

ВЛИЯНИЕ СЛОЖНОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РАСКАТКЕ НА ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПОЛЫХ ВАЛОВ ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ

Ф.З. Утяшев*, М.И. Нагимов, Ш.Х. Мухтаров

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

*e-mail: ufz1947@mail.ru

Аннотация. Изготовление полых валов для газотурбинных двигателей традиционными методами штамповки или прессования отличается высокой трудоемкостью и низким коэффициентом использования металла. Низкая технологичность этих методов обусловлена малой пластичностью и труднодеформируемостью жаропрочных сплавов, из которых изготавливаются эти детали, а также сложной формы последних. В настоящей работе показана возможность применения изотермической раскатки для повышения эффективности процесса изготовления таких деталей. Проведено компьютерное и физическое моделирование процесса раскатки вала. Продемонстрировано влияние сложного нагружения заготовки и её конфигурации на локализацию деформации и формообразование детали при раскатке. Определена рациональная форма заготовки и разработан метод её раскатки, обеспечивающие формирование заданной детали. Результаты исследования использованы в пробной квазизотермической раскатке натурного вала из высокохромистой стали ЭИ962-Ш с заданными формой, структурой и механическими свойствами.

Ключевые слова: моделирование; раскатка; изотермическая деформация; хромистая сталь; полый вал.

1. Введение

Конструкции полых валов для газотурбинных двигателей (ГТД) обычно сочетают комбинации цилиндрических и конических участков, отличающихся большой протяженностью внутренних полостей, тонкими стенками и малым углом наклона образующей конической поверхности к оси детали. Изготовление таких валов из малопластичных материалов такими методами, как прессование и штамповка, сопряжено с высокой трудоемкостью и низким коэффициентом использования металла (КИМ). Эти недостатки можно устранить, если воспользоваться возможностями процесса локального формоизменения - раскатки заготовки в изотермических или сверхпластических условиях. В работе [1] приведен пример изотермической раскатки вала из стали ЭП517-Ш с высоким значением КИМ. Однако вал в указанной работе имел сравнительно простую – цилиндрическую конструкцию и его раскатка осуществлялась на вращающейся оправке посредством двух приводных роликов, расположенных с противоположных сторон заготовки. Значительные трудности вызывает моделирование раскатки на оправке вала со сложной комбинированной формой одним¹ «свободно» вращающимся роликом. В этом случае заготовка одновременно подвергается

¹ На однороликовых станках упрощается задача обеспечения изотермических условий деформирования.

пластическому кручению, растяжению в направлении оси, уменьшению в радиальном направлении диаметра и по толщине стенки. Деформация при сложном нагружении становится немонотонной и нестационарной: оси тензора деформации поворачиваются во времени и пространстве. Эта особенность существенно усложняет возможность использования пакета прикладных программ «Deform 3D» для количественных расчетов напряженно-деформированного состояния материала при раскатке вала. Тем не менее, используя особенности процесса раскатки полого вала одним роликом в условиях сверхпластиности, изученные в [2], компьютерное моделирование в данной работе использовали для качественного анализа процесса формоизменения заготовки, заменив общую 3D задачу на осесимметричную 2D задачу. Дополнительно для подтверждения результатов компьютерного моделирования осуществили физическое моделирование. В результате исследований разработаны рациональная конструкция заготовки и метод её раскатки, которые были использованы при квазизотермической раскатке натурного вала ГТД.

2. Методика и материал исследования

Для компьютерного моделирования использовали пакет прикладных программ (ППП) «Deform-3D». Задачу решали в осесимметричной постановке. Температура деформации составляла 900°C, скорость вращения заготовки изменялась пределах 20-50 об/мин, скорость подачи ролика в осевом и радиальном направлениях изменялась в интервале 1-2 мм/мин. Механические свойства деформируемого материала подбирали из перечня материалов, заложенных в ППП «Deform 3D» и наиболее близких по механическим свойствам к стали 11Х11Н2В2МФ-Ш (ЭИ962-Ш), из которой изготавливают реальный вал.

Методика построения математических моделей с высокой степенью локализации пластической деформации при раскатке осесимметричных деталей представлена в работе [3]. В соответствии с этой методикой, математическая модель раскатки валов из труднодеформируемых сплавов в условиях изотермической, в том числе сверхпластической [4] деформации на основе метода конечных элементов в программной среде DEFORM включала следующие этапы:

- построение конечно-элементной модели заготовки;
- определение граничных условий конечно-элементной модели заготовки, в частности, характера ее взаимодействия с инструментом, с помощью гибридной модели трения, сочетающей в себе закон трения Амантона-Кулона и закон трения Зибеля;
- определение закона движения инструмента в модели - угловой скорости вращения заготовки вместе с оправкой и линейной скорости движения ролика;
- построение реологической модели материала заготовки при температуре деформации.

В силу того, что изотермическая раскатка валов является медленно протекающим процессом, массовыми и инерционными силами, действующими на заготовку, пренебрегли и при определении напряженно-деформированного состояния и характера течения металла в процессе раскатки использовали следующие уравнения и соотношения, имеющиеся в программном комплексе DEFORM:

- дифференциальные уравнения равновесия, связывающие компоненты тензора напряжений, определяющего напряженное состояние тела;
- кинематические уравнения, связывающие компоненты тензора скоростей деформаций и скоростей материальных точек тела;
- уравнения пластического течения Леви-Мизеса, связывающие напряженное и деформированное состояние тела;
- условия несжимаемости и пластичности Мизеса.

Решение системы уравнений осуществляли посредством функционала Маркова, представляющего собой разность мощности пластической деформации и мощности внешних сил, приложенных к объекту, принимающего минимальное значение на истинном поле скоростей.

Физическое моделирование процесса раскатки вала осуществляли на токарном станке в масштабе 1:2. На резцодержателе станка установили свободно вращающийся ролик, в шпинделе - оправку, а на пиноли задней бабки - прижим. Заготовки изготавливали из сплава Вуда. Сначала отливали слитки, затем их осаживали на гидравлическом прессе со степенью деформации 70-75% при комнатной температуре. Для сплава Вуда комнатная температура является температурой горячей деформации, в ходе которой проходит динамическая рекристаллизации и формируется однородная структура. После осадки заготовки механически обрабатали до необходимых размеров.

Раскатку натурного вала, эскиз которого показан на Рис. 1, осуществляли в условиях квазизотермической деформации на оправке, установленной в шпинделе давильного станка PNC 600, посредством одного ролика. Инструмент и заготовку нагревали с помощью газовых горелок. Контроль температуры осуществляли высокоточным цифровым пиromетром. В качестве исходной заготовки использовали диск диаметром 250 мм и толщиной 20 мм, который вырезали из листового проката хромистой стали.

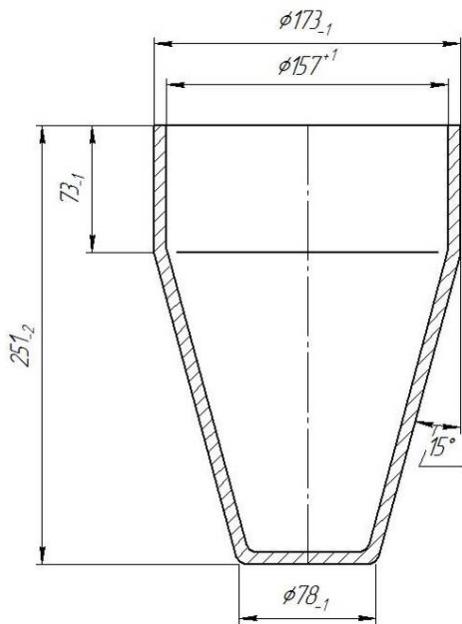


Рис. 1. Эскиз детали, используемой для изготовления полого вала ГТД.

3. Результаты моделирования

Компьютерный расчет. На Рис. 2 приведены результаты компьютерного моделирования различных вариантов процесса формообразования детали, отличающихся формой заготовки, исходным расположением ролика и траекторией его перемещения.

