

Прагнення передбачити і прогнозувати якість виготовленої продукції, її відповідність технічним вимогам замовника на стадії проектування технології призводить до розробки різних методів теоретичного аналізу процесів пластичного деформування. Їх метою є встановлення явних закономірностей процесів, що реалізуються за допомогою інтуїтивно зрозумілих математичних функцій.

Сформульовано метод визначення відносних деформацій при локальному формозмінненні замкнутої оболонки обертання способом радіально-ротаційного профілювання. Показано, що на підставі отриманих аналітичних залежностей можливе прогнозування розмірів напівфабрикату на стадії проектування технологічного процесу. На даний час аналітичних виразів, які б оцінювали однозначну залежність деформацій від співвідношення радіусів роликів, заготовки та величини подачі, не існувало. Встановлено, що величина відносних деформацій в трьох взаємноперпендикулярних напрямках залежить від співвідношення діаметральних розмірів деформуючих роликів і початкового діаметра заготовки. Порівняння результатів розрахунку, отриманих в даній роботі, з експериментальними даними та існуючими виразами дає підставу вважати, що даний метод розрахунку володіє прийнятною для виробництва точністю. Це дає можливість керувати полем напружень і деформацій з метою виготовлення однаковоміцного обідку колеса на стадії підготовки виробництва і проектування технологічного процесу. Застосування на практиці даного методу розрахунку дозволить технологам і конструкторам враховувати деформаційне зміцнення після кожного переходу профілювання, визначати операційні розміри напівфабрикатів і прогнозувати товщину готового виробу в радіусних переходах профілю, тобто інтенсифікувати розглянутий процес

Ключові слова: центральний струмок, посадкова полиця, радіально-ротаційне профілювання, обід колеса, деформаційне зміцнення, локальне стоншення

УДК 621.7.043

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139534

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБИДА КОЛЕСА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Р. Г. Пузырь

Доктор технических наук, доцент
Отделение машиностроения*
E-mail: puzyruslan@gmail.com

Д. В. Савелов

Кандидат технических наук, доцент**

В. Т. Щетинин

Кандидат технических наук, профессор
Кафедра отраслевого машиностроения***

Р. В. Левченко

Кандидат технических наук
Автомобильное отделение*

Т. В. Гайкова

Кандидат технических наук**

С. И. Кравченко

Кандидат технических наук, доцент****

С. Г. Ясько

Старший преподаватель****

Р. Г. Аргат

Старший преподаватель**

Ю. Б. Сирая

Преподаватель первой категории
Отделение сварочного и литейного производства*

Е. В. Щипковский

Начальник технологического бюро
ООО НПФ «Техвагонмаш»
пр. Полтавский, 2Д, г. Кременчуг, Украина, 39627
*Колледж Кременчугского национального
университета имени Михаила Остроградского
ул. Чумацкий шлях, 7, г. Кременчуг, Украина, 39621
Кафедра технологии машиностроения*
***Кременчугский национальный
университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600
****Кафедра технологии машиностроения
Полтавский национальный технический
университет имени Юрия Кондратюка
пр. Первомайский, 24, г. Полтава, Украина, 36011

1. Введение

Методы локального пластического деформирования заготовок в холодном состоянии считаются достаточно

производительными и перспективными процессами обработки металлов давлением [1, 2]. Характеризуются снижением усилий за счет ограничения очага пластической деформации и, соответственно, применения маломощного

оборудования, возможностью формоизменения труднодеформируемых металлов, а также изготовлением изделий с заданным комплексом механических характеристик [3, 4].

