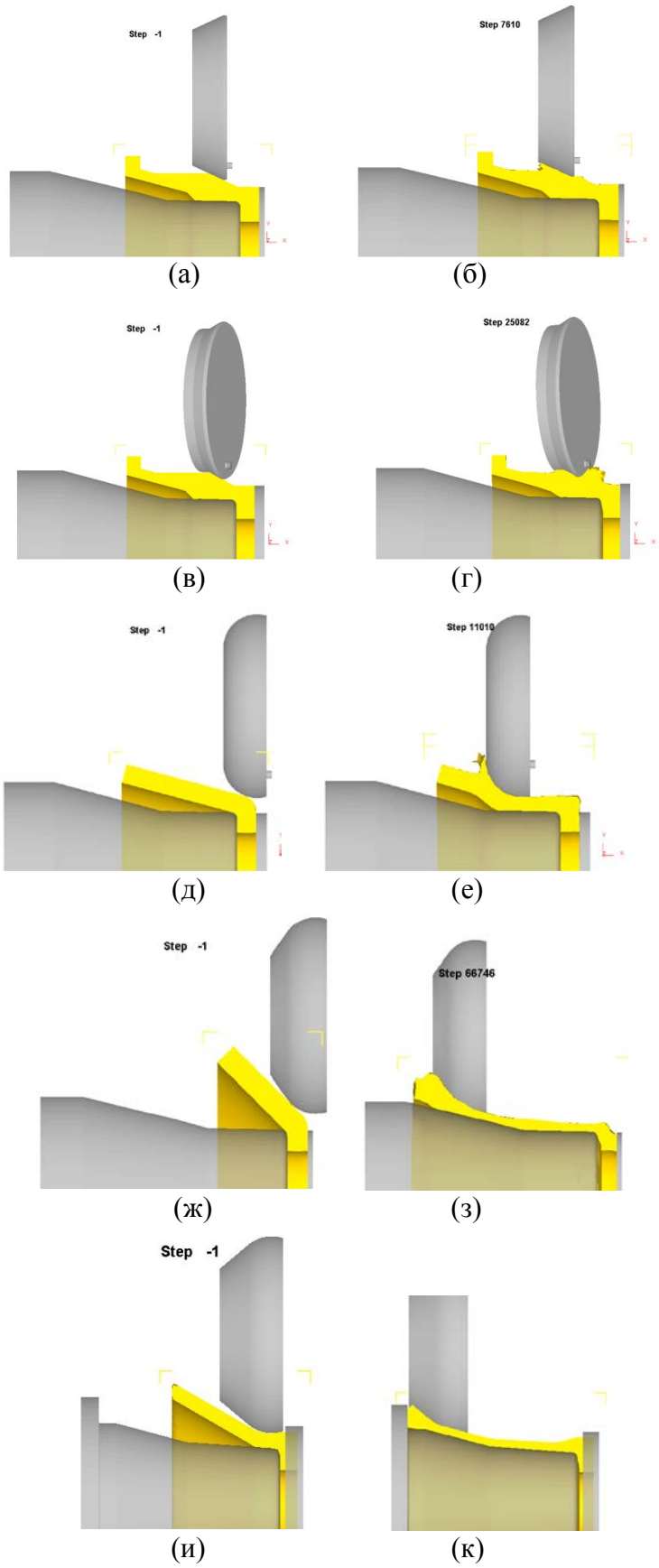
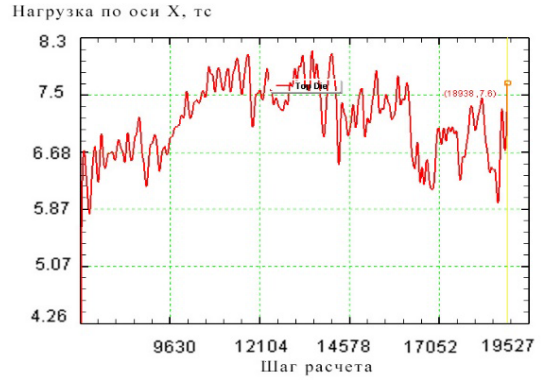


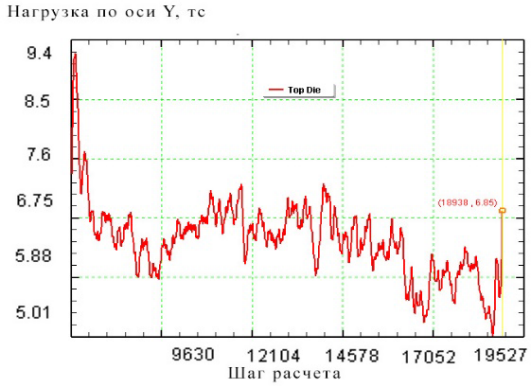
Рис. 2. Моделирование раскатки полого вала: (а, б) - первый вариант; (в, г) - второй вариант; (д, е) третий вариант; (ж, з) четвертый вариант; (и, к) пятый вариант; (а, в, д, ж, и) перед раскаткой; (б, г, е, з, к) окончание раскатки.

Наиболее благоприятным оказался пятый вариант раскатки, так как в этом случае в раскатанной заготовке отсутствуют дефекты, описанные выше в других вариантах. Раскатанная деталь представлена на Рис. 2 к.