Видно, что в первом варианте произошла локализация деформации в зоне перехода от торцевой поверхности заготовки к конической поверхности.

Во втором варианте предполагалось осуществить раскатку за два прохода: сначала получить деталь с углом конуса, равным 45° , а затем, на втором проходе - деталь с необходимыми размерами и углом конусности, близким к 30° . Однако уже на первом проходе в переходной зоне возникло утонение заготовки.

В третьем варианте при раскатке осуществляли принудительное охлаждение места зажима заготовки. Давильный станок PNC 600 позволяет реализовать такое охлаждение на 100-150°C с помощью воздуха, проходящего через каналы, выполненные в полости прижима. Это позволяет повысить сопротивление деформации материала в этой части и, соответственно, устойчивость к потере формы. Однако, как показал расчет, и в этом случае происходит локализация деформации и недопустимое утонение стенки заготовки.

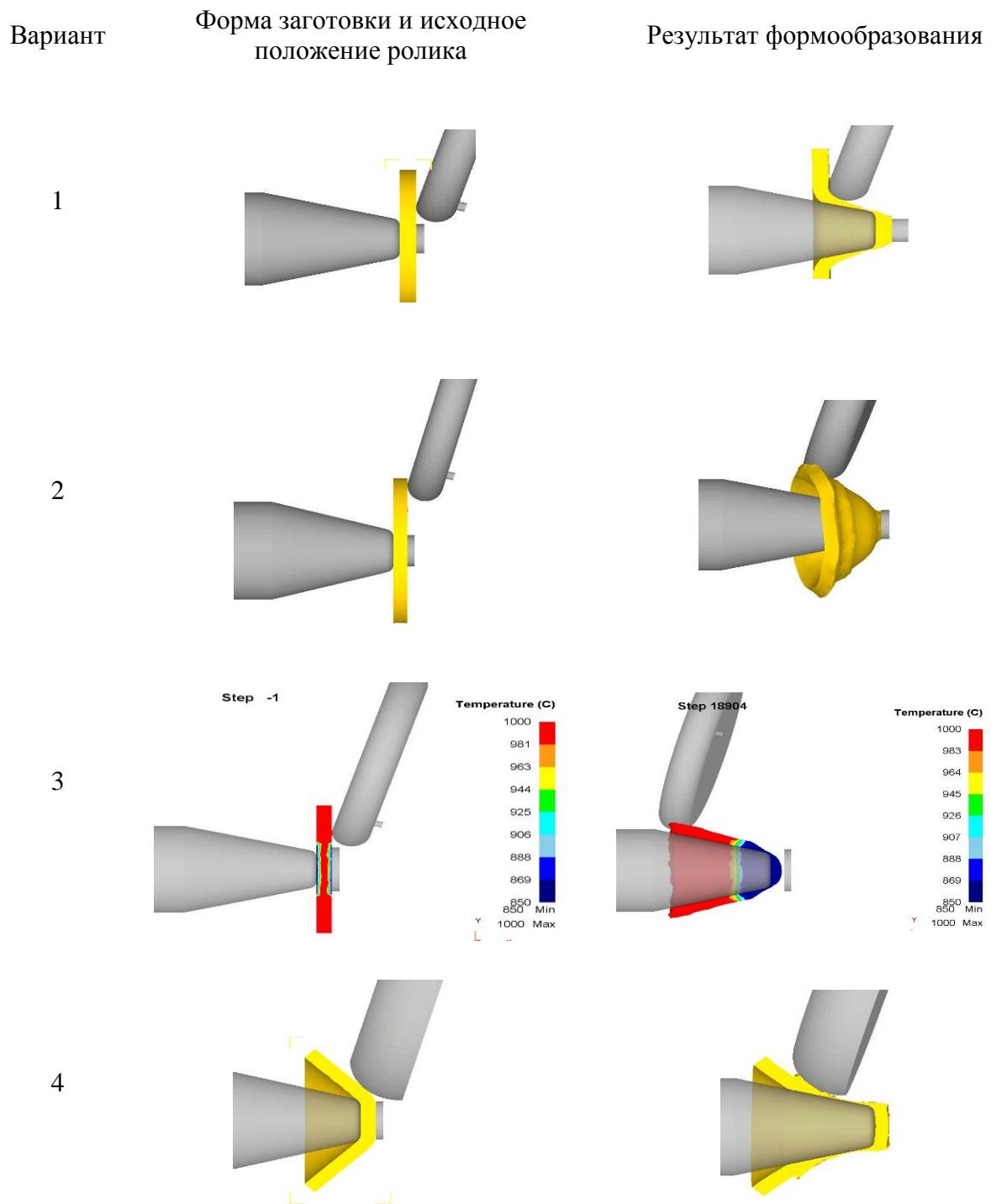


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования: 1 и 3 варианты отличаются утонением заготовки в переходной зоне, в варианте 2 произошло гофрообразование, в варианте 4 - утонение заготовки наблюдается в зоне конического участка.

В четвертом варианте в качестве исходной заготовки была взята коническая чашка с углом, равным 45° . В этом случае попытка раскатать вал за один проход также привела к недопустимому утонению стенки заготовки. В тех же условиях раскатка заготовки за несколько проходов с последовательным уменьшением угла конусности привела к положительному результату. Зона локализации переместилась с критического переходного участка на конический участок, при этом уменьшилась степень утонения стенки. Таким образом, моделирование показало, что необходимо изменить форму, геометрические размеры заготовки и увеличить число проходов. Уточнить такие изменения целесообразно, используя не качественное компьютерное моделирование, а экспериментальное исследование, то есть физическое моделирование.

Физический эксперимент. Для изготовления заготовки в виде чашки (Рис. 3) использовали универсальный динамометр INSTRON 5982, штамповую оснастку и исходную предзаготовку в виде диска. Ручей матрицы штампа (Рис. 3 б) имел две конические поверхности с углами конуса 45° и 15° . В качестве пуансона при штамповке заготовки использовали оправку для раскатки. В результате штамповки была изготовлена заготовка, показанная на Рис. 3 в. Часть с малым конусом обеспечивала при раскатке плотный контакт с оправкой. Часть с большим конусом раскатывали до получения вала с заданными размерами.



Рис. 3. Изготовление модельной заготовки из сплава Вуда: штамповка заготовки (а); оснастка для штамповки (б); осевой разрез заготовки (в).

На Рис. 4 показаны фрагменты физического эксперимента – раскатки детали на токарном станке, а также внешний вид детали и её разрез в осевой плоскости.

Раскатку выполнили за 3 прохода, в ходе которых последовательно уменьшали угол конусности. Завершающий проход произвели с обеспечением контакта заготовки с оправкой в зоне воздействия ролика. В результате раскатки получили деталь с необходимыми размерами, имеющую одинаковую толщину по всему сечению.

Результаты моделирования послужили основой для разработки технологического процесса раскатки натурного вала из сплава ЭИ962-Ш в условиях, близких к изотермическим. Внешний вид натурного вала показан на Рис. 5.

После стандартной термообработки были проведены структурные исследования и механические испытания образцов, вырезанных из натурного вала. Результаты исследований [5-9] соответствовали требованиям технических условий на это изделие.

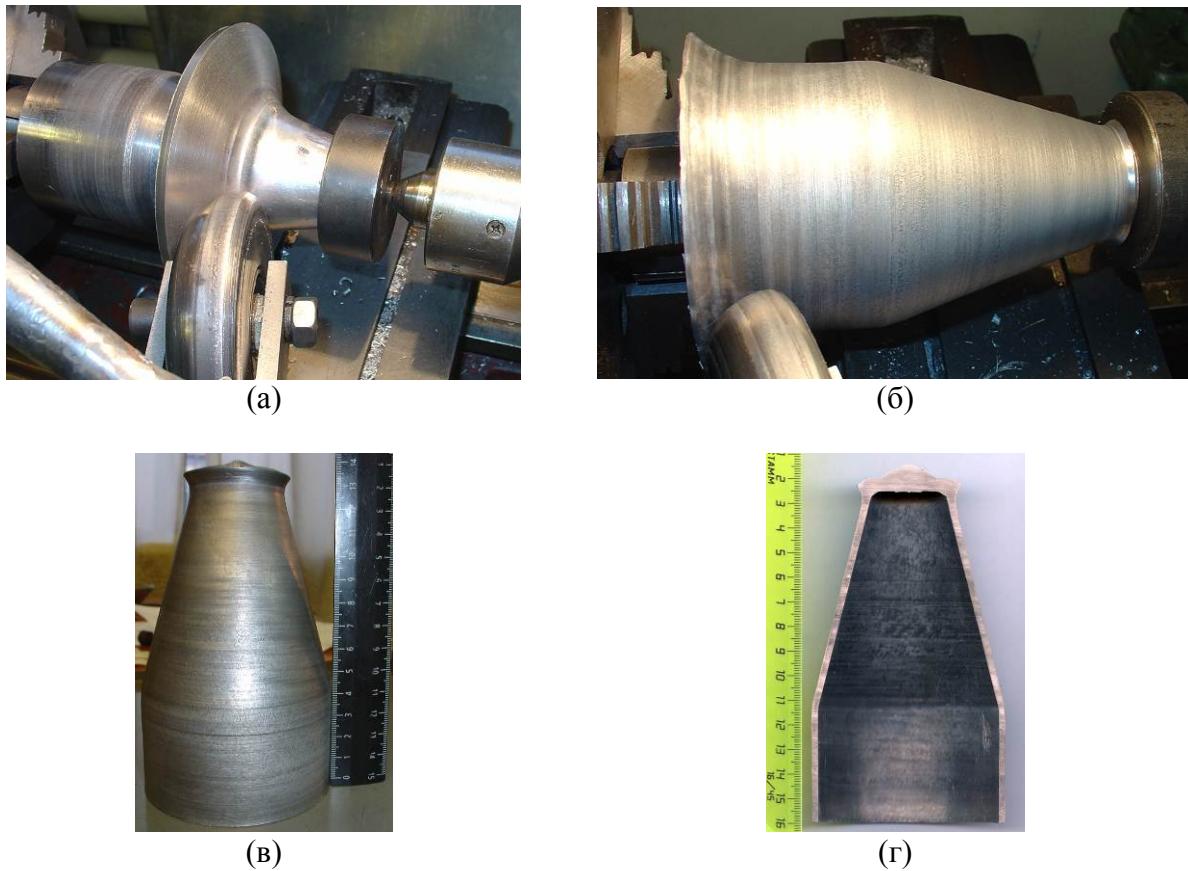


Рис. 4. Раскатка комбинированной детали на токарном станке (а, б), внешний вид детали (в) и её разреза в осевом сечении (г).



Рис. 5. Внешний вид раскатанного натурного вала из хромистой стали ЭИ962-Ш.

5. Обсуждение результатов

Периодическое сложное нагружение заготовки, создаваемое при раскатке переменными деформирующими силами и моментами кручения, приводит к немонотонному процессу деформирования [1]. В этом случае деформированное состояние материальной точки определяется суммой симметричного тензора деформации и кососимметричного тензора поворота - двух составляющих тензора дисторсии. Оба тензора влияют на формоизменение заготовки: первый тензор непосредственно, а второй - косвенно, неравномерно поворачивая главные оси тензоров деформации в разных точках очага

деформации. К неоднородному напряженно-деформированному состоянию (НДС) материала приводит также периодическое локальное воздействие ролика на одни и те же участки заготовки. По этим причинам расчет НДС посредством программы «Deform 3D», основанной на гипотезе пропорциональности и соосности тензоров напряжений и деформации, не применимой по отношению к тензорам дисторсии и напряжений, не способен корректно в трехмерной постановке определить распределение напряжений и деформаций в её очаге. В то же время, если воспользоваться теоремой о циркуляции касательных напряжений при кручении [10], то, как показано в работе [2], процесс раскатки можно свести к постановке двухмерной задачи раскатки и получить качественный результат, описывающий формоизменение заготовки.

