

УДК 539.374

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ КОЛЬЦА БОЛЬШОГО РАДИУСА КРИВИЗНЫ

Петросян Г.Л., Петросян А.Г., Моталлеби С.Р.

Պետրոսյան Գ.Լ., Պետրոսյան Ա.Գ., Մոտալլեբի Ս.Ր.

Մեծ կորության շառավղով օղակի գրտնակման գործընթացի լարվածային վիճակի բաղադրիչների որոշման առանձնահատկությունները

Բացահայտվել են մեծ տրամագծով օղակի գրտնակման գործընթացի ընթացիկ երկրաչափական փոխկապակցված պարամետրերի որոշման առանձնահատկությունները: Դրանց հիման վրա կատարելով օղակի լարվածային վիճակի ուսումնասիրություն՝ ստացվել է համապիտանի հավասարումների համակարգ: Ցույց է տրվել, որ օղակի տրամագծի աստիճանաբար մեծացման դեպքում ընթացիկ երկրաչափական պարամետրերի փոփոխությունը հանգեցնում է հարթ շերտի գլոցման դեպքի հավասարումների ստացմանը:

Petrosyan G.L., Petrosyan H.G., Motallebi S.R.

Particularities for determination stress state components of large radius curvature ring expansion process

The peculiarities for determining the current interconnected geometrical parameters of large diameter ring expansion process are revealed. Based on ring stress state studies the universal system of equations is obtained. It is shown that in case of step-by-step increase of ring diameter the changes of geometrical parameters allow to obtain the equations of plane stripe rolling.

Выявлены особенности определения текущих взаимно связанных геометрических параметров процесса раскатки кольца большого диаметра. При исследовании напряжённого состояния кольца получена система универсальных уравнений. Показано, что в случае постепенного увеличения диаметра кольца изменение текущих геометрических параметров позволяет получить уравнения прокатки плоской полосы.

Полученная при раскатке колец высококачественная продукция имеет широкое применение в различных областях экономики, в производстве машин, автомобилей, поездов, самолётов, ракет и т.д.

Раскатка колец – один из наиболее производительных, точных, энерго- и ресурсосберегающих методов обработки металлов давлением. Данный процесс позволяет с минимальными затратами металла получить кольцевые детали большого диаметра, с точными геометрическими параметрами и высокими механическими свойствами, а также качественной поверхностью разных поперечных сечений.

С целью правильного выбора технических характеристик оборудования в процессе раскатки, а также совершенствования технологического процесса получения кольцевых деталей с указанными эксплуатационными и физико-механическими свойствами возникает необходимость исследования напряжённо-деформированного состояния деформируемого кольца при больших пластических деформациях.

В [1] проведён анализ известных в этой области работ. Показано, что в последнее время при исследовании напряжённо-деформированного состояния процесса раскатки кольца приводятся как уточнённые в какой-то мере аналитическим методом решения, так и данные, полученные на основе метода конечных элементов – одного из самых усовершенствованных численных методов с применением автоматизированного программного пакета.

Аналитическое исследование процесса раскатки кольца – достаточно сложный и малоизученный процесс, что связано с его многопараметричностью. В основном, эти исследования приближённые, а полученные формулы имеют эмпирический вид [1]. Следовательно, аналитические исследования не полностью отражают реальную картину процесса раскатки. Исходя из вышеизложенного, работы, выполненные в этом направлении, представляют особую актуальность.

В [1] аналитическим методом исследовано деформированное состояние процесса раскатки кольца большого диаметра, в результате чего было выявлено, что основные геометрические параметры процесса раскатки взаимосвязаны. Полученные формулы позволили по некоторым начальным параметрам определить другие. Выполнены численные расчёты при постепенном увеличении радиуса кольца. Показано, что в этом случае происходит постепенный переход от схемы процесса раскатки кольца к схеме прокатки плоской полосы.

Целью настоящей работы является выявление особенностей определения текущих взаимосвязанных геометрических параметров процесса раскатки кольца большого диаметра и изучение напряжённого состояния кольца на основе этих данных.

Для решения поставленной задачи рассмотрим схему (фиг.1) раскатки кольца с внешним R_e и внутренним R_i радиусами, которая по сравнению со схемой [1] дополнена некоторыми данными. При этом, внутри углов $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ показаны их текущие значения $(\varphi_{0c}, \varphi_{1c}, \varphi_{2c})$.