Радиально-ротационное профилирование является одним из методов локального пластического деформирования замкнутых оболочек, с помощью которого изготавливают тела вращения с заданным профилем в осевом сечении. В основном данный процесс получил широкое распространение как основной при серийном изготовлении стальных ободьев колес транспортных средств и сельскохозяйственной техники [5]. Относительно данного процесса неопределенной остается задача аналитического расчета деформаций и размеров полуфабриката. Это обусловлено совмещением в одном переходе процессов раздачи и обжима, которым подвергаются разные участки заготовки, и, отсюда, их взаимовлиянием на конечные размеры полуфабриката. Наличие зависимостей, устанавливающих связь между геометрией инструмента, заготовки и готового изделия, позволит определить необходимую деформацию на каждом переходе профилирования. Отсюда сокращение сроков технической подготовки производства, экономия энергетических и материальных ресурсов, время на подналадку оборудования, а также научно обоснованные приемы по совершенствованию данного процесса.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Определение деформаций и операционных размеров заготовки при радиально-ротационном способе производства ободьев колес носит достаточно сложный характер и коренным образом отличается от сходных расчетов в традиционных методах листовой штамповки. Так, в работах [6, 7] показано, что коэффициенты обжима и раздачи и, соответственно, деформации однозначно зависят от диаметра заготовки и конечного изделия, а регулируются конусностью пуансона и его диаметром. Аналитическое определение коэффициентов обжима-раздачи затруднений не вызывает. В процессах профилирования листового металла, как наиболее схожего с радиально-ротационным профилированием, компоненты тензора деформаций зависят от геометрических размеров получаемого ручья, который напрямую соотносится с геометрией формовочного инструмента. Это обстоятельство дает возможность рассчитать продольную и поперечную деформации непосредственно от глубины внедрения инструмента на каждой промежуточной операции, вплоть до готового изделия [8, 9]. Так, в работе [10] определены зоны действия наибольших радиальных деформаций методом конечно-численного моделирования для ограниченного интервала типоразмеров профилей. Трудности, которые возникают при определении напряженно-деформированного состояния за очагом пластической деформации, в зоне плавного перехода, преодолеваются также путем численных решений [11].

Сложность определения напряженно-деформированного состояния относительно рассматриваемого процесса изготовления ободьев колес отмечалась ранее в работе [12]. Обусловлена она локальным нагружением заготовки [13]. Так, в работах [14, 15] проанализированы способы и методика подходов различных авторов к определению деформаций при радиально-ротационном профилировании, а также приведены результаты экспериментальных исследований на моделях ободьев колес для изучения поля

деформаций. Показано, что метод сеток дает достоверные результаты, однако требует постановки большого количества опытов и времени на обработку результатов. Предложить производству можно только результаты проведенных исследований, а рекомендовать данную методику не представляется возможным ввиду ее трудоемкости и сложности. Для инженеров-технологов, конструкторов интерес представляют формальные зависимости и однозначный метод определения основных параметров процесса профилирования, расчета заготовок, которые являются актуальными при переходе на изготовление новых типоразмеров ободьев колес. На данный момент украинские производители колес используют накопленный производственный опыт, который заключается в применении эмпирических зависимостей и проведении пробных проходов. Это приводит к увеличенному расходу металла и длительности цикла технической подготовки производства. Поэтому, строгие математические формулировки, учитывающие особенности деформирования оболочек вращения, способны преодолеть перечисленные выше недостатки, так как являются универсальными и применяются для расчета любого типоразмера колеса.

3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является разработка метода определения основных операционных размеров полуфабриката первого перехода, а также компонент тензора деформаций путем представления аналитических зависимостей, которые раскрывают основные закономерности процесса радиально-ротационного профилирования. Эти зависимости должны быть направлены на установление в явном виде связи между начальными размерами заготовки, перемещением деформирующего инструмента и конструкторскими размерами готового изделия. Что, в свою очередь, позволит интенсифицировать техническую подготовку производства.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выявить закономерности и кинематику взаимного перемещения формообразующих роликов, взаимосвязь деформации заготовки с изменением межосевого расстояния силовых валов на основе схематизации процесса радиально-ротационного профилирования;
- определить компоненты тензора деформаций в меридиональном, тангенциальном и радиальном направлении, а также операционные размеры полуфабриката, опираясь на гипотезы о несжимаемости материала и неразрывности деформаций;
- сравнить полученные выражения с экспериментальными данными по замеру деформаций при профилировании и известными аналитическими решениями, которые используют связь напряжений и деформаций по деформационной теории пластичности.