Выполненное в такой постановке моделирование позволило в настоящей работе определить принципиальную форму заготовки для раскатки и разработать «безоправочный» метод её формоизменения на предварительных проходах. Физическое моделирование подтвердило результаты компьютерного моделирования, позволило уточнить форму и размеры заготовки, а также число необходимых проходов.

Благоприятное влияние чашечной формы заготовки и безоправочных проходов ролика на формообразование вала обусловлено уменьшением сил и моментов деформации, приводящих к потере устойчивости заготовки. Пластическое кручение заготовки в очаге деформации снижает значение силы, необходимой для осевой вытяжки материала вдоль оправки материала. Причина этого связана с тем, что кручение переводит материал в пластическое состояние, активизируя работу источников дислокаций, и для их скольжения в необходимом направлении требуется меньшие напряжения, чем в случае, когда вытяжку осуществляют без кручения [1].

Силу деформации, возникающую вследствие давления ролика на заготовку, можно представить векторной суммой трех ортогональных составляющих: тангенциальной (окружной) силы F_t , приводящей к пластическому кручению заготовки, силы, параллельной оси заготовки F_o , обеспечивающей соответствующее смещение материала заготовки, и радиальной силы F_r , нормальной к оси заготовки и приводящей к уменьшению диаметра заготовки. В случае выполнения прохода ролика с использованием поверхности оправки, сила F_r и её реакция со стороны оправки, а также осевая сила приводят к утонению стенки раскатываемого вала, а трение на поверхности оправки приводит к увеличению сил, приводящих к потере устойчивости. При безоправочных проходах ролика трение отсутствует, и вследствие этого уменьшаются силы и моменты деформации, а также исчезает сила реакции оправки, участвующая в нежелательном утонении стенки заготовки, что приводит к повышению устойчивости заготовки. При завершающем проходе ролика с участием оправки, хотя и трение на её поверхности приводит к повышению сил, моментов и напряжений в материале, в целом величина этих нагрузок снижается, поскольку к этому моменту значительно уменьшается радиус заготовки и величина смещаемого роликом объема заготовки.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают целесообразность использования на предварительных этапах изотермической раскатки полых валов безоправочной многопроходной раскатки заготовки, не приводящей к потере устойчивости формы в нераскатанной части заготовки и утонению её стенки в раскатанной части.

6. Выводы

Показана возможность совместного использования компьютерного и физического моделирования для разработки технологического процесса изготовления

комбинированной сложнопрофильной детали, используемой для изготовления полого вала газотурбинного двигателя. С учетом сложности формы и низкой технологичности материала детали, а также необходимости экономии дорогостоящего материала, то есть требования снижения отходов и трудоемкости, продемонстрирована важность выбора рациональной формы исходной заготовки и многопроходного изотермического режима раскатки. Существенное значение при раскатке тонкостенных деталей из толстостенной листовой заготовки имеют предварительные безоправочные проходы, обеспечивающие необходимое уменьшение угла конусности детали и предотвращающие утонение её стенки.

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).

