

разработанной математической модели определения шероховатости поверхности при алмазном шлифовании.

Список литературы: 1. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В.Н. Бакуля. – К.: Наук. думка, 1976. – 351 с. 2. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. – К.: Наук. думка, 1984. – 272 с. 3. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с. 4. Новиков Ф.В., Ткаченко В.П. Кинематика формообразования торцевой поверхности вращающегося кольца при шлифовании. – Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. – Труды 7-й Межд. научн.-техн. конф., 27-28 мая 2003 г. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2003. – С. 29-33. 5. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

Надійшла до редколегії 29.10.2013р.

УДК 621.923

Определение шероховатости обработанной поверхности при шлифовании / Дитиненко С. А., Новиков Ф. В., Иванов И. Е. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 43 (1016). – С. 78–86. Бібліогр.: 5 назв.

Наведено математичну модель визначення шорсткості поверхні при алмазному шліфуванні й виявлені умови її зменшення, які полягають головним чином у збільшенні величини лінійного зношування зерен до моменту їхнього об'ємного руйнування й наступного випадіння зі зв'язки круга. Показано можливість істотного зменшення шорсткості поверхні за рахунок створення на алмазному крузі плосковершинних зерен, що відповідає експериментальним даним.

Ключові слова: шліфування, твердий сплав, алмазний круг, електроерозійна правка, режими шліфування, зношування зерна, математична модель, шорсткість поверхні.

A mathematical model for determining surface roughness in diamond grinding and identified the conditions for its reduction, consisting mainly to increase the magnitude of the linear wear of grains until they surround the destruction and subsequent loss of the bunch circle. The possibility of a substantial reduction of surface roughness by creating a diamond circle of flat beans, which corresponds to the experimental data.

Keywords: grinding, hard alloy, diamond wheel, electro-dressing, grinding modes, deterioration of grain, the mathematical model, the roughness of the surface.

УДК. 621.7.044

В. В. ДРАГОБЕЦКИЙ, докт. техн. наук, проф., КрНУ, Кременчуг;
Р. Г. ПУЗЫРЬ, канд. техн. наук, доц., КрНУ, Кременчуг;
Р. Г. АРГАТ, ст. преподаватель, КрНУ, Кременчуг.

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЗАГОТОВОК

Показано, что методы теоретического исследования процессов обработки металлов давлением должны быть обоснованы с позиций ожидаемой точности получаемых результатов и физической сущности явлений, происходящих в очаге деформации, которые возникают в зависимости от способа приложения усилий, геометрии инструмента и заготовки, свойств деформируемого металла, условий трения между контактирующими поверхностями. Сложность математических моделей, реализация алгоритма и в конечном итоге адекватность решения зависит от принятых упрощений и схематизации процессов деформирования.

Ключевые слова: заготовка, деформация, профилирование, обод.

Введение. Изучение распределения напряжений, деформаций и перемещений от заданной нагрузки в любой момент нагружения, определение границы между упругой и пластической зонами, определение остаточных напряжений и деформаций при частичном и полном снятии нагрузки при деформировании цилиндрических заготовок для ободьев колес является частной задачей математической теории пластичности и для ее решения необходимо привлекать весь комплекс накопленных знаний в области обработки металлов давлением и теории оболочек.

Анализ последних исследований и литературы. Работы, которые посвящены вопросам определения напряженно-деформированного состояния участков заготовки в процессе радиально-ротационного профилирования в общем случае позволяют судить о степени изученности данного вопроса, поэтому представляют большой интерес и дальнейшие исследования невозможны без учета результатов этих исследований.

В работах [1, 2] представлен подход для определения величины нормальных напряжений, действующих в очаге деформации, основанный на решении уравнений равновесия для осесимметричного деформирования. Здесь, до формулирования принимаемых допущений проводится анализ схем напряжений и деформаций при радиально-ротационном профилировании и принимается осесимметричная схематизация очага деформации, решения получатся непосредственным интегрированием уравнений равновесия и имеют вид

$$\sigma_m = \frac{2f\beta\sigma_s R_e l_i}{(R_e - t_i)(R_n + R_e)}, \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\beta\sigma_s (R_e - 2t_i)}{(R_e - t_i)}, \quad (2)$$

1) для зоны растяжения,

$$\sigma_m = \frac{2f\beta\sigma_s l_i}{R_n + R_e + 2fl_i}, \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_m - \beta\sigma_s, \quad (4)$$

2) для зоны сжатия;

где σ_s – напряжение текучести;

$f = 0,3$ – коэффициент контактного трения;

β – коэффициент, учитывающий влияние среднего главного напряжения;

R_e, R_n – внутренний и наружный радиусы полуфабриката;

$t_i \approx t_3$ – текущая толщина стенки;

l_i – текущая длина элемента полки.

В работе [3] и аналогичных исследованиях [4] произведен обширный анализ процесса радиально-ротационного профилирования и показано, что методы получения ободьев колес из цилиндрической обечайки не имеют аналогов в обработке металлов давлением, потому что они включают одновременную изменчивость операций в одном переходе, аналогичных изгибу листа, вытяжке с утонением, обкатке (прокатке) отдельных элементов,

отбортовке и т.д. Причем на разных стадиях процесса комбинации от различных воздействий на деформируемую заготовку изменяются. Делается вывод, что при решении задачи напряженно-деформированного состояния при радиально-ротационном профилировании необходимо учитывать многовариантность комбинаций действия инструмента на заготовку. Однако, указывается, что в наиболее общем случае процесс деформации тонкой цилиндрической оболочки, находящейся под действием нагрузки, отличной от симметричной и обратно симметричной, можно рассчитать, используя уравнения равновесия в форме

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\alpha}(RN_1) - N_2 \frac{dR}{d\alpha} + Rk_1Q_1 \pm \mu pR &= 0, \\ pR - (k_1N_1 + k_2N_2)R + \frac{d}{d\alpha}(RQ_1) &= 0, \\ -\frac{d}{d\alpha}(RM_1) + M_2 \frac{dR}{d\alpha} + RQ_1 &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где α – линейная координата;

p – внешняя распределенная нагрузка;

$$k_1 = -\frac{d^2R}{dz^2} \left[1 + \left(\frac{dR}{dz} \right)^2 \right]^{-3/2}, \quad k_2 = R \left[1 + \left(\frac{dR}{dz} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

– главные значения кривизны срединной поверхности в меридиональном и широтном сечениях соответственно;

μ – коэффициент трения;

N_1, N_2, M_1, M_2, Q_1 – внутренние силы и моменты, отнесенные к единице длины.

Данные уравнения равновесия представляют собой упрощенный вариант уравнений равновесия моментной теории оболочек вращения при осесимметричном деформировании, так как отсутствуют члены, содержащие производные по одной из координат. Решения получаются путем приравнивания нулю моментов M_1 и M_2 , а также внутреннего усилия Q_1 с использованием уравнения пластичности Треска-Сен-Венана и вычисления напряжений по внутренним усилиям. При этом производится анализ напряженно-деформированного состояния на каждом из участков с целью применения одного из видов условий перехода заготовки в пластическое состояние ($\sigma_\theta = -\sigma_s$ или $\sigma_\theta - \sigma_m = \sigma_s$). Формулы для определения нормальных напряжений имеют вид:

1) для операций формирования цилиндрического участка

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \mp \left(\sigma_s - \frac{l}{C_1 r} \right), \\ \sigma_t &= \mp \sigma_s, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{P}{S} = \mp \left[\sigma_t \left(\frac{l}{R_m} + \frac{l}{R_t} \right) - \frac{l}{R_m C_l r} \right], \quad (7)$$

2) для операций профилирования бортов

$$\sigma_m = \pm (C_2 - \sigma_s \ln r), \quad (8)$$

$$\sigma_t = \mp (\sigma_s - C_2 + \sigma_s \ln r), \quad (9)$$

$$\frac{P}{S} = \mp \left[\frac{\sigma_s}{Rt} - (C_2 - \sigma_s \ln r) \left(\frac{l}{R_m} + \frac{l}{Rt} \right) \right], \quad (10)$$

где C_1 и C_2 – произвольные постоянные.