4. Материал и метод исследований по определению поля деформаций при радиально-ротационном профилировании

4.1. Определение взаимного перемещения формообразующих роликов в вертикальном направлении

На основании исследования взаимного перемещения деформирующих роликов при включении подачи

силового вала определялись основные геометрические и технологические факторы, которые оказывают влияние на конечные размеры полуфабриката.

На первом переходе радиально-ротационного профилирования в зависимости от геометрии роликов торцевые участки и прилегающая к ним зона цилиндрической заготовки подвергаются тангенциальному растяжению, а зона центрального ручья – тангенциальному сжатию. При этом $R_{н} > R_0$; $R_p < R_0$ (рис. 1), где R_0 – радиус обечайки [16].

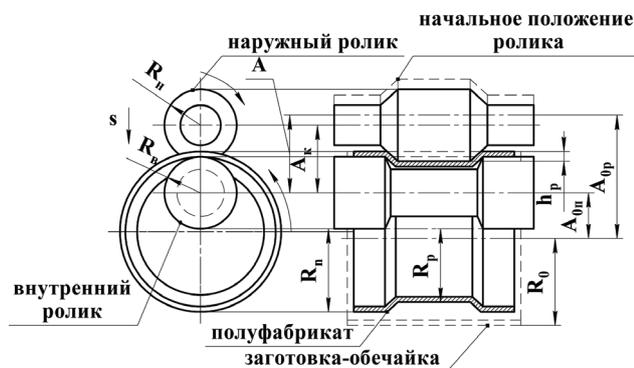


Рис. 1. Деформация полуфабриката формовочными роликами (h_p – глубина ручья; A_{0p} – начальное расстояние между центрами заготовки и наружного ролика; $A_{0н}$ – начальное расстояние между центрами заготовки и внутреннего ролика)

Конечная глубина ручья формируется при непрерывной силовой подаче вала профилировочной машины $h_k = A - A_k$. Конечную глубину ручья также можно выразить следующим образом:

$$h_k = h_n + h_p, \tag{1}$$

где h_n и h_p – глубина зоны полки и зоны ручья соответственно. Таким образом, конечная глубина ручья формируется из двух слагаемых, каждое из которых зависит от геометрических параметров деформирующего инструмента и заготовки.

4. 2. Методика определения компонент тензора деформаций

Для определения компонент тензора деформаций при изготовлении обода колеса были приняты следующие допущения:

- упругие деформации не влияют на величину и распределение деформаций в пластической зоне;
- металл заготовки однороден, несжимаем, обладает одинаковыми механическими свойствами по толщине и периметру;
- на поверхностях главных радиусов кривизны деформации равномерные;
- кинематические перемещения материальных точек заготовки не компенсируются смещениями в результате деформации.

Среднее значение относительной деформации в тангенциальном направлении на i -ом обороте обечайки может быть определено следующей зависимостью (рис. 1):

- зона обжима:

$$\epsilon_{it} = \frac{A_{0p} - (A_{ip})}{A_{0p}} = \frac{(R_n - R_0) - (R_n - R_0 - s_{ip})}{R_n - R_0} = \frac{s_{ip}}{R_n - R_0}; \tag{2}$$

- зона раздачи:

$$\epsilon_{it} = \frac{A_{in} - A_{0n}}{A_{0n}} = \frac{(R_0 + R_b) - (R_0 + R_b + s_{in})}{R_0 + R_b} = \frac{s_{in}}{R_0 + R_b}, \tag{3}$$

где A_{0p} , A_{0n} – начальные расстояния между осями ролика и заготовки в зонах ручья и полки соответственно; R_0 , R_n , R_b – радиусы заготовки, наружного и внутреннего роликов соответственно.