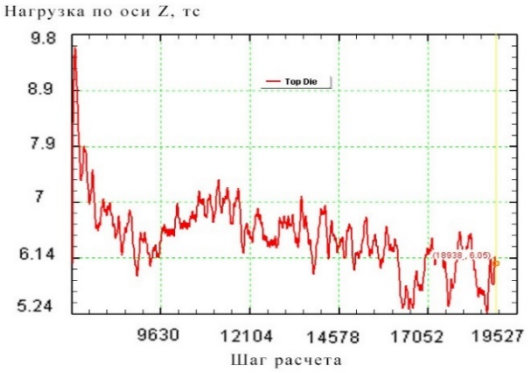
На Рис. 3 приведены графики изменения со временем (с количеством шагов расчета) усилия, действующего на ролик в процессе раскатки вала по оптимальному - пятому варианту. Видно, что максимальное усилие не превышает 9,8 тонн.



(а)



(б)



(в)

Рис. 3. Силы, действующие на ролик в зависимости от шага расчета: (а) в продольном направлении по оси X; (б) в радиальном направлении по оси Y, (в) в радиальном направлении по оси Z.

6. Выводы

Таким образом, методом математического моделирования были рассмотрены пять различных вариантов раскатки вала ГТД из жаропрочного никелевого сплава типа ЭК79. В результате исследования этих вариантов раскатки выбрано оптимальное соотношение конструкций инструмента и заготовки, позволившее получить заданную форму вала.

Особенность выбранных конструкций заключается в конусной форме раскатываемой части заготовки, составляющей угол 30° к оси оправки, большого радиуса передней части ролика и наличия на нем калибрующей полки с углом 55° к оси оправки. Эти особенности позволяют выполнять раскатку без преждевременного касания раскатываемой заготовки с оправкой до момента непосредственной укладки конуса на поверхность оправки. Вследствие этого снижается усилие раскатки и предотвращается образование наплывов на заготовке, что важно для эксплуатации оборудования.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки 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 08.07.2014, уникальный идентификатор проекта прикладных научных исследований - RFMEFI60414X0091). Исследования проведены на базе центра коллективного пользования ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Литература

[1] O.A. Kaibyshev, F.Z. Utyashev, *Superplasticity: Microstructural Refinement and Superplastic Roll Forming. ISTC Science and Technology series* (Futurepast, Arlington, Virginia USA, 2005) Vol. 3.

[2] R.U. Sukhorukov, A.A. Sidorov, A.R. Ibragimov, F.Z. Utyashev // *Letters on materials* **5(2)** (2015) 175.

[3] F.Z. Utyashev, Sh.Kh. Mukhtarov, R.Yu. Sukhorukov // *Letters on materials* **5(2)** (2015) 215.

[4] M.I. Nagimov, S.K. Mukhtarov, F.Z. Utyashev, R.Y. Sukhorukov // *Letters on materials* **5(2)** (2015) 198.

[5] Q. Bai, J. Lin, J. Jiang, T.A. Dean, J. Zou, G. Tian // *Materials Science and Engineering: A* **621** (2015) 68.

NUMERICAL SIMULATION OF SUPERPLASTIC ROLL-FORMING OF A HOLLOW SHAFT OUT OF NICKEL-BASED SUPERALLOY

R.V.Shakhov[1], M.I. Nagimov[1], Sh.Kh. Mukhtarov[1*], F.Z. Utyashev[1], R.Yu. Sukhorukov[2], A.A. Sidorov[2]

[1] Institute for metals superplasticity problems of RAS, 39 St. Khalturin, Ufa, 450001, Russia

[2] Mechanical Engineering Research Institute of RAS, 4 M. Kharitonyevskiy Pereulok, Moscow, 101990, Russia

*e-mail: shamilm@imsp.ru

Abstract. Numerical simulations of superplastic roll-forming used for manufacturing of hollow shafts out of superalloys are carried out. Configurations of the workpiece and roller, mutual orientations of their rotation planes are varied. Various initial cone-shaped blanks with angles of 15° to 45° between the generatrix and axis, and initial positions of the roller are considered. As a result, an optimal design of the workpiece and tool, which allows one to obtain required shapes and dimensions of a shaft with a bearable deformation load on the existing roll forming

equipment are determined. Basing on this, an optimal shape of a blank with a cone angle of 30° is selected.

Keywords: numerical simulations; isothermal roll-forming; superplasticity; nickel base superalloy; hollow shaft.

References

[1] O.A. Kaibyshev, F.Z. Utyashev, *Superplasticity: Microstructural Refinement and Superplastic Roll Forming. ISTC Science and Technology series.* (Futurepast, Arlington, Virginia USA, 2005) Vol. 3.

[2] R.U. Sukhorukov, A.A. Sidorov, A.R. Ibragimov, F.Z. Utyashev // *Letters on materials* **5(2)** (2015) 175.

[3] F.Z. Utyashev, Sh.Kh. Mukhtarov, R.Yu. Sukhorukov // *Letters on materials* **5(2)** (2015) 215.

[4] M.I. Nagimov, S.K. Mukhtarov, F.Z. Utyashev, R.Y. Sukhorukov // *Letters on materials* **5(2)** (2015) 198.

[5] Q. Bai, J. Lin, J. Jiang, T.A. Dean, J. Zou, G. Tian // *Materials Science and Engineering: A* **621** (2015) 68.