При решении задачи были использованы принятые в [1] следующие допущения:

- 1) деформированная зона кольца ограничена двумя контактными дугами окружности и двумя поперечными сечениями кольца: ABB_2A_2 – четырехугольник;
- 2) кольцо подвергается плоской деформации: в направлении ширины деформация отсутствует;
- 3) процесс деформирования кольца происходит поэтапно с малыми степенями деформирования; его начальная толщина h_0 постепенно уменьшается и кольцо удлиняется. При этом, эти изменения на данном этапе деформирования представляют собой достаточно маленькие величины;
- 4) внешний r_c и внутренний r_i радиусы кольца (рис.1) с малой степенью деформирования при выходе из зоны деформирования определяются с учётом уменьшения толщины кольца, т.е. в течение одного этапа центр O кольца остается тем же.

Используя метод тонких сечений [1], составим уравнения равновесия элемента $abde$ кольца (фиг.1) с единицей ширины, проектируя возникаемые нормальные силы в поперечных сечениях, а также нормальные и касательные силы в контактных поверхностях на касательной его dS дуги. Для отстающей части деформированной зоны кольца получим

$$(\sigma_\theta + d\sigma_\theta)(h + dh) - \sigma_\theta h - p_1 R_1 d\varphi_{1c} \sin \varphi_{1c} - p_2 R_2 d\varphi_{2c} \sin \varphi_{2c} + p_1 f R_1 d\varphi_{1c} \cos \varphi_{1c} + p_2 f R_2 d\varphi_{2c} \cos \varphi_{2c} = 0, \quad (1)$$

где σ_θ и $d\sigma_\theta$ – внутреннее окружное напряжение кольца и его приращение; R_1 и R_2 – радиусы ведущих и холостых валков; h – текущая толщина кольца $dh = dh_1 + dh_2$, dh_1 и dh_2 – соответственно уменьшённые значения общей, внешней и внутренней частей его толщины; p_1 и p_2 – нормальные давления на внешней и внутренней поверхностях контактной зоны процесса раскатки кольца; f – коэффициент трения.

Формоизменением уравнения (1) приведём его к следующему виду:

$$\sigma_\theta dh + d\sigma_\theta h - p_1 R_1 d\varphi_{1c} (\sin \varphi_{1c} - f \cos \varphi_{1c}) - p_2 R_2 d\varphi_{2c} (\sin \varphi_{2c} - f \cos \varphi_{2c}) = 0. \quad (2)$$

Для получения второго уравнения равновесия элемента $abde$ кольца проектируем силы, действующие на него, на радиус, соединяющий среднюю точку дуги dS с центром кольца O (фиг.1):

$$p_1 R_1 d\varphi_{1c} \cos \varphi_{1c} (1 + f \operatorname{tg} \varphi_{1c}) = p_2 R_2 d\varphi_{2c} \cos \varphi_{2c} (1 + f \operatorname{tg} \varphi_{2c}) = 0. \quad (3)$$

Пренебрегая в полученном уравнении величиной $f \operatorname{tg} \varphi$ относительно единицы, учитывая то обстоятельство, что $R_1 d\varphi_{1c} = dS_{1c}$, $R_2 d\varphi_{2c} = dS_{2c}$ (фиг.1 б, с), путем формоизменения уравнения (3) получим следующую формулу связи между контактными нормальными давлениями p_1 и p_2 :

$$p_2 = p_1 dS_{1c} \cos \varphi_{1c} / (dS_{2c} \cos \varphi_{2c}). \quad (4)$$

Отметим, что в литературе известна формула связи между p_1 и p_2 , которая выражается через длины l_1 и l_2 целой контактной зоны кольца [2].

Подставляя величину p_2 из (4) в (2) и представив его через $d\varphi_{1c}$, получим

$$\sigma_\theta dh + d\sigma_\theta h - p_1 R_1 d\varphi_{1c} (\sin \varphi_{1c} - 2f \cos \varphi_{1c} + \cos \varphi_{1c} \operatorname{tg} \varphi_{2c}) = 0. \quad (5)$$

Для опережающей части деформированной зоны кольца получим уравнение равновесия соответствующего элемента из (5) заменой знака «минус» (-) напротив члена, имеющего коэффициент трения f , знаком «плюс» (+).

Исходя из вышеизложенного, полученные уравнения представим в виде:

$$\frac{d\sigma_\theta}{d\varphi_{1c}} = -\sigma_\theta \frac{dh}{hd\varphi_{1c}} + \frac{p_1 R_1}{h} (\sin \varphi_{1c} \mp 2f \cos \varphi_{1c} + \cos \varphi_{1c} \operatorname{tg} \varphi_{2c}) \quad (6)$$

Необходимо отметить, что из (6) можно получить уравнения для случая прокатки плоской полосы [3], если принять $\varphi_{1c} = \varphi_{2c}$, т.е. $R_1 = R_2$ или $\varphi_1 = \varphi_2$.