Так как подача силового вала является технологической характеристикой процесса, а сам процесс профилирования характеризуется размерной неопределенностью, то в зависимостях (2), (3) необходимо относительную деформацию выразить через конечный размер h_k . Этот размер задан конструкторским чертежом, согласно (1).

Суммарную относительную деформацию заготовки, зависящую от сближения осей деформирующих роликов, можно выразить следующим образом (рис. 1):

$$\epsilon_{i\text{сум}} = \epsilon_{i\text{обж}} + \epsilon_{i\text{разд}} = \frac{h_k}{R_n + R_b} = \frac{h_n}{R_0 + R_b} + \frac{h_p}{R_n - R_0}. \tag{4}$$

Подставляя в это равенство значение глубины ручья из условия (1), и, проведя несложные преобразования, будем иметь выражение для глубины зоны полки:

$$h_n = h_k \frac{(R_0 + R_b)^2}{(R_n + R_b)^2}, \tag{5}$$

и для зоны ручья:

$$h_p = h_k \left(1 - \frac{(R_0 + R_b)^2}{(R_n + R_b)^2} \right). \tag{6}$$

Окончательно выражения для относительных тангенциальных деформаций примут вид:

– зона обжима:

$$\epsilon_{it} = \frac{h_k}{R_0 + R_b} \left(\frac{(R_0 + R_b)^2}{(R_n + R_b)^2} \right); \tag{7}$$

- зона раздачи:

$$\epsilon_{it} = \frac{h_k}{R_n - R_0} \left(1 - \frac{(R_0 + R_b)^2}{(R_n + R_b)^2} \right). \tag{8}$$

Полученные выражения для тангенциальных деформаций учитывают свойство аддитивности. Однако этим свойством обладают только истинные (логарифмические) деформации. При радиально-ротационном профилировании тангенциальная деформация мала по сравнению с традиционными процессами листовой штамповки и, поэтому, можно принять с небольшой погрешностью $\delta \approx \epsilon$, где δ – логарифмическая деформация [17]. Далее будем использовать свойство аддитивности для отыскания деформаций в оставшихся двух направлениях, не принимая во внимание погрешность в 1–5 % [18].

Интегрируя выражение для неразрывности деформаций при осесимметричном напряженном состоянии, а также определяя постоянную интегрирования из граничного условия $r = R_0$ при $\epsilon_\theta = 0$, будем иметь:

$$\epsilon_r = \epsilon_\theta \left(1 - \frac{r}{R_0} \right), \tag{9}$$

где ϵ_θ , ϵ_r – относительные тангенциальные и радиальные деформации соответственно; r – независимая переменная в направлении радиуса изделия.

Меридиональные относительные деформации находим из уравнения постоянства объема. Тогда окончательно, для составляющих тензора деформаций с учетом знаков и конечных размеров полуфабриката получим:

– зона обжима:

$$\begin{aligned} \epsilon_{it} &= \frac{h_k}{R_0 + R_b} \left(\frac{(R_0 + R_b)^2}{(R_n + R_b)^2} \right), \\ \epsilon_r &= \frac{h_k}{R_0 + R_b} \left(\frac{(R_0 + R_b)^2}{(R_n + R_b)^2} \right) \left(1 - \frac{R_p}{R_0} \right), \\ \epsilon_m &= \frac{h_k}{R_0 + R_b} \left(\frac{(R_0 + R_b)^2}{(R_n + R_b)^2} \right) \left(\frac{R_p}{R_0} \right); \end{aligned} \quad (10)$$

– зона раздачи:

$$\begin{aligned} \epsilon_{it} &= \frac{h_k}{R_n - R_0} \left(1 - \frac{(R_0 + R_b)^2}{(R_n + R_b)^2} \right), \\ \epsilon_r &= \frac{h_k}{R_n - R_0} \left(1 - \frac{(R_0 + R_b)^2}{(R_n + R_b)^2} \right) \left(1 - \frac{R_n}{R_0} \right), \\ \epsilon_m &= \frac{h_k}{R_n - R_0} \left(1 - \frac{(R_0 + R_b)^2}{(R_n + R_b)^2} \right) \left(2 - \frac{R_n}{R_0} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Данные формальные зависимости содержат два новых технологических параметра – это R_n и R_p – конечные радиусы зон посадочной полки и центрального ручья. Определение этих размеров представляет интерес не только с точки зрения отыскания поля деформаций, но и для прогнозирования размеров полуфабриката расчетным путем, не прибегая к постановке пробных проходов.