Литература

- [1] О.А. Kaibyshev, F.Z. Utyashev, *Superplasticity: Microstructural Refinement and Superplastic Roll Forming. ISTC Science and Technology series* (Futurepast, Arlington, Virginia USA, 2005), Vol. 3.
- [2] F.Z. Utyashev, R.Yu. Sukhorukov, G.V. Samarukov, M.I. Nagimov // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* **45**(1) (2016) 65.
- [3] Р.Ю. Сухоруков, А.А. Сидоров, Ф.З. Утяшев, А.Р. Ибрагимов // *Проблемы машиностроения и автоматизации* **1** (2015) 116.
- [4] В.А. Валитов, Р.Р. Мулюков, А.А. Назаров, Р.Ю. Сухоруков, Ф.З. Утяшев // *Проблемы машиностроения и автоматизации* **3** (2013) 51.
- [5] М.И. Нагимов, Ш.Х. Мухтаров, Г.И. Рааб, Р.Ю. Сухоруков, Ф.З. Утяшев // *Проблемы машиностроения и надежности машин* **46**(6) (2017) 91.
- [6] Ш.Х. Мухтаров, М.И. Нагимов, А.А. Закирова, П.А. Классман, Ф.З. Утяшев // *Перспективные материалы* **15** (2013) 92.
- [7] Sh. Mukhtarov, A. Ganeev, M. Nagimov, R. Shakhov, V. Valitov, F. Utyashev // *Key Engineering Materials* **746** (2017) 69. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.746.69.
- [8] R.Yu. Sukhorukov, A.A. Sidorov, A.I. Alimov, M.I. Nagimov, F.Z. Utyashev // *Advanced Materials & Technologies* **1** (2016) 9.
- [9] R.Yu. Sukhorukov, A.A. Sidorov, A.I. Alimov, M.I. Nagimov, Sh.Kh. Mukhtarov, F.Z. Utyashev // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* **45**(6) (2016) 538.
- [10] Л.М. Качанов, *Основы теории пластичности* (Наука, М., 1969).

EFFECT OF COMPLEX LOADING DURING ISOTHERMAL ROLL-FORMING ON FORMING OF HOLLOW SHAFTS OUT OF HARD-TO-DEFORM ALLOYS

F.Z. Utyashev*, M.I. Nagimov, Sh.Kh. Mukhtarov

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

*e-mail: ufz1947@mail.ru

Abstract. Fabrication of hollow shafts for gas turbine engines by traditional methods such as forging or pressing is characterized by high labor intensity and a low metal utilization ratio. Low technological effectiveness of these methods is caused by the low plasticity and workability of high-temperature alloys, of which the shafts are fabricated and their complex shapes as well. In the present work, the possibility of using isothermal roll-forming to enhance the efficiency of the manufacturing process of such parts is demonstrated. Computer and physics modeling of the shaft roll-forming process is carried out. The effect of complex loading of a billet and its configuration on strain localization and forming of an article during roll-forming are demonstrated. The rational form of a billet is determined and method of its roll-forming is developed that allows for forming a given article. The results of the study are used for quasiisothermal roll-forming of a real hollow shaft out of chromium steel EI962-Sh with given shape, a homogeneous structure and high level of mechanical properties.

Keywords: simulations; roll-forming; isothermal deformation; chromium steel; 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] F.Z. Utyashev, R.Yu. Sukhorukov, G.V. Samarukov, M.I. Nagimov // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* **45(1)** (2016) 65.
- [3] R.Yu. Sukhorukov, A.A. Sidorov, F.Z. Utyashev, A.R. Ibragimov // *Problems of mechanical engineering and automation* **1** (2015) 116. (in Russian).
- [4] V.A. Valitov, R.R. Mulyukov, A.A. Nazarov, R.Yu. Sukhorukov, F.Z. Utyashev // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* **3** (2013) 51. (in Russian).
- [5] M.I. Nagimov, Sh.Kh. Mukhtarov, G.I. Raab, R.Yu. Sukhorukov, F.Z. Utyashev // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* **6** (2017) 91. (in Russian).
- [6] Sh.Kh. Mukhtarov, M.I. Nagimov, A.A. Zakirova, P.A. Klassman, F.Z. Utyashev // *Advanced materials* **15** (2013) 92. (in Russian).
- [7] Sh. Mukhtarov, A. Ganeev, M. Nagimov, R. Shakhov, V. Valitov, F. Utyashev // *Key Engineering Materials* **746** (2017) 69. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.746.69.
- [8] R.Yu. Sukhorukov, A.A. Sidorov, A.I. Alimov, M.I. Nagimov, F.Z. Utyashev // *Advanced Materials & Technologies* **1** (2016) 9.
- [9] R.Yu. Sukhorukov, A.A. Sidorov, A.I. Alimov, M.I. Nagimov, Sh.Kh. Mukhtarov, F.Z. Utyashev // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* **45(6)** (2016) 538.
- [10] L.M. Kachanov, *Fundamentals of the plasticity theory* (Science, Moscow, 1969). (in Russian).