

PACS: 61.46.–w

Ф.З. Утяшев, Г.В. Самаруков

ОСОБЕННОСТИ РАСКАТКИ ПОЛЫХ ВАЛОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2015 года

Рассмотрены особенности раскатки полых валов из жаропрочных никелевых сплавов в условиях сверхпластичности. Отмечены трудности применения высокопроизводительной многороликовой раскатки, обусловленные особенностями деформации этих сплавов в условиях сверхпластической деформации (СПД). Приведена апробированная на практике схема раскатки полых валов на оправке посредством одного ролика. Показано, что для формообразования вала по такой схеме необходимо, чтобы под воздействием инструмента возникал расширенный очаг деформации, охватывающий поперечное сечение заготовки. Выполнена оценка необходимого для формообразования вала размера роликового инструмента и очага деформации кручением. Обоснована возможность использования осесимметричной постановки объемной деформации для анализа напряженно-деформированного состояния материала при раскатке вала на цилиндрической оправке под воздействием одного ролика.

Ключевые слова: сверхпластичность, жаропрочные никелевые сплавы, раскатка, полые валы, напряженно-деформированное состояние

Розглянуто особливості розкочування порожнистих валів із жароміцних нікелевих сплавів в умовах надпластичності. Відзначено труднощі застосування високопродуктивного багатороликового розкочування, які зумовлені особливостями деформації цих сплавів в умовах надпластичної деформації (НПД). Наведено апробовану на практиці схему розкочування порожнистих валів на оправці за допомогою одного ролика. Показано, що для формоутворення вала за такою схемою необхідно, щоб під впливом інструменту виникав поширений осередок деформації, що охоплює поперечний переріз заготовки. Виконано оцінку необхідного для формоутворення вала розміру роликового інструменту й осередку деформації крученням. Обґрунтовано можливість використання осесиметричної постановки об'ємної деформації для аналізу напружено-деформованого стану матеріалу при розкочуванні вала на циліндричній оправці під впливом одного ролика.

Ключові слова: надпластичність, жароміцні нікелеві сплави, розкочування, порожні вали, напружено-деформований стан

Введение

В современных конструкциях ротора газотурбинных двигателей используют полые валы, диски и другие осесимметричные детали ответственного назначения, изготавливаемые из жаропрочных никелевых сплавов. Ввиду малой пластичности, труднодеформируемости и узкого температурного интервала горячей деформации производство таких деталей из этих сплавов отличается высокой трудоемкостью и низким коэффициентом использования металла.

Технологичность жаропрочных никелевых сплавов при изготовлении деталей газотурбинных двигателей можно существенно повысить, если использовать метод раскатки в условиях СПД. В отличие от штамповки в тех же условиях в случае раскатки значительно снижается мощность оборудования и расходы на изготовление инструмента. В сравнении с обычными методами горячей деформации раскатка при СПД обеспечивает повышенные свойства и значительную экономию материала за счет 3–5-кратного повышения коэффициента использования металла [1]. Вместе с тем при такой обработке материала усложняется процесс формообразования в сравнении со штамповкой или выдавливанием. При объемных методах деформирования заготовка принимает форму полости ручья штампа. При раскатке в условиях СПД возникает расширенный очаг деформации. Большое значение для разработки технологического процесса раскатки в этом случае имеет определение поверхности контакта сложнопрофильного инструмента – ролика с заготовкой. Пример решения такой задачи в отношении раскатки дисков газотурбинных двигателей с использованием различных математических методов был рассмотрен в работе [2].

Не менее важна также и оценка размеров очага деформации в целом, включая зону, внеконтактную с инструментом в каждый момент раскатки. В эту зону входят участок, необходимый для формообразования детали, и нежелательный участок, возникающий в ее раскатанной части. Рекомендации по ужесточению нежелательного участка, в котором происходит нерегламентированное изменение уже сформированных размеров детали, рассмотрены в работах [3,4]. В фокусе данной статьи – оценка размера внеконтактного участка очага деформации, который, в принципе, необходим для обеспечения раскатки цилиндрического вала на оправке посредством одного ролика. Использование более производительной многороликовой раскатки в условиях СПД жаропрочных сплавов связано с преодолением значительных конструктивных трудностей при создании стана, способного обеспечить изотермические условия деформирования заготовки и вместе с тем перемещения роликового инструмента в высокотемпературной рабочей камере [3], необходимые для формообразования детали.

