

УДК 621.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЪЕМНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ РАСКАТКЕ ПОЛЫХ ВАЛОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (ГТД) В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Фарид Зайнуллаевич Утяшев¹, Рафаэль Юрьевич Сухоруков²,
Григорий Викторович Самаруков¹, Марсель Ильясович Нагимов¹,
Любовь Васильевна Гаврилина²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (ИПСМ РАН), г. Уфа

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благодирова Российской академии наук (ИМАШ РАН), г. Москва

ryusukhorukov@gmail.com

Аннотация. В работе показано, что для формообразования раскатки полых валов на оправке посредством одного ролика необходимо, чтобы возникла расширенная объемная очаг деформации, охватывающий все поперечное сечение заготовки под зоной её контакта с роликом. Определены размеры инструмента, обеспечивающие формирование такого очага деформации. Обоснована возможность использования осесимметричной постановки задачи объемного деформирования при раскатке валов для определения напряженно-деформированного состояния материала посредством пакета прикладных программ «Deform-3D».

Ключевые слова: раскатка, полый вал, газотурбинный двигатель, сверхпластичность, очаг деформации, деформация кручением, напряжение течения

VOLUME DEFORMATION RESEARCH WHILE ROLLING-OUT OF THE HOLLOW SHAFTS OF GAS TURBINE ENGINES UNDER SUPERPLASTICITY

Farid Z. Utyashev¹, Rafael Yu. Sukhorukov², Grigory V. Samarukov¹, Marsel I. Nagimov¹,
Lyubov V. Gavrilina²

¹Institute of Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences (IPSM RAN),
Ufa;

²IMASH RAS, Moscow, Russia.

ryusukhorukov@gmail.com

Annotation. It is depicted in this paper that there is required an expanded volumetric deformation center (zone) which should be generated for forming the rolling-out of the hollow shafts using a single roller and this deformation center should cover all the cross section of a workpiece within its contact zone with a roller. There are determined dimensions of a tool that provide forming of such a rolling shaft deformation zone. The possibility of applying an axisymmetric assignment of volumetric deformation has been substantiated while rolling-out of shafts for determining the stress-strain state of the material by the **Deform-3D** software package.

Keywords: a rolling-out, a hollow shaft, a gas turbine engine, superplasticity, a deformation center (zone), torsion deformation, flow stress

Введение

Технологичность жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) при изготовлении деталей ГТД можно существенно повысить, если использовать метод раскатки в условиях сверхпластической деформации (СПД) [1]. Раскатка - процесс локального формоизменения заготовки, в котором формообразование детали определяется кинематикой инструмента и его размерами, а также размерами и свойствами материала деформируемой заготовки. Указанные факторы влияют на очаг деформации, который требуется для получения детали.

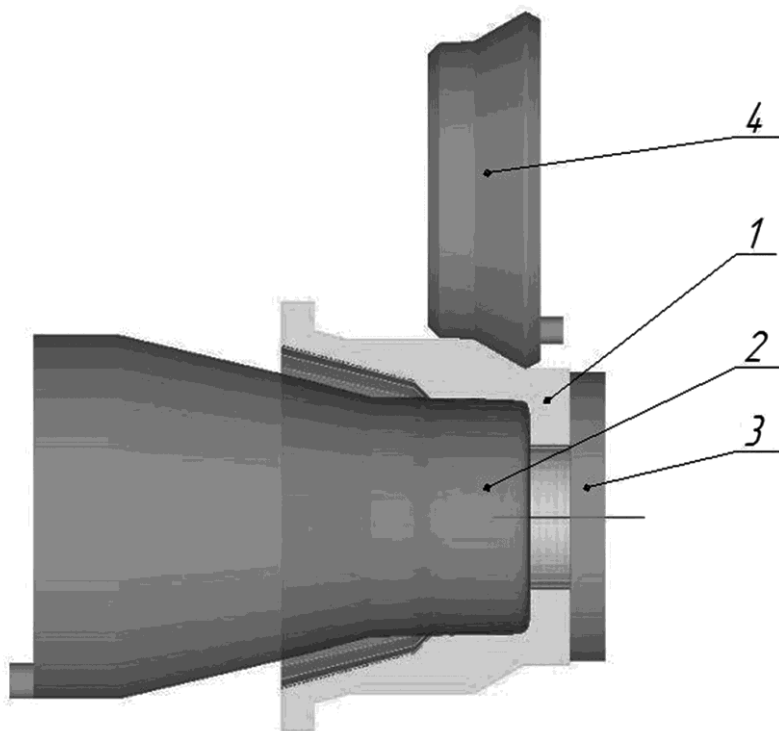
В данной статье рассмотрен процесс раскатки полого вала из жаропрочного сплава в условиях сверхпластичности на оправке с одним роликом. Цель статьи оценить размеры очага деформации, а по ним размеры инструмента - ролика.