Выразим относительную деформацию через коэффициенты обжима и раздачи:

$$\epsilon_{it\text{ разд}} = \frac{R_n}{R_0} - 1, \quad \epsilon_{i\text{ обж}} = \frac{R_0}{R_p} - 1. \quad (12)$$

Приравнивая данные формулы с выражениями для тангенциальной деформации (7) и (8), а также, учитывая зависимости для глубины (5), (6), получим определение размеров ручья и полки:

$$R_p = \frac{R_0}{\left(\frac{(R_0 + R_b)^2}{(R_n + R_b)^2} h_k + 1 \right)}, \quad (13)$$

$$R_n = \left(\frac{h_k}{R_n - R_0} \times \left(\frac{(R_0 + R_b)^2}{(R_n + R_b)^2} + 1 \right) \right) R_0. \quad (14)$$

Нужно отметить, что радиальные и меридиональные деформации можно определить лишь на прямых участках профиля полуфабриката, так как в данных формулах не

учитывается изгиб заготовки на радиусах закругления профиля.

5. Результаты исследований по определению деформированного состояния полуфабриката в процессе профилирования ободьев колес

Интерес представляет сравнение полученных результатов – формул (10), (11) – с аналогичными исследованиями в этой области. Так, в работе [19] приведены зависимости для расчета поля напряжений на первом переходе радиально-ротационного профилирования. На основе связи напряжений и деформаций по деформационной теории пластичности также получены выражения для вычисления относительных деформаций для первого перехода профилирования обода колеса.

Для их сравнения проведем расчет деформаций для обода колеса 6^{1/2}Jx15H2, который является типовым представителем узкопрофильных ободьев колес и применяется на автомобилях марки «УАЗ». Конструкторским чертежом заданы следующие размеры: $R_0 = 182$ мм; $R_b = 145$ мм; $R_n = 202,5$ мм; $h_k = 22$ мм. Результаты расчетов по двум методикам приведены на рис. 2. Результаты экспериментального моделирования процесса изготовления ободьев колес, проведенные ранее, представлены в исследовании [15]. Для первого перехода профилирования узкопрофильного колеса они имеют следующее распределение (рис. 3).

Анализ теоретических и экспериментальных кривых показал, что предложенный метод расчета достаточно хорошо коррелирует с данными эксперимента [15] и в некоторых зонах профиля с результатами метода [19]. Так, например, меридиональная относительная деформация возрастает от нуля до максимального своего значения (зона 3 на рис. 3). Затем начинает постепенно понижаться, принимая значение несколько меньшее для зоны 4 по сравнению с зоной 2. На рис. 2, а можно отметить, что меридиональная деформация возрастает также от нуля до своего максимума при $h_k = 22$ мм, но затем, на рис. 2, б, снова продолжится ее рост, т. е. точка экстремума отсутствует. Но величина деформаций при одинаковой глубине ручья всегда будет большей для зоны раздачи по сравнению с зоной обжима. Эта закономерность как раз раскрыта проведенным в данной работе исследованием и подтверждается ранее экспериментальным моделированием процесса [15].