1. Схема раскатки вала и природа очага деформации

Схема раскатки, по которой на практике изготавливали валы, показана на рис. 1, где толстостенная трубная заготовка *1* установлена на вращающейся

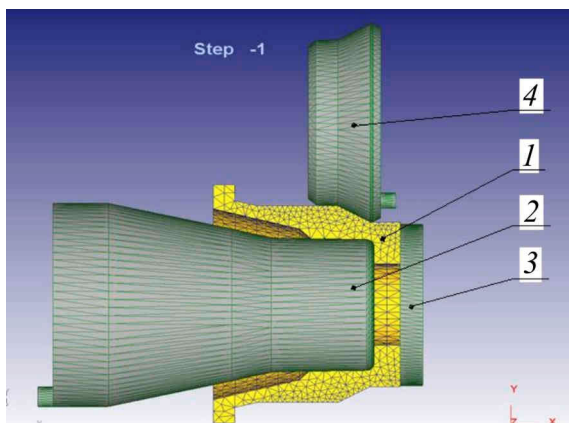


Рис. 1. Схема раскатки: 1 – заготовка, 2 – оправка, 3 – прижим, 4 – ролик

оправке 2 и для передачи момента вращения плотно прижата к ней пинолью 3. Формоизменение заготовки происходит под воздействием ролика 4, при этом уменьшаются наружный диаметр и толщина стенки заготовки, а ее осевой размер увеличивается. В зависимости от размеров заготовки и детали раскатку производят за один или несколько проходов. Необходимую толщину стенки деталь приобретает на завершающем проходе в соответствии с расстоянием, которое задается между рабочими поверхностями ролика и оправки. Процесс раскатки осуществляется в изолированной рабочей камере (на рисунке камера не показана), обеспечивающей нагрев инструмента и заготовки, а также поддержание оптимальной температуры СПД.

Природа очага деформации. Под воздействием инструмента (ролика и оправки) в заготовке возникает пластическая зона – очаг деформации, ограниченный некоторой поверхностью. Под этой поверхностью в теории пластичности понимается поверхность нагружения [5], известная также как поверхность текучести или пластичности. Во всех случаях это выпуклая непрерывная поверхность, разделяющая твердое тело на две области, одна из которых находится в пластическом состоянии (с вогнутой стороны поверхности), другая – в упругом состоянии (с выпуклой стороны поверхности). На самой поверхности очага деформации возникают разрывы касательных напряжений и скоростей деформации. Существование такой поверхности вытекает из фундаментального закона сохранения энергии при пластической деформации, который согласно [5] имеет вид

$$\iint_S X_{ni} v_i dS = \iiint_V \sigma_{ij} \xi_{ij} dV + \iint_{S_{br}} \tau [v] dS, \quad (1)$$

где X_{ni} – проекции силы инструмента F , действующей на внешнюю поверхность тела по осям координат; v_i – составляющие по осям координат скорости деформирования; σ_{ij} и ξ_{ij} – соответственно поля напряжений и скоростей деформации материальных точек, действующие в объеме тела; τ – касательное напряжение сдвига на поверхности разрыва; $[v]$ – разность (градиент, скачок) тангенциальных скоростей по обе стороны поверхности разрыва; S_{br} – площадь поверхности разрыва.

В уравнении (1) слева от знака равенства стоит мощность от внешних сил. Первое слагаемое справа от знака равенства учитывает мощность, потраченную на формоизменение тела, второе слагаемое – мощность, развиваемую касательными к поверхностям разрыва напряжениями, которые приводят к сдвигу по ним одних частей материала по отношению к другим со скоростью $[v] = v_{\max} - v_{\min}$. Граница очага деформации представляет собой поверхность разрыва напряжений, на которой возникает градиент касательных напряжений, такой, что внутренняя область очага находится в пластическом состоянии, а за пределами границы во внешней области – в упругом состоянии. Собственно на границе касательные напряжения отвечают условию Треска–Сен-Венана или Губера–Мизеса. В первом случае касательное напряжение приравнивается к напряжению сдвига, а во втором – оно примерно в 1.1 раза больше напряжения сдвига, что связано с учетом действия в очаге деформации разнонаправленных касательных напряжений. В результате на внутренней границе очага возникают сдвиг и поворот пластической области относительно упругой области.