В работах [5, 6] показано, что участки профилируемой заготовки пластически деформируются в условиях плоской деформации и осесимметричного напряженного состояния. Приводится схема решения с помощью метода гармонических функций, где для распределения нормальных и касательных напряжений в очаге деформации получены следующие решения

$$\begin{aligned} \sigma_x = \sigma_m &= C_\sigma \exp \theta' \cdot \cos A\Phi + \sigma_0 + f(y) + C, \\ \sigma_y = \sigma_\theta &= -C_\sigma \exp \theta' \cdot \cos A\Phi + \sigma_0 + f(x) + C, \\ \tau_{xy} &= H_\sigma \cdot \exp \theta' \cdot \sin A\Phi, \end{aligned} \quad (11)$$

где $A\Phi$ – гармонические функции, определяемые решением задачи;

θ' – гармонические функции, определяемые решением задачи и удовлетворяющие уравнению Лапласа;

C_σ – постоянная, определяющая напряженное состояние среды;

σ_0 – среднее напряжение; $f(x), f(y)$,

C – переменные и постоянная интегрирования.

Данные решения удовлетворяют системе уравнений равновесия, пластичности, неразрывности скоростей деформаций и связи скоростей деформаций с напряжениями. Математически показано, что решение задачи определения напряжений в очаге деформации при профилировании ободьев колес существует.

Компоненты деформаций предложено находить из зависимости между разностями главных напряжений и деформаций, вытекающих из подобия кругов Мора.

Из представленного обзора по аналитическому определению поля напряжений и деформаций при радиально-ротационном профилировании ободьев колес следует, что по данному вопросу имеется небольшое количество исследований, в основном направленных на решение уравнений равновесия участка заготовки совместно с условием пластичности и неразрывности деформаций. Напряженное состояние принимается плоским с осевой симметрией, что значительно упрощает математические трудности

интегрирования уравнений равновесия и обеспечивает достаточно точное и простое решение. Но в тоже время, в действительности, процесс деформирования заготовки обода колеса представляет собой вариант локального нагружения в каждый последующий момент времени участка (2–4% боковой поверхности) замкнутой оболочки вращения и для более точного описания напряженно-деформированного состояния в процессе деформации необходимо учитывать изгибающие моменты, возникающие в местах приложения усилий, что невозможно без привлечения математического аппарата теории оболочек вращения. Это уточнит полученные ранее решения и позволит более широко раскрыть суть явлений, происходящих в очаге деформации и за его пределами. В то же время следует обратить внимание и на более простые варианты теорий, таких как теория деформирования балок и безмоментная теория оболочек вращения, с помощью которых возможно получение упрощенных вариантов решения поставленной задачи.

Цель исследований, постановка проблемы. Целью данных исследований является приближение теоретического анализа к физической сущности явлений при радиально-ротационном профилировании замкнутых оболочек вращения на основе всестороннего анализа процесса с учетом основных технологических и геометрических факторов.

Материалы исследований. Так как заготовка для обода колеса представляет собой оболочку вращения: на первом переходе профилирования – цилиндрическая без предварительной осадки и коническая после осадки (раздачи); на втором и последующих переходах – ступенчатая, сочетающая в себе различные поверхности вращения (полуконус, усеченный конус, цилиндр), то теоретический анализ деформирования заготовки на первый взгляд, как показано выше, можно проводить с привлечением математического аппарата осесимметричного деформирования тонколистовых заготовок. Но, с другой стороны, это оболочка вращения, которая испытывает при деформировании не только деформации растяжения и сжатия, но и изгибающие моменты, сдвигающие и перерезывающие усилия. Поведение геометрически схожих тел под действием различного вида нагружения подробно рассматривается теорией оболочек вращения, допущения и гипотезы которой используются в приведенных выше исследованиях, что является весьма важным результатом. Но в то же время, приведенные выше методы не в полной мере учитывают условия деформирования и физической сущности явлений, происходящих в очаге деформации и за его пределами.

Например, исходя из зависимостей (1–4) следует, что тангенциальные и меридиональные напряжения равны по окружному сечению заготовки в любой ее точке и все ее сечение переходит в пластическое состояние. Но на самом деле, заготовка испытывает пластическое формоизменение только в зоне приложения нагрузки, а остальная часть, по-видимому, деформируется упруго. Об этом можно судить из схемы нагружения заготовки обода колеса, приведенной на рис.