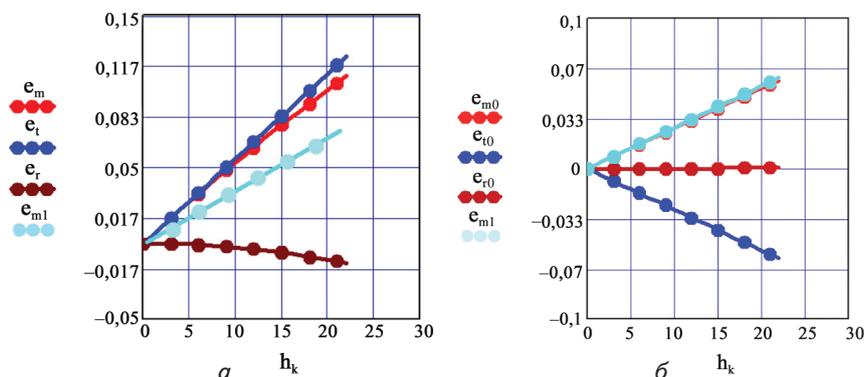


Рис. 2. Распределение компонент тензора деформаций на первом переходе профилирования обода колеса 6^{1/2}Jx15H2: а – зона раздачи; б – зона обжима (e_m, e_{m0} – меридиональные деформации; e_t, e_{t0} – тангенциальные деформации; e_r, e_{r0} – радиальные деформации; e_{m1} – меридиональные деформации по зависимостям [19]; h_k – глубина ручья)

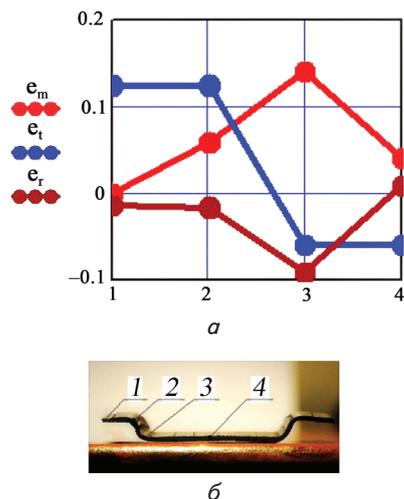


Рис. 3. Распределение деформаций на первом переходе профилирования узкопрофильного колеса (экспериментальные исследования):

a – аппроксимированные графики распределения компонент тензора деформаций; b – зоны на профиле полуфабриката (1–4 – зоны на темплете; e_m – меридиональные деформации; e_t – тангенциальные деформации; e_r – радиальные деформации)

Еще одним немаловажным отличием является простота представленных выражений и их лаконичность по сравнению с решениями [19]. Отсутствие точки максимума на теоретических кривых объясняется игнорированием изгибающими моментами на радиусах закругления профиля, где возникают наибольшие меридиональные и радиальные деформации.

Следует отметить, что все компоненты деформаций зависят от местоположения зон по длине профиля (рис. 3), поэтому формулы, полученные в данной работе, могут выражать только среднюю деформацию по длине характерных участков полуфабриката.

6. Обсуждение результатов исследований по определению деформированного состояния при профилировании ободьев колес

Из графиков (рис. 2, 3) просматривается следующее. Закон постоянства объема не выполняется для зоны раздачи (это объясняется допущением об аддитивности относительных деформаций, которое строго выполняется для логарифмических деформаций). Расчетным путем установлены следующие результаты при $h_k = 22$ мм – $\epsilon_m = 0,11$, $\epsilon_{m1} = 0,061$, $\epsilon_t = 0,123$, $\epsilon_r = -0,013$ (зона раздачи); $\epsilon_m = 0,059$, $\epsilon_{m1} = 0,059$, $\epsilon_t = -0,06$, $\epsilon_r = 0,008$ (зона обжима). Расчетные значения меридиональной деформации по зависимостям (10) и [19] не совпадают для зоны раздачи, что подтверждает раскрытые здесь и выявленные ранее [15] закономерности деформации заготовки на первом переходе профилирования. Зона раздачи получает большие по модулю тангенциальные и меридиональные деформации по сравнению с зоной обжима при установленных соотношениях диаметров наружного и внутреннего ролика.