Показано, что для осуществления процесса раскатки необходимо, чтобы в заготовке возник определенный объемный очаг деформации кручением, параметры которого зависят от ширины ролика и реологии материала.

1. Схема раскатки вала и методика решения задачи

Схема. Раскатку производили по схеме, приведенной на рис. 1 в высокотемпературной камере. Полуоую заготовку 1 устанавливают на вращающейся оправке 2 с небольшим зазором между поверхностями вращения. Для передачи момента вращения заготовку закрепляют к торцу оправки прижимом 3. Формоизменение заготовки происходило под воздействием одного ролика 4, который внедряется в заготовку в поперечном направлении и одновременно перемещается в продольном направлении относительно вращающейся заготовки. В результате наружный диаметр и толщина стенки заготовки уменьшаются, а её осевой размер увеличивается.

Отметим, что на приведенном рисунке показан случай раскатки вала сложной формы,



для которого была произведена попытка выполнить расчеты НДС посредством программы Deform 3D в общей трехмерной постановке [2]. Однако правдоподобное решение этой задачи, как показано ниже, удалось получить, принимая во внимание результаты этой работы, в упрощенной осесимметричной постановке с использованием достаточного по ширине рабочей поверхности ролика.

Рис. 1 – Схема раскатки
1 – заготовка, 2 – оправка, 3 – прижим, 4 – ролик
Раскатка выполняется в высокотемпературной камере, которая на рисунке не показана.

Методика. В работе использован инженерный подход к решению задачи -

раскатки цилиндрической части вала на оправке одним роликом в условиях сверхпластичности. Перемещение конической части заготовки относительно оправки не препятствует такой раскатке и происходит как перемещение жесткого (недеформируемого) конца за счет наличия определенного зазора между коническими поверхностями.

Для процесса раскатки возникает вопрос: какова должна быть ширина ролика, чтобы обеспечить реализацию процесса? Очевидно, что если этот размер будет мал, то на заготовке сформируется лишь винтовая канавка. Если же использовать ролик, ширина которого будет равна длине раскатываемой части вала, то подобно раскатке кольца между двумя валками произойдет нерегламентированное увеличение наружного и внутреннего диаметра заготовки.

Необходимо отметить, что для создания непрерывного в поперечном сечении заготовки очага деформации рациональной схемой является многовалковая раскатка роликами определенной ширины, которые располагают относительно друг по окружности. Однако применение такой схемы для раскатки в условиях сверхпластичности связано с преодолением ряда конструктивных сложностей, связанных с созданием изотермических условий деформации.

Решение задачи о выборе оптимальной ширины ролика сводится к задаче об оценке формы и размера очага деформации, который зависит от размеров инструмента и заготовки, а также от реологии деформируемого материала.

Реология материала в состоянии сверхпластичности сочетает в себе вязкое и пластическое течение [1]. Очаг деформации при СПД в сравнении с обычной деформацией значительно расширен вследствие небольшого напряжения сдвига, достаточного для возникновения вязкого течения материала. В результате очаг деформации при СПД не имеет четкой границы, течение материала, хотя и с медленными скоростями ползучести, происходит даже в области, где напряжения, инициируемые роликом, весьма малы.