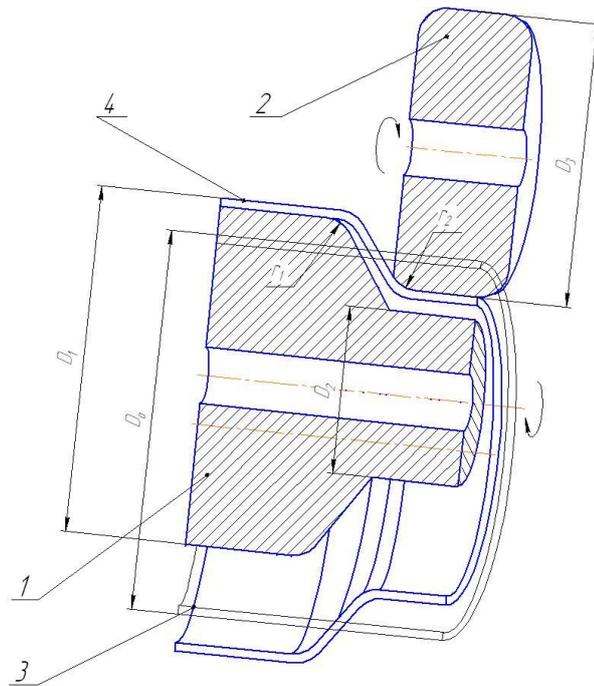


Рис. – Схема радиально-ротационного профилирования обода колеса: 1–внутренний ролик; 2–наружный ролик; 3–заготовка; 4–полуфабрикат.

Результаты исследований. Анализируя рисунок 1, можно сделать вывод, что все элементы полуфабриката испытывают пластические деформации (зона полок–деформации растяжения в тангенциальном и меридиональном направлении, зона ручья – сжатие в тангенциальном и растяжение в меридиональном направлении, в переходных зонах к перечисленным напряжениям добавляется изгиб), но только в месте их контакта с инструментом, а остальная часть заготовки, которая не контактирует с инструментом находится, по-видимому, в условиях упругой деформации. Тогда, если использовать допущение о плоском напряженном состоянии, в очаге деформации необходимо отказаться от осесимметричности нагружения, что влечет за собой усложнение дифференциальных уравнений равновесия из-за учета напряжений сдвига, которые появляются вследствие несимметричности и необходимости интегрирования по двум переменным.

В процессе деформации на начальной цилиндрической заготовке обода колеса формируются различные поверхности вращения, которые повторяют профиль инструмента. Для более точной оценки распределения напряжений и деформаций целесообразно полуфабрикат разделить на простые геометрические фигуры, из которых он состоит, а отброшенные части заменить на расчетной семе реактивными силами. Поэтому уравнения равновесия для каждого участка заготовки будут различными, в зависимости от формы образующейся поверхности.

Так, например, для цилиндрического участка заготовки, учитывая, что $\frac{1}{R_1} = 0$, $\frac{1}{R_2} = \frac{1}{r}$, $A_1=r$ и $A_2=r$ уравнения равновесия будут иметь вид [7]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} + \frac{\partial S_2}{\partial \varphi} + r q_1 &= 0; \\ \frac{\partial S_1}{\partial \xi} + \frac{\partial N_2}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial H_1}{\partial \xi} + \frac{\partial M_2}{\partial \varphi} \right) + r q_2 &= 0; \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial M_1}{\partial \xi} + \frac{\partial H_2}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial H_1}{\partial \xi} + \frac{\partial M_2}{\partial \varphi} \right) - N_2 + r q_n &= 0. \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где $\xi = \frac{x}{r}$, $\varphi = \frac{y}{r}$ – безразмерные координаты.

Но и в этом случае получить замкнутое аналитическое решение в случае локального нагружения довольно затруднительно, поэтому дальнейшее упрощение уравнений равновесия проводили с помощью полубезмоментной теории В.З. Власова [8].

Стремление к упрощению моментной теории цилиндрических оболочек и незначительность в некоторых случаях моментов M_1 , и H_1 , H_2 , а следовательно, и незначительность Q_1 привели В.З. Власова к созданию так называемой полубезмоментной теории цилиндрических оболочек. В этой теории, кроме общих гипотез технической теории оболочек Кирхгофа–Лява, введены дополнительные допущения, которые поясняются В.В. Новожиловым [9], следующим образом. В достаточно длинной цилиндрической оболочке все функции, описывающие напряженно-деформированное состояние, изменяются вдоль образующей цилиндрической поверхности значительно более плавно, чем в направлении направляющей. Вследствие этого производные $\frac{\partial^2 Q}{\partial^2 \xi}$ намного меньше, чем $\frac{\partial^2 Q}{\partial^2 \varphi}$, и, таким образом, первыми можно пренебречь по сравнению со вторыми.

Уравнения равновесия с учетом приведенных допущений будут иметь следующий вид [8] (при этом учитывается однородность системы)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} + \frac{\partial S}{\partial \varphi} &= 0; \\ \frac{\partial S}{\partial \xi} + \frac{\partial N_2}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial M_2}{\partial \varphi} &= 0; \\ \frac{1}{r} \frac{\partial^2 M_2}{\partial \varphi^2} - N_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Если выразить усилия через параметры деформации и в полученных формулах последние заменить соответствующими выражениями через составляющие перемещения, то можно прийти к разрешающей системе уравнений полубезмоментной теории оболочек.

Выводы. Так как заготовки для ободьев колес представляют собой цилиндрические оболочки средней длины и в процессе их деформации образуются цилиндрические поверхности, то к анализу напряженно-деформированного состояния в условиях локального деформирования

целесообразным является применение данных статико-геометрических уравнений на цилиндрических участках. На участках конических и торовых поверхностей будем пользоваться уравнениями равновесия для соответствующих тел вращения, заменяя реальную картину деформирования расчетными схемами и прикладывая к элементам заготовки усилия и моменты отброшенной части полуфабриката.

Список литературы. 1. *Потекушин Н.В.* Исследование напряжений при радиальном профилировании заготовок на первых переходах / *Н.В. Потекушин, Э.З. Сайфулин.* – В кн.: Обработка металлов давлением. Свердловск, УПИ.– 1974. – вып. 2. – С. 111–114. 2. *Потекушин Н.В.* Листовая штамповка / *Н.В. Потекушин.* – Челябинск, 1977. – 60 с. 3. *Коноваленко А.Д.* Исследование усилий при изготовлении широкопрофильных ободьев колес / *А.Д. Коноваленко* // Математичні проблеми технічної механіки: Тез. допов. другої Всеукраїн. наук. конф. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2002. – С.70. 4. *Драгобецкий В.В.* Учет влияния изменения толщины листовой заготовки в процессе деформирования / *В.В. Драгобецкий., А.А. Зюков, А.Д. Коноваленко* // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2005 – Вип. 2 (31) С. 61–62. 5. *Чигиринский В.В.* Современное производство колес автотранспортных средств и сельскохозяйственной техники: [Монография] / *В.В. Чигиринский, В.Л. Мазур, С.В. Беликов и др.* – Днепропетровск: РИА «Днепр-VAL», 2010. – 309 с. 6. *Чигиринский В.В.* Производство высокоэффективного проката: [Монография] / *В.В. Чигиринский, В.Л. Мазур, Г.В. Бергеман и др.* – Днепропетровск: РИА «Днепр-VAL», 2006. – 262 с. 7. *Филин А.П.* Элементы теории оболочек / *А.П. Филин.* – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1975. – 256 с. 8. *Власов В.З.* Избранные труды. Т.1 / *В.З. Власов.* – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 528 с. 9. *Новожилов В.В.* Теория тонких оболочек / *В.В. Новожилов.* – Л.: Судпромгиз, 1951. – 344 с.

Надійшла до редколегії 28.10.2013

УДК 621.7.044

Выбор и обоснование методов теоретических исследований процесса деформирования осесимметричных заготовок / Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г., Аргат Р. Г. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 43 (1016). – С. 86–93. Бібліогр.: Бібліогр.: 9 назв.

Показано, що методи теоретичного дослідження процесів обробки металів тиском повинні бути обґрунтовані з позицій очікуваної точності одержуваних результатів і фізичної суті явищ, що відбуваються в осередку деформації, які виникають в залежності від способу докладання зусиль, геометрії інструменту та заготовки, властивостей деформованого металу, умов тертя між контактуючими поверхнями. Складність математичних моделей, реалізація алгоритму і в підсумку адекватність рішення залежить від прийнятих спрощень і схематизації про процесів деформування.

Ключові слова : заготовка, деформація, профілювання, обід.

It is shown that the methods of theoretical study of metal forming processes must be justified from the standpoint of the expected accuracy of the obtained results and the physical nature of the phenomena occurring in the deformation zone, which arise depending on the method of focus, the geometry of the tool and the workpiece, the properties of deformed metal, conditions of friction between the contacting surfaces. The complexity of the mathematical models and the implementation of the algorithm in the final- result, the adequacy of the solutions depends on the adoption of a simplified and schematic processes of deformation.

Keywords: blank, deformation, forming, rim.