Большее совпадение между расчетом и экспериментом наблюдается в зоне обжима. Наибольшее расхождение до 10 % характерно для радиальной деформации –

$\epsilon_r = 0,008$ (расчет), $\epsilon_r = 0,009$ (эксперимент), что подтверждает адекватность предложенного метода расчета компонент тензора деформаций и частично согласуется с выводами исследований [20, 21]. Несовпадение результатов экспериментальных [15] и теоретических, представленных в данной работе, разработок можно объяснить принятым допущением о равенстве логарифмических и относительных деформаций, а также интерпретацией результатов экспериментальных исследований.

Поэтому особый интерес представляет дальнейшие теоретические разработки с ужесточенными допущениями, устраняющими несоответствие между разными видами деформаций или переход от относительных к истинным деформациям. Это позволит получить более корректные формальные зависимости и перейти к расчету конечной толщины изделия, которая является лимитирующим фактором процесса профилирования. Однако в выражениях (10), (11) четко видны закономерности изменения компонент деформаций от радиусов инструмента и размеров заготовки, что собственно необходимо для проектирования рационального технологического процесса радиально-ротационного профилирования. Полученные аналитические зависимости позволяют оценить степень влияния каждого технологического и конструкторского фактора процесса на поле деформаций. Именно поэтому, методика принята для практического применения на предприятии СП «Обод» (г. Кременчуг, Украина), специализирующимся на выпуске стальных колес для различных транспортных средств. Основным недостатком данного метода является неопределенность по радиальным и меридиональным деформациям в зонах сопряжения различных участков профиля, что несколько ограничивает его применение при расчетах исходной толщины заготовки.

7. Выводы

1. На основе анализа взаимного перемещения силовых валов профилировочной машины в вертикальном направлении определены начальные, промежуточные и конечные положения осей деформирующего инструмента. Это позволило связать межосевые расстояния валов с радиусами формирующих роликов и подачей и формально выразить перемещения через относительную тангенциальную деформацию заготовки. Такой подход отличается относительной простотой и наглядностью формулировок для отыскания полей деформаций и дает возможность в явном виде определить закономерности их распределения.

2. Предложен метод расчета относительных меридиональных, тангенциальных и радиальных деформаций, основанный на условии неразрывности деформаций для осесимметричного напряженного состояния и условия постоянства объема. С его помощью имеется возможность рассчитать не только величину компонент тензора деформаций, но также определить операционные размеры полуфабриката. Это обстоятельство обеспечивает применение метода в качестве основного при проектировании переходов радиально-ротационного профилирования на стадии технической подготовки производства.

3. Сравнение результатов расчета, полученных в данной работе, с экспериментальными данными [15] и существующими выражениями [19] дает основание полагать, что данный метод расчета обладает приемлемой для производства точностью. Погрешность расчетных данных не превышает

10 % по сравнению с экспериментом и 3–6 % – с выражениями, полученными на основе связи напряжений и деформаций по деформационной теории пластичности. Хотя метод [19] принято считать более точным, но он остается не чувствительным к взаимному влиянию одновременной раздачи и обжима на поле деформаций. Это проявляется в большей деформации зоны посадочных полок по сравнению с зоной монтажного ручья. В данном методе

эта проблема устранена. Причем, простота, лаконичность и наглядность разработанных формулировок делает их удобным инструментом для инженеров-практиков в вопросах подготовки производства. Отличительной особенностью предложенного подхода является возможность определять основные геометрические факторы процесса, оказывающие решающее влияние на конечные размеры полуфабриката и распределение компонент тензора деформаций.