Поэтому данную задачу рассмотрим в отношении обычной пластической деформации материала, для которого можно применить известную концепцию об очаге деформации с четко определенным условием существования у него границы. При этом примем представление об идеальной пластичности материала, отличающееся постоянством напряжения течения. Последнее означает отсутствие у материала упрочнения, что согласуется с состоянием материала при СПД, а также, во многом, соответствует поведению крупнозернистого материала при горячей деформации. Из условия постоянства напряжения течения (сдвига) следует, что границы очага деформации не изменяют свое положение под роликом и вместе с ним перемещаются в осевом направлении при раскатке.

По результатам решения задачи определения размеров очага деформации вычислим ширину ролика. Затем сделаем поправку на ширину ролика для случая раскатки вала в условиях сверхпластичности, учитывая расширения размеров очага и необходимость его обрезания в рамках эффективных скоростей деформации при раскатке.

При решении задачи воспользуемся тем, что СПД осуществляют с небольшими скоростями, при которых нет необходимости учитывать инерциальные силы. Поэтому в данном случае, как для статической задачи, допустимо использовать условие равновесия между внешними и внутренними силами, в частности, равенство момента кручения от внешних сил моменту кручения от внутренних сил.

2. Решение задачи

Уточним некоторые понятия и примем ряд допущений, касающихся очага деформации.

Граница очага деформации. Существование границы очага деформации вытекает из фундаментального закона сохранения мощности при пластической деформации [3]:

$$\iint_S X_m v_i dS = \iiint_V \sigma_{ij} \xi_{ij} dV + \iint_{S_p} \tau[\nu] dS \quad (1)$$

Здесь X_{ni} – проекции силы F инструмента, действующей на единицу площади внешней поверхности тела, на оси координат; v_i – проекции скорости деформирования на оси координат; поля напряжений σ_{ij} и скоростей ξ_{ij} деформации материальных точек в объеме очага деформации V ; τ – касательное напряжения сдвига на поверхности разрыва; $[v]$ – разность (градиент, скачок) тангенциальных скоростей по обе стороны поверхности разрыва; S_p – площадь поверхности разрыва.

В этом уравнении слева от знака равенства показана мощность, развиваемая внешними силами, а справа от знака равенства – мощности, затрачиваемые на работу внутренними силами. При этом первое слагаемое это – мощность, затрачиваемая на формоизменение тела, а второе слагаемое – мощность, рассеиваемая касательными к поверхностям разрыва напряжениями, приводящими к сдвигу 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 такой градиент касательных напряжений, что внутренняя область очага находится в пластическом состоянии, а внешняя – в упругом состоянии. Собственно, на границе очага деформации касательные напряжения, как и в его объеме, отвечают условию Треска – Сен-Венана или Губера – Мизеса. В первом случае касательное напряжение приравнивается напряжению сдвига- τ_c , а во втором случае примерно в 1,15 раз больше напряжения сдвига, что связано с учетом действия в очаге деформации разнонаправленных касательных напряжений. Во всех случаях на внутренней границе очага возникает сдвиг и поворот пластической области [4] относительно упругой области.

Форма и размеры очага деформации. Из приведенного уравнения следует, что деформация – формоизменение осуществляется в очаге деформации, имеющем определенный объем. В нашем случае этот объем стационарен по величине, но изменяет положение, перемещаясь вместе с роликом. Поперечные размеры очага деформации роликом должны совпадать с диаметрами внешней и внутренней поверхности трубы. Если очаг деформации будет заканчиваться внутри заготовки, т.е. охватывать не все поперечное сечение (кольца), а лишь некоторый сектор или сегмент, то процесс раскатки вала не осуществится. В этом случае вытесняемый при внедрении ролика в заготовку объем материала будет образовывать наплыв (гребень) вокруг контура ролика, и значительная часть материала в поперечном сечении останется в упругом состоянии, что не позволит торцу заготовки перемещаться в сторону вытяжки вала.

Примем размер очага деформации в осевом направлении равным ширине ролика. Таким образом, форма очага деформации, если не принимать во внимание сравнительно небольшую область локального внедрения ролика в заготовку, представляет собой некоторый отрезок трубы. Силами, способными создать такой очаг деформации кручения, являются пара равных и противоположных по направлению моментов кручения.

Момент кручения. Один из этих моментов создают силы трения, действующие на поверхности контакта заготовки с оправкой, другой момент создается роликом. Расчет любого из этих моментов проблематичен из-за необходимости вычисления площади контакта инструмента с заготовкой, выявления закона распределения на них нормального давления, сил трения, центра тяжести площади контакта.

Для определения момента воспользуемся более простым путем – используем теорему Р. Бредта о циркуляции касательных напряжений кручения [2, 6] и определим момент, как произведение внутренних сил на плечо. В соответствии с указанной теоремой эти напряжения лежат в поперечных к оси заготовки плоскостях и направлены по касательной к окружностям с центром кривизны на оси трубной заготовки.

Выделим в поперечной плоскости на расстоянии R от оси заготовки кольцо бесконечно малой толщины dR . Площадь кольца определится как $2\pi R dR$. Умножим эту площадь на

касательные к ней напряжение кручения τ , получим дифференциал силы dF . Умножив дифференциал на радиус R , после интегрирования найдем момент

$$M = \int_{R_g}^{R_n} \tau 2\pi R^2 dR = \tau \pi \frac{2}{3} R^3 \Big|_{R_g}^{R_n} \quad (2)$$

Отметим, что в полученном выражении касательное напряжение умножается на некоторый объем. Если кручению подвергается сплошной пруток, то этот объем равен объему полусферы. Если кручению подвергается труба, то объем определится пропорционально разности наружного радиуса в кубе и внутреннего радиуса в кубе. Точное выражение зависимости момента от объема можно получить из (2), выделив в правой части объем очага деформации. Например, умножив и разделив правую часть на длину цилиндрического очага деформации l , получим: $M = \tau_c V 2R/3l$. Так как для валов ГТД обычно $R \approx l$, то в формуле (3) при инженерных расчетах можно использовать знак равенства. В общем случае при кручении призматического стержня произвольного сечения уравнение момента в первом приближении может быть записано в виде:

$$M \cong \tau_c V \quad (3)$$

где τ - это касательное напряжение, действующее внутри очага деформации, V – объем очага деформации. Умножение размерностей этих величин $\text{Н/м}^2 \times \text{м}^3$ дает размерность момента нм.

Уравнение (3) отражает то обстоятельство, что кручение под действием момента возникает в определенном объеме очага деформации. Не все компоненты тензора напряжений создают кручение, а лишь касательные напряжения, расположенные в поперечных плоскостях очага деформации. Величина этих напряжений согласно условию Сев-Венана-Треска должна быть равной напряжению сдвига.

Точное выражение зависимости момента от объема можно получить из (2), выделив в правой части объем очага деформации. Например, умножив и разделив правую часть на длину цилиндрического очага деформации l , получим

$$M_c = \tau_c V 2R/3l$$

Запишем условие перехода поперечного сечения трубной заготовки в пластическое состояние при кручении по отношению к моменту M внешних сил [3]:

$$\tau_c = \frac{M}{W_p},$$

где W_p полярный момент сопротивления кручению поперечного сечения заготовки.

Из равенства внешнего и внутреннего моментов получим $V = W_p$.

Пренебрегая зоной вдавливания ролика в трубную заготовку, объем очага деформации запишем в виде $V = \frac{\pi}{4} (d_n^2 - d_g^2) l$, где d_n и d_g – соответственно наружный и внутренний диаметры, l -длина очага деформации.

Полярный момент сопротивления трубной заготовки равен $W = \frac{\pi}{16} (d_n^3 - d_e^3)$.

Отсюда $l = \frac{1}{4} \frac{d_n^3 - d_e^3}{d_n^2 - d_e^2}$. Здесь $d_n = kd_e$, где k – коэффициент пропорциональности.

