



УДК 621.7.044

Драгобецкий В.В., Пузырь Р.Г., Гайкова Т.В., Аргат Р.Г.

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского. Украина, г. Кременчуг

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ВЫТЯЖКИ
И ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА С ЦЕЛЬЮ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ
В ОПЕРАЦИЯХ РАДИАЛЬНО-РОТАЦИОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ
ЗАМКНУТЫХ ОБОЛОЧЕК ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ
КОЛЕСНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

В статье приводится анализ процессов листовой штамповки (вытяжки), профилирования листового материала и радиально-ротационного профилирования оболочек. Показано, что хотя рассматриваемые процессы обладают сходными схемами напряженного и деформированного состояний, однако для их интенсификации, сокращения количества переходов деформирования или для приложения дополнительных воздействий с целью уменьшения разнотолщинности готового изделия, следует учитывать геометрические размеры и форму исходной заготовки и характер приложения нагрузки. Показано, что технологические приемы, с помощью которых удаётся устранить утонение металла в опасных зонах при вытяжке и профилировании листового металла, совершенно не работают при их применении в операциях радиально-ротационного профилирования. Проводится сравнительный анализ методов производства ободьев колес и обосновывается необходимость смещения акцента исследований в сторону теоретических. Получена зависимость для расчета величины меридиональных напряжений путем решения приближенных уравнений равновесия цилиндрической оболочки методом подстановки двойных тригонометрических рядов. Анализ формальной зависимости показал, что при деформировании замкнутой оболочки распределение напряжений и деформаций носит волновой характер и управлять им возможно после тщательного изучения эпюр возникающих нагрузок и деформаций в характерных сечениях профиля в меридиональном и тангенциальном направлении.

Ключевые слова: вытяжка; профилирование; сталь; заготовка; оболочка; напряжения

Введение

Современное производство колес для легковых и грузовых автомобилей основывается на инновационных технологиях листовой и объемной штамповки, а также литья, что обуславливает соответствующий комплекс эксплуатационных характеристик производимых колес.

Существующие технологии изготовления колес транспортной техники обеспечивают функциональную надежность колеса в процессе работы, но каждой технологии присущи как преимущества, так и недостатки, которые оказывают влияние на качество готового изделия. Так, стальные колеса, изготовленные методами листовой штамповки (раздача цилиндрической заготовки и профилирование между парой вращающихся роликов), обладают достаточной пластичностью, что предотвращает разрушение колеса при ударе об препятствие и обеспечивает безопасность с этой точки зрения водителю и пассажирам в аварийных ситуациях. Они изготавливаются из низкоуглеродистых и низколегированных сталей

08кп, 10пс, 15ЮА, 08ГСЮТ, 07ГФЮ, что обеспечивает их меньшую стоимость по сравнению с колесами, из других материалов. Стальные колеса для автомобилей, несмотря на высокую конкуренцию со стороны легкосплавных до сих пор по мировому объему производства удерживают мировое лидерство. Однако они обладают и рядом недостатков: невысокая коррозионная стойкость, которая устраняется путем нанесения различных красок и эмалей; большая масса колеса, что является следствием несовершенства технологии изготовления. Производители колес стремятся всеми способами уменьшить массу колеса, так как оно входит в неподрессоренную часть автомобиля, а уменьшение неподрессоренной массы ведет к снижению динамических нагрузок, нагрузки на рулевое управление, увеличению плавности хода и повышению контакта колес с дорогой на неровностях, также снижение массы улучшает инерционные характеристики (разгон-торможение) и способствует экологической безопасности (снижение вредных выбросов) [1].

Поэтому это стремление к снижению веса воплотилось в применении новых материалов с более низким удельным весом, по сравнению со сталью. В 60-х годах XX века для производства колес начали применять сплавы алюминия и позже сплавы магния. Наиболее применяемая технология – литье под низким давлением с противодавлением. Удельный вес алюминия $2,69 \text{ кг/см}^3$, железа $7,86 \text{ кг/см}^3$, т.е. почти в 3 раза меньше, отсюда и перспективы для снижения веса. Литые алюминиевые колеса обеспечивают повышение прочностных характеристик изделия в 1,5 раза, улучшение отвода тепла от тормозных механизмов по сравнению со стальными, широкие возможности дизайна (изделию можно придать сложные геометрические формы), снижение веса до 20%. Магниевого литые колеса имеют еще лучшие конструктивные характеристики, чем алюминиевые и железные – сплавы магния хорошо поглощают вибрации, немагнитны, не дают искры при трении и ударах. Удельная жесткость при изгибе и кручении у них на 20 % выше, чем у алюминиевых сплавов и на 50 %, чем у стали, удельная вибрационная прочность в 100 раз больше, чем у дуралюмина и в 20 раз больше, чем у легированной стали. Удельный вес равен $1,74 \text{ кг/см}^3$, что в 1,5 раза меньше чем у алюминия и в 4,51 раза меньше чем у железа [2]. Но основным недостатком литых колес является то, что при ударах оно не деформируется пластически, а разрушается с образованием многочисленных трещин по границам зерен. Сюда же можно отнести и высокую цену по сравнению со стальными колесами, которая определяется используемыми материалами.