2. Форма и размеры очага деформации

Для точного определения формы и размеров очага деформации при раскатке на оправке полого вала посредством одного ролика необходимо решить объемную несимметричную краевую задачу расчета напряженно-деформированного состояния материала. Эту задачу надо связать с задачей определения температурного поля в заготовке, учитывающей деформационный разогрев материала. При этом важно использовать физическое уравнение связи между напряжениями и деформацией в случае сложного нагружения материала, возникающего при раскатке, и корректные граничные условия.

Постановка и решение такой задачи остается предметом исследований теории обработки материалов давлением. Поэтому здесь ограничимся качественной оценкой формы и размеров очага деформации, т.е. оценкой в первом приближении.

В отношении размеров очага деформации, поперечных к оси симметрии заготовки, можно утверждать, что они должны простираться от наружной поверхности трубной заготовки до ее внутренней поверхности, т.е. охватывать все поперечное сечение заготовки не только в зоне непосредственного воздействия ролика на заготовку, но и по всей окружности. Если же очаг деформации в каждый момент времени будет заканчиваться внутри тела заготовки (т.е. не будет доходить до внутренней поверхности трубы или доходить до нее, но не по всей окружности, а в пределах некоторого сектора $\alpha < 2\pi$), то процесс раскатки вала осуществляться не будет. В этом случае вытесняемый при внедрении ролика в заготовку объем материала будет образовывать наплыв (гребень) вокруг контура ролика, значительная часть материала в поперечном сечении останется в упругом состоянии, что не позволит перемещаться торцу заготовки в сторону ее вытяжки.

Очевидно, что силами, способными создать необходимый объемный очаг деформации, может быть только пара равных и противоположных по направлению моментов сил кручения. Один из этих моментов создается силами трения, действующими на поверхности контакта заготовки с оправкой, другой момент – роликом. Расчет любого из этих моментов проблематичен ввиду необходимости вычисления действительных значений площади контакта инструмента с заготовкой, выявления закона распределения давления на этих площадках, определения коэффициента поверхностного трения и, вообще говоря, установления закона трения, учитывающего особенности раскатки в условиях СПД.

Для определения момента сил воспользуемся теоремой Бредта о циркуляции касательных напряжений кручения при постоянном значении модуля сдвига [5], что отвечает стационарным условиям СПД, при которых наблюдается постоянство напряжения течения. Запишем момент кручения, создаваемый касательными напряжениями, в виде

$$M = \tau_c V, \quad (2)$$

где V – объем очага деформации; τ_c – касательные напряжения кручения, отвечающие условию Треска–Сен-Венана, т.е. равные напряжению сдвига материала.

Возникновение момента кручения в результате циркуляции касательных напряжений кручения следует также из уравнения Стокса

$$\oint_L \tau_c dl = \iint (\operatorname{rot} \sigma_e)_n dS, \quad (3)$$

где dl и L – соответственно дифференциал и длина окружности поперечного сечения заготовки; σ_e – интенсивность напряжений в очаге деформации; ds и S – соответственно дифференциал и площадь поперечного кольцевого сечения, ограниченная окружностью L ; n – нормаль к поперечной поверхности S .

В двойном интеграле под знаком ротора приведен вектор погонной силы, имеющей размерность $[N/m]$, произведение этого вектора на площадь дает размерность момента сил $[N/m \cdot m^2 = N \cdot m]$.

Запишем далее условие перехода поперечного сечения трубной заготовки в пластическое состояние при кручении по отношению к моменту внешних сил:

$$\tau_c = \frac{M}{W_p}, \quad (4)$$

где M – момент кручения от внешних сил, W_p – полярный момент сопротивления кручению трубы.

Из равенства внешнего и внутреннего моментов получим равенство между полярным моментом сопротивления кручению и объемом очага деформации в поперечном сечении заготовки: $V = W$.

Внутренние поверхности очага деформации, как уже отмечалось, должны быть выпуклыми. Поскольку в нашем случае они натянуты на внешнюю и внутреннюю окружности заготовки, диаметры которых одного порядка, без значительной погрешности можно принять эти поверхности плоскими и параллельными друг другу, расположенными на расстоянии l в направлении оси заготовки. Тогда объем очага определится уравнением

$$V = \frac{\pi}{4} (d_{\text{ext}}^2 - d_{\text{in}}^2) l, \quad (5)$$

где d_{ext} и d_{in} – соответственно наружный и внутренний диаметры очага деформации.