Литература

1. Матвийчук В. А., Алиев И. С. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография. Краматорск: ДГМА, 2009. 268 с.
2. Wang X., Jin J., Deng L. Review: State of the Art of Stamping-Forging Process with Sheet Metal Blank // Journal of Harbin Institute of Technology. 2017. Vol. 24. P. 1–16.
3. Effect of forming parameters on sheet metal stability during a rotary forming process for rim thickening / Wang X., Li L., Deng L., Jin J., Hu Y. // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 223. P. 262–273. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.009>
4. Короткий С. А., Тарасов А. Ф. Систематизация технологических процессов получения листовых деталей с локальным нагружением зоны деформирования // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2008. № 3. С. 99–104.
5. Современное производство колес автотранспортных средств и сельскохозяйственной техники: монография / Чигиринский В. В., Мазур В. Л., Беликов С. Б. и др. Днепропетровск: РИА «Днепр-VAL», 2010. 309 с.
6. Liu Y., Qiu X. A theoretical study of the expansion metal tubes // International Journal of Mechanical Sciences. 2016. Vol. 114. P. 157–165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.05.014>
7. A robust and accurate geometric model for automated design of drawbeads in sheet metal forming / Wang Z., Zhang Q., Liu Y., Zhang Z. // Computer-Aided Design. 2017. Vol. 92. P. 42–57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2017.07.004>
8. Prediction of edge profile of plate during hot cross rolling / Rout M., Pal S. K., Singh S. B. // Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 31. P. 301–309. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.024>
9. Jurkovic M. An investigation of the force and torque at profile sheet metal rolling-input data for the production system reengineering // Tehnicki vjesnik-Technical Gazette. 2015. Vol. 22, Issue 4. P. 1029–1034. doi: <https://doi.org/10.17559/tv-20150310092726>
10. Numerical Simulation on Spinning Forming Process of Automotive Wheel Rim / Bi D. S., Yang G., Chu L., Zhang J., Wang Z. H. // Materials Science Forum. 2011. Vol. 704-705. P. 1458–1464. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.704-705.1458>
11. Faraj M., Xiaoxing L. Determination of springback in sheet metal forming // The annals of «dunarea de jos» university of galati. 2009. P. 129–134.
12. Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece / Puzyr R., Savelov D., Argat R., Chernish A. // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Issue 1. P. 27–32.
13. Jurković M. Mustafić E. Mathematical modeling of the torque driving electric motor production line to the profiling forming thin sheets // Proceedings Int. Scientific Conference on Production Engineering. Budva, 2013. P. 47–52.
14. A new rotary forming process for rim thickening of a disc-like sheet metal part / Jin J.-S., Deng L., Wang X.-Y., Xia J.-C. // Journal of Materials Processing Technology. 2012. Vol. 212, Issue 11. P. 2247–2254. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.013>
15. Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims / Puzyr R., Haikova T., Trotsko O., Argat R. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 4, Issue 1 (82). P. 52–60. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76225>
16. Experimental Study of the Process of Radial Rotation Profiling of Wheel Rims Resulting in Formation and Technological Flattening of the Corrugations / Puzyr R., Haikova T., Majernik J., Karkova M., Kmec J. // Manufacturing Technology. 2018. Vol. 18, Issue 1. P. 106–111. doi: <https://doi.org/10.21062/ujep/61.2018/a/1213-2489/mt/18/1/106>
17. Chigirinsky V. Mechanisms of plastic deformation in case of production of thin-walled rolled stock of the special purpose // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Issue 11. P. 222–230.
18. Peculiarities of vibrational press dynamics with hard-elastic restraints in the working regime of metal powders molding / Savelov D., Dragobetsky V., Puzyr R., Markevych A. // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Issue 2. P. 67–74.
19. Пузырь Р. Г., Сосенушкин Е. Н., Яновская Е. А. Установление поля напряжений при радиально-ротационном профилировании цилиндрической заготовки без учета радиусов закругления деформирующего инструмента // Вестник МГТУ «Станкин». 2013. № 4 (27). С. 42–47.
20. Failure analysis of cracking in wheel rims – material and manufacturing aspects / Bhattacharyya S., Adhikary M., Das M. B., Sarkar S. // Engineering Failure Analysis. 2008. Vol. 15, Issue 5. P. 547–554. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.04.007>
21. Kil T.-D., Lee J.-M., Moon Y.-H. Quantitative formability estimation of ring rolling process by using deformation processing map // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 220. P. 224–230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.01.006>