В основном для раскатки валов необходимы заготовки, у которых диапазон изменения коэффициента $k = (1,2 - 2)$. Длина таких трубных заготовок составит:

$$l = \frac{1}{4} \frac{d_e (k^3 - 1)}{(k^2 - 1)} = (0,4 - 0,6) d_e \approx 0,5 d_e.$$

Полученный результат – осевой размер очага деформации и по принятому условию ширина ролика.

Таким образом, рассматривая процесс раскатки трубы, выполненной из идеально пластичного материала, переход которого от упругой деформации наступает по условию Сен-Венана-Треска, необходимо использовать ролик, ширина которого была близкой к величине внутреннего радиуса трубной заготовки.

Влияние реологии. Реология ультрамелкозернистого (УМЗ) материала, как уже отмечалось, существенно отличается от реологии крупнозернистого (КЗ) материала [4, 5]. Известно, что КЗ материал после участка упругой деформации деформируется с постоянным значением напряжения сдвига. Поведение УМЗ материала при СПД отличается малым участком упругой деформации, низким значением порогового напряжения сдвига, протяженным участком скоростной зависимости напряжения течения от скорости деформации – интервалом сверхпластичности. Касательная к этой зависимости, которую из-за широкого скоростного интервала СПД обычно строят в логарифмических координатах, характеризует коэффициент скоростной чувствительности напряжения течения от скорости деформации $m = \frac{d \log \tau}{d \log \xi}$ [1, 5].

Физический смысл коэффициента скоростной чувствительности заключается в том, что в условиях горячей деформации при определенных скоростях деформации, обычно $\xi = 10^{-3} \div 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ УМЗ материалы ведут себя подобно вязкой жидкости. При небольших скоростях, близких к скоростям ползучести, они могут течь под воздействием малых напряжений. С ростом скорости до $\xi = 10^0 \div 10^1$ напряжение возрастает и при больших скоростях становится близким к напряжению сдвига, характерного для крупнозернистого материала. Причина такого поведения материала связана с механизмами деформации. Если в крупнозернистом материале основным механизмом деформации является кристаллографический сдвиг, то в УМЗ материале сдвиг по границам зерен. К сверхпластичным материалам относят такие материалы, у которых m имеет значение 0,3 и более. Максимальное значение этого коэффициента теоретически может быть близко к единице, но в реальности этот коэффициент обычно не превышает значения 0,5.

Если вал раскатывается из крупнозернистого материала, то для возникновения пластического кручения необходимо, чтобы касательные напряжения течения достигли уровня τ_c во всём сечении трубной заготовки. В противном случае часть материала останется в упругом состоянии и пластическое кручение не возникнет.

Если полый вал раскатывается из УМЗ материала в состоянии сверхпластичности, то переход в пластическое состояние происходит при напряжениях, которые, в принципе, на порядок меньше, чем τ_c для крупнозернистого материала. Соответственно при раскатке в

условиях сверхпластичности у УМЗ материала размеры очага деформации будут больше, чем у крупнозернистого материала.

Однако скорость деформации при столь малых напряжениях у УМЗ материала будет весьма малой $\sim 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и менее. Между тем оптимальная скорость деформации при раскатке близка к угловой скорости вращения заготовки, т.е. составляет $\sim 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, что совпадает с оптимальной скоростью СПД. Поэтому размеры очага УМЗ материала при СПД необходимо ограничить их обрезанием в соответствии с оптимальной скоростью деформации. Поскольку при оптимальной скорости коэффициент скоростной чувствительности достигает максимального значения в диапазоне 0,3 - 0,5 (конкретное значение m в этом диапазоне зависит от однородности УМЗ структуры [3]), то ширину ролика для раскатки в условиях СПД оценим пропорционально этому коэффициенту:

$$l_{\text{сно}} = ml = (0,3 - 0,5)(0,4 - 0,6)d_g = (0,12 - 0,3)d_g. \quad (11)$$

На рис.2 приведены результаты расчета деформации УМЗ заготовки из жаропрочного сплава, полученные с использованием ППП Deform 3D (сублицензионный договор № TES-107|20014-AS от 19 ноября 2014 г., лицензия номер 8143).

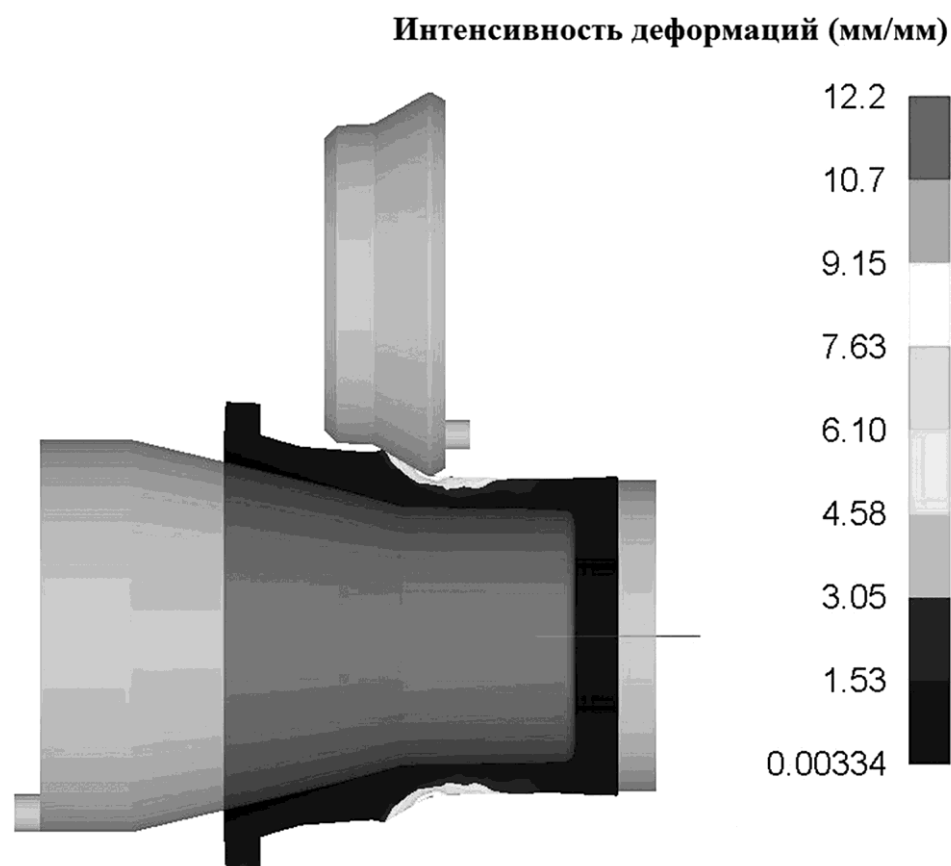


Рис. 2 – Пример распределения деформации при раскатке вала из жаропрочного сплава ЭК79 в условиях сверхпластичности

Задача была решена в осесимметричной постановке. Видно, что очаг деформации в поперечном сечении заготовки сквозной. Ширина ролика составляет примерно одну

четвертую часть от внутреннего диаметра заготовки, что укладывается в полученную оценку [5, 7].

Таким образом, вследствие особенности СПД, заключающейся в расширении очага деформации, ширину инструмента-ролика можно значительно уменьшить в сравнении с роликом, необходимым для раскатки трубной заготовки при обычной деформации.

Обсуждение результатов

Обычную раскатку или ротационную вытяжку деталей типа труб и полых валов осуществляют с использованием многовалкового оборудования. В этом случае ролики располагаются по окружности заготовки, что позволяет уравновесить силы деформации и создать непрерывный очаг деформации кручением, необходимый для формоизменения заготовки. Для раскатки валов из современных жаропрочных никелевых сплавов в условиях сверхпластичности с применением много роликового инструмента необходимо создание принципиально нового оборудования, в частности, описанного в работе [1]

На давяльных станках с одним роликом также возможна раскатка валов из жаропрочных сплавов на основе Ni, Fe, Ti в условиях сверхпластичности [1,5, 8].