Как видно, для определения величин σ_θ и p_1 , кроме уравнений (6), необходимо иметь ещё одну формулу, которая является следующим условием пластичности Треска – Сен-Венана $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y$, где σ_y – напряжение текучести материала. Учитывая особенности технологического процесса раскатки кольца, оценивая величины и знаки напряжений, действующих на элемент *abde* (фиг.1), представим главные напряжения в следующем виде: $\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_2 = \sigma_z$, $\sigma_3 = -p_1$, где σ_z – напряжение в направлении ширины кольца. В случае плоской деформации величина σ_z равняется полусумме остальных двух нормальных напряжений. Тогда условие пластичности Треска – Сен-Венана примет следующий вид:

$$\sigma_\theta + p_1 = \sigma_y. \quad (7)$$

Для решения системы уравнений (6) и (7) необходимо иметь данные о геометрических параметрах деформированной зоны кольца. Подробное описание процесса определения этих данных, кроме h (текущей толщины кольца) и $dh = dh_1 + dh_2$ (уменьшённого его значения), приведено в [1]. При этом, для использования данных [1] необходимо начальные углы $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ и радиусы R_e, R_i кольца выразить через текущие их значения $\varphi_{0c}, \varphi_{1c}, \varphi_{2c}, R_{ec}, R_{ic}$. Например, формулы, связывающие отмеченные текущие параметры, подобно [1], следующие:

$$\sin\varphi_{1c} = (R_{ec} / R_1) \sin\varphi_{0c}, \quad \sin\varphi_{2c} = (R_{ic} / R_2) \sin\varphi_{0c}. \quad (8)$$

Что касается определения текущей толщины h кольца и уменьшённого его значения $dh = dh_1 + dh_2$, то используем элемент ab_1d_1e с формой прямоугольной трапеции (фиг.1а), которая была построена опусканием из точек a, e перпендикуляров ab_1, ed_1 к стороне bd . Среднюю линию dS полученной трапеции ab_1d_1e выразим через величины $ab_1 = dl_1, d_1e = dl_2$ (фиг.1а, в и с): $dl_1 + dl_2 = 2dS$. Представив их через dh_1 и dh_2 , получим

$$dh_1 / \operatorname{tg}\varphi_{1c} + dh_2 / \operatorname{tg}\varphi_{2c} = 2dS. \quad (9)$$

Для определения величин dh_1 и dh_2 необходимо использовать ещё одну формулу. Для этого применяется метод [1], который в конце данного этапа деформирования кольца между внешним $B_1B_2 = \Delta h_1$ и внутренним $A_1A_2 = \Delta h_2$ изменениями его толщины создаёт следующую связь: $\Delta h_1 = \gamma \Delta h_2$ [1]. Допустим, что dh_1 и dh_2 также между собой связаны коэффициентом γ :