Полярный момент сопротивления трубной заготовки равен

$$W = \frac{\pi}{16} (d_{\text{ext}}^3 - d_{\text{in}}^3). \quad (6)$$

Отсюда

$$l = \frac{1}{4} \frac{d_{\text{ext}}^3 - d_{\text{in}}^3}{d_{\text{ext}}^2 - d_{\text{in}}^2}. \quad (7)$$

Выразив $d_{\text{ext}} = k d_{\text{in}}$ (где k – коэффициент пропорциональности), при варьировании $k = 1.2\text{--}2$ получим

$$l = \frac{1}{4} \frac{d_{\text{in}} (k^3 - 1)}{(k^2 - 1)} = (0.4 - 0.6) d_{\text{in}}. \quad (8)$$

Данную оценку следует рассматривать как минимальный осевой размер очага деформации, необходимый для раскатки, исходя из которого требуется проектировать осевой размер ролика (ширину) в зоне его внедрения в трубную заготовку. Рекомендации по иным размерам инструмента приводятся в работе [6]. Полученные результаты анализа оценки формы и размера очага деформации при раскатке полого вала на оправке посредством одного ролика позволяют использовать известный пакет Deform 3D для решения задач по определению напряженно-деформированного состояния. Демонстрационный пример такого решения представлен на рис. 2. Видно, что при ширине ролика, близкой к радиусу заготовки, очаг приводит к созданию сквозного очага деформации в заготовке.

3. Обсуждение результатов

Обычно при холодной раскатке или ротационной вытяжке полых валов из сталей используют трехроликовый инструмент, воздействующий на заготовку так, что локальные очаги деформации располагаются примерно через 120° по окружности заготовки. Это позволяет уравновесить силы деформации и создать непрерывный очаг кручения, необходимый для формоизменения заготовки [7]. Для раскатки валов из современных жаропрочных никелевых сплавов в условиях СПД применение многороликового инструмента

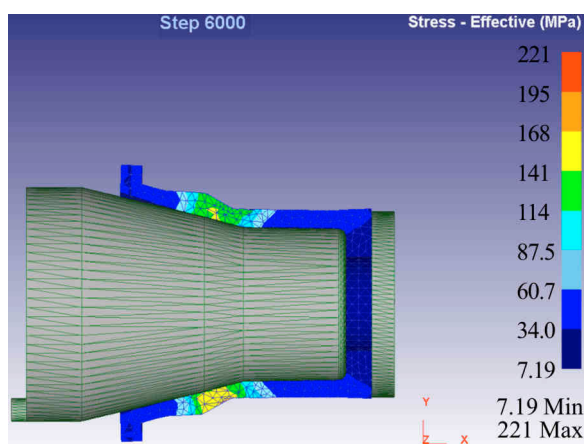


Рис. 2. Пример распределения напряжения в очаге деформации при раскатке вала из жаропрочного сплава ЭК79 в условиях СПД

значительно усложняет конструкцию соответствующего оборудования. Поэтому в данной работе показано, что при СПД возможна раскатка вала на оправке посредством одного ролика. Однако при этом очевидно, что размеры очага деформации будут меньше, чем при многороликовой раскатке. Если же деформация будет локализована исключительно в области воздействия ролика на заготовку, формообразование вала не произойдет. Для раскатки необходим объемный очаг деформации, распространяющийся на все поперечное сечение заготовки, находящееся под роликом. Возникает вопрос: в силу каких причин и при каких условиях появляется такой очаг?

В каждый момент времени ролик непосредственно воздействует на заготовку в локальной области. Представляется, что в момент контакта с роликом напряжения в этой области обеспечивают пластическое течение материала, но они быстро снижаются практически до нуля после ухода этой области от ролика, поскольку при СПД не происходит накопление дислокаций, а скорость деформации относительно мала. Кроме того, повторное воздействие ролика на участок, близкий к продеформированному, которое могло бы инициировать возникновение деформирующих напряжений, происходит через промежутки времени, близкие к периоду вращения заготовки. Это время на порядки больше времени контакта локальных участков с роликом и времени релаксации напряжений при СПД. Тем не менее раскатка полого вала на оправке одним роликом в условиях СПД происходит. Объяснить раскатку можно было бы последовательно выполняемым локальным изгибом заготовки, приводящим к удлинению волокон заготовки под роликом, но для этого необходим большой зазор между заготовкой и оправкой, которого нет. Причины реализации раскатки вала на оправке одним роликом в условиях СПД связаны с особенностями этой деформации.

При СПД основным ее механизмом является скооперированное зернограничное проскальзывание. Множество мелких зерен и чрезвычайно развитая сетка границ между ними, как показано в работе [8], обеспечивают развитие таких сдвигов в направлении, которое задается используемой схемой деформирования. Поскольку вектор Бюргера у зернограничных дислокаций

значительно меньше, чем у решеточных дислокаций, и поскольку скорость перемещения зернограницных дислокаций кинетически соответствует скорости деформации, то пластическое течение при СПД осуществляется без упрочнения, а возникающий очаг деформации приобретает заметно большие размеры, чем при обычной горячей деформации крупнозернистого материала. Этому способствует также то, что пороговое напряжение, необходимое для начала пластического течения при СПД, существенно меньше, чем при обычной деформации, и поведение материала во многом подобно поведению вязкой жидкости. Отмеченные особенности СПД, а также постоянство модуля сдвига при такой деформации обеспечивают циркуляцию касательных напряжений кручения при раскатке полых валов на цилиндрической оправке посредством одного ролика при определенном размере очага деформации в направлении раскатки и соответственно размеру рабочей поверхности ролика.

Выводы

1. Показано, что при раскатке полого цилиндрического вала на оправке посредством одного ролика в условиях СПД возникает объемный очаг деформации кручением, что позволяет существенно упростить постановку общей трехмерной задачи расчета напряженно-деформированного состояния, заменив ее осесимметричной трехмерной задачей.

2. Определены размеры очага деформации и инструмента в зависимости от поперечных размеров заготовки при раскатке в условиях СПД полых валов на оправке посредством одного ролика.

1. *O.A. Kaibyshev, F.Z. Utyashev*, Superplasticity: Microstructural Refinement and Superplastic Roll Forming, Futurepast, Arlington, VA22201 USA (2005).
2. *В.А. Плехов, В.Г. Рыжков, Ф.З. Утяшев, Э.А. Гумеров, А.И. Пиеничнюк, В.В. Дмитриев*, Авиационная промышленность № 6, 19 (1990).
3. *О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев*, Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов, Наука, Москва (2002).
4. *Пат. 2119842* Российская федерация, МПК В 21 К 1/32, С 22 F 1/10. Способ изготовления осесимметричных деталей и способ изготовления заготовок из многофазных сплавов (варианты), Утяшев Ф.З., Кайбышев О.А., Валитов В.А.
5. *Л.М. Качанов*, Основы теории пластичности, Наука, Москва (1969).
6. *М.А. Гредитор*, Давильные работы и ротационное выдавливание, Машиностроение, Москва (1971).
7. *А.С. Чумадин*, КШП ОМД № 2, 7 (2015).
8. *В.В. Астанин, О.А. Кайбышев, А.И. Пиеничнюк*, ФММ **84**, вып. 6, 5 (1997).

F.Z. Utyashev, G.V. Samarukov

FEATURES OF THE ROLLING-OFF OF HOLLOW SHAFTS OF GAS TURBINE ENGINES UNDER CONDITIONS OF SUPERPLASTICITY

The features of the rolling-off of the hollow shafts made of heat-resistant nickel alloys (HRNA) under conditions of superplasticity are analyzed. The difficulties of application of high performance multiroll rolling caused by the peculiarities of deformation of these alloys under superplastic deformation (SPD) are mentioned. A practically tested scheme of the hollow shaft rolling on a mandrel by a single roll is shown. It is shown that to form a shaft with using this scheme, an extended deformation zone covering the cross section of the blank must be generated under the action of the instrument. The evaluation of the size of the roller tool and the deformation zone obtained by torsion is presented, that are required for the shaft forming. Possible application of axisymmetric volume strain to the analysis of stress-strain state of the material under the rolling off of the shaft on a cylindrical mandrel under the effect of a single roller is substantiated.

Keywords: superplasticity, high-resistant nickel alloys, rolling off, hollow shafts, stress-strain state

Fig. 1. Scheme of the rolling-off: 1 – billet, 2 – mandrel, 3 – blank holder, 4 – roller

Fig. 2. Example of the stress distribution over the deformation zone in the course of rolling of the shaft made of the EK79 heat-resistant alloy under SPD