В данной работе показано, что для раскатки вала одним роликом необходимо создать объемный очаг деформации, распространяющийся на все поперечное сечение заготовки, находящееся под роликом.

Возникает вопрос: в силу каких причин, и при каких условиях возникает такой очаг? В каждый момент времени ролик непосредственно воздействует на заготовку в локальной области, после ухода ролика от этой области напряжения быстро снижаются до нуля. Причины реализации раскатки вала на оправке одним роликом в условиях СПД связаны с особенностями этой деформации.

Основным механизмом деформации при СПД является скооперированное зернограничное проскальзывание, которое обеспечивается наличием в материале чрезвычайно большой сетки границ у мелких зерен. Поскольку напряжение течения при СПД значительно меньше, чем при обычной деформации, то очаг деформации приобретает большой размер и приобретает при раскатке форму характерную для кручения.

Постановка задачи определения НДС при раскатке полого вала на оправке посредством одного ролика, как трехмерной задачи с несимметричным нагружением заготовки, к положительному результату не приводит. В этом случае формоизменение заготовки ограничивается исключительно локальной областью текущего воздействия ролика на заготовку, что приводит к образованию наплывов материала, выдавленного из заготовки роликом. Моделирование процесса раскатки становится возможным в осесимметричной постановке трехмерной задачи, справедливость которой оправдана тем, что такой очаг создается вследствие кручения.

Необходимо также отметить, что коррекцию ширины ролика с учетом расширенного очага деформации при СПД можно было бы и не выполнять. Однако расширение очага происходит преимущественно в раскатанной части вала, поскольку в этой части поперечное сечение заготовки меньше, чем в нераскатанной части. Следует также отметить, что избыточные размеры ролика заметно удорожают его стоимость.

Выводы

1. Показано, что при раскатке полого цилиндрического вала на оправке посредством одного ролика в условиях сверхпластичности возникает объемный очаг деформации кручением.

2. Определены размеры очага деформации, а также размеры и форма инструмента в зависимости от поперечных размеров и реологии материала заготовки при раскатке в условиях СПД полых валов посредством одного ролика.

3. Наличие объемного очага деформации кручением при раскатке полого вала позволяет существенно упростить расчет НДС по программе Deform 3D, путем замены несимметричной трехмерной задачи на осесимметричную задачу.

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 июля 2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI60414X0091).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaibyshev O.A., Utyashev F.Z. Superplasticity: Microstructural Refinement and Superplastic Roll Forming. Futurepast. Arlington, VA22201 USA. 2005. 386 p.
2. Утяшев Ф.З., Сухоруков Р.Ю., Сидоров А.А., Ибрагимов А.Р. Математическое моделирование процессов изготовления осесимметричных деталей авиационного назначения методом локального деформирования. Письма о материалах. г. Уфа, № 5 (2), 2015. С. 175-178.
3. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. - 420 с
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. Russian Physics Journal, January. 2015, No. 1, pp. 64-71.
5. Mulyukov R.R., Nazarov A.A., Sukhorukov R.Yu., Utyashev Ph.Z. Technological Features of a Process and Equipment for Superplastic Rolling of Axially Symmetric Heat-Resistant Steel Components of Rotors for Modern Aviation Motors. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. Vol.43, No. 4, 2014. p. 311-318.
- 6 Utyashev F. Z., Sukhorukov R. Yu., Samarukov G. V., Nagimov M. I. Specific Features of Rolling of Shaft of Gas Turbine Engine under Conditions of Superplasticity // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2016, Vol.45, No. 1, p. 65-72
- 7 Sukhorukov R.Yu., 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 (English Translation of Problemy Mashinostroeniya I Avtomatizatsyi), Vol. 44, No. 8, 2015, p. 737-743
- 8 Utyashev F.Z, Mulyukov R.R., Sukhorukov R.Yu., Valitov V.A. 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 Vols.838-839 (2016) Superplasticity in Advanced Materials – ICSAM 2015 doi: 10.4028/www.scientific.net/NCF.838-839.615. pp. 615-620

Дата поступления статьи: 30 июня 2016 года.