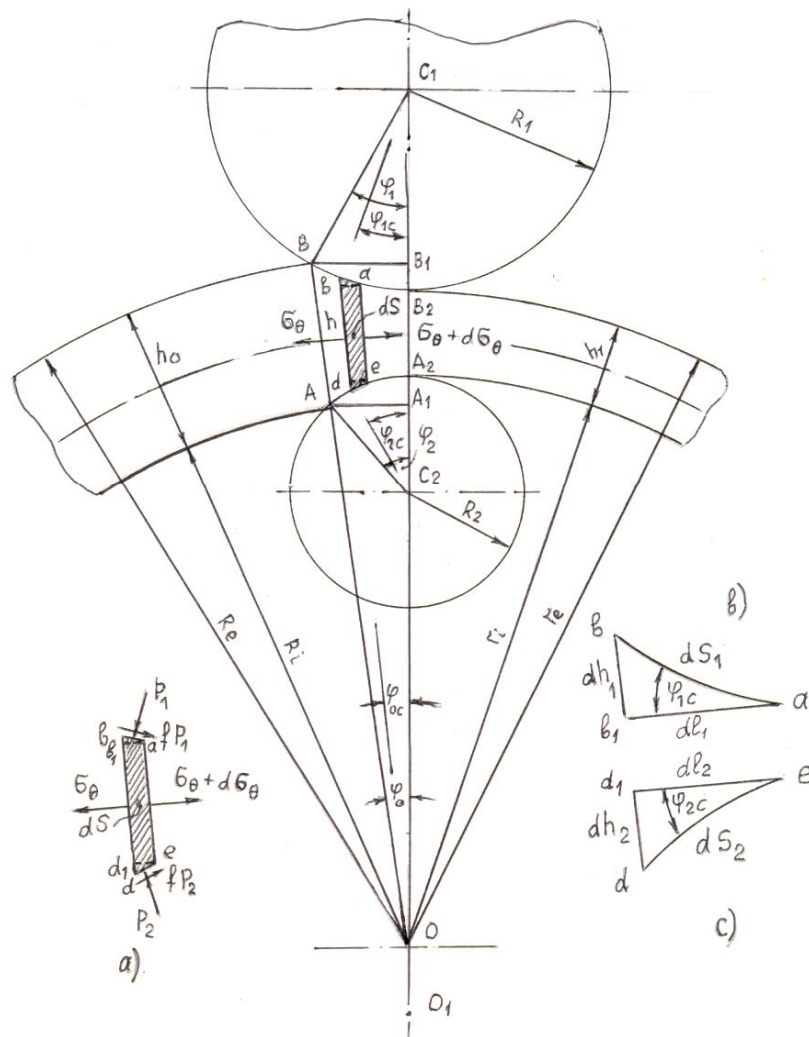
$$dh_1 = \gamma dh_2, \quad (10)$$

где γ в различных степенях деформирования кольца имеет разное значение и определяется по следующей формуле:

$$\gamma = dh_1 / dh_2 = \frac{(R_{ec} + R_1)R_2R_{ic}}{(R_{ic} - R_2)R_1R_{ec}}. \quad (11)$$

Уравнения (9)–(11) позволяют для данного значения dS и текущих значений других параметров $\varphi_{0c}, \varphi_{1c}, \varphi_{2c}, R_{ec}, R_{ic}$ определить величины dh_1, dh_2 и $dh = dh_1 + dh_2$. При этом, с целью упрощения численных расчётов, величина

dS принимается постоянной. Указанное можно получить, если угол φ_0 разделить на многочисленные равномерные части.



Фиг.1. Схема раскатки кольца, где на *a*), *б*) и *с*) показаны: часть, отделённая двумя поперечными сечениями, и элементы соответствующих её концов

Значения величин начальных [1] и вышеотмеченных текущих взаимосвязанных параметров деформированной зоны кольца позволяют, используя систему уравнений (6) и (7), определить компоненты напряжённого состояния. Для этого удобно

использовать метод численных расчётов [5] путем моделирования касательными окружного края плоской полосы при прокатке.

Таким образом, выявлены особенности определения текущих взаимосвязанных геометрических параметров процесса раскатки кольца большого диаметра и на основании этих данных исследовано напряжённое состояние кольца. Получена система уравнений для определения напряжений в деформированной зоне кольца. Показано, что в случае увеличения диаметра кольца на основании изменения текущих геометрических параметров эти уравнения преобразуются в уравнения прокатки плоской полосы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петросян Г.Л., Петросян А.Г., Моталлеби С.Р. Моделирование процесса раскатки кольца с большим радиусом кривизны аналитическим методом. Сообщение 1. Особенности определения геометрических параметров процесса раскатки кольца // Вестник ИАА.- 2011.-Том 8, № 2.- С. 337-341 (на армянском языке).
2. Ковка и штамповка. Справочник. Т.2. Горячая штамповка /Под ред. Е.И. Семенова . М.: Машиностроение, 1986. 592 с.
3. Sheikh M.A., Palavilayil R.R. An assessment of finite element software for application to the roll-forming process // Journal of Materials Processing Technology. 2006. N180. P. 221–232.
4. Yang H., Wang M., Guo L.G., Sun Z.C. 3D coupled thermo-mechanical FE modeling of blank size effects on the uniformity of strain and temperature distributions during hot rolling of titanium alloy large rings//Computational Materials Science. 2008.11p.
5. Петросян Г.Л., Левонян Г.Л., Хачатрян Г.Г. Исследование процесса прокатки плоской полосы путём моделирования касательными деформированного окружного края //Вестник ГИУА (ПОЛИТЕХНИК): Сборник научных и методических статей. 2010. Т. 2. N1. С.70-73 (на армянском языке).

Петросян Геворг Людвигович – д.т.н., проф., ГИУА, проф. кафедры машиноведения, 0009, Ереван, ул. Теряна, 105. Тел. 094-754-103, gevorglp@seua.am

Петросян Асмик Геворговна – к.т.н., научный сотрудник, ГИУА, 091-90-39-38

Моталлеби Сеид Реза – аспирант ЕГУ, Иран, Тегеран, sr_motallebi@yahoo.com

Поступила в редакцию 15.11.2011