Применение горячей объемной штамповки позволило производителям легкосплавных колес получить изделия, которые обладают преимуществами стальных и литых колес. Технология изготовления включает горячую штамповку элементов обода и диска поэтапно с промежуточным нагревом перед каждой деформацией, что формирует необходимую волокнистую структуру, которая и придает колесу необходимой прочности и пластичности. Дальнейшая обработка резанием для придания полуфабрикату окончательной формы обеспечивает не подрезание продольных волокон структуры. Эта технология дает исключительно высокую прочность и жесткость конструкции. Штампованное колесо способно выдерживать сильнейшие удары, оно не разрушается, как литое, а гнется без образования трещин, что, повышает безопасность. Кроме того, оно очень легкое. Для сравнения: стальной штампованный диск, для 7-й модели BMW весит 9 кг, литой алюминиевый – 7,8 кг, а кованный алюминиевый – 6,8 кг. В этом отношении максимальный выигрыш технических характеристик получают при использовании в качестве материала магниевого сплава. Кованные магниевого сплава колеса назы-

вают «колесами будущего». Их демпфирующая способность в несколько десятков раз выше, а масса на 35% ниже, чем у кованных алюминиевых. Два недостатка кованных колес – это их цена, а из магниевых сплавов еще и низкая коррозионная стойкость. Поэтому использование магниевых колес ограничено, их применяют в основном на спортивных и гоночных автомобилях [4].

Но все-таки сегмент рынка, где используются стальные штампованные колеса, остается достаточно большим, и, будет оставаться таким еще долгое время. Это относится к грузовому транспорту, автобусам, сельскохозяйственной технике, где используются широкопрофильные ободья большого диаметра. Производители стальных штампованных колес совершенствуют существующие технологии и применяют новые материалы для их производства для того, чтобы улучшить технические характеристики продукции и вернуть утраченные позиции на рынках сбыта для легковых автомобилей. В последнее время для производства дисков колес как грузовых, так и легковых автомобилей большое применение получают двухфазные стали. Применяются новые марки стали DP600 и DR600, которые позволяют уменьшить вес штампованного колеса на 20%, так что обод размера 6SJx15 весит 6,75 кг при сохранившейся стоимости, что лишь на 1,25 кг тяжелее более дорогого алюминиевого конкурента. Испытывают и биметаллическое стальное колесо, заготовка для которого сваренная лазером из полос двух различных сортов стали по технологии «Tailored Strip», которое весит всего 5,3 кг, то есть легче алюминиевого [3].

Что касается технологий изготовления, а именно наиболее применяемых в производстве стальных колес – радиально-ротационного профилирования ободьев колес и вытяжки колесных дисков, то и они также непрерывно совершенствуются. Для технологии вытяжки дисков применяются хорошо разработанные приемы, позволяющие уменьшить утонение металла в радиусных переходах изделия, увеличить степень деформации на одном переходе, где применяют смазочные материалы, которые переводят режим трения между заготовкой и матрицей в гидродинамический, совершенствуют геометрию инструмента, применяют комбинированную вытяжку в специальных матрицах, вытяжку с подпором торца заготовки, с гидродинамическим подпором, пульсирующую вытяжку и т.д. Что касается технологий радиально-ротационного профилирования, то применение приемов, которые присущи для интенсификации операций листовой штамповки и профилирования листового материала не приводит к ощутимым результатам. Объясняется это, скорее всего тем, что заготовкой для обода колеса является замкнутая оболочка вращения и при ее деформировании она испытывает пластиче-

ские деформации в зоне приложения усилий, а за очагом деформации происходит искажение формы поперечного сечения упруго, т.е. заготовка ведет себя как объемная конструкция, а не листовая заготовка, как в меридиональном, так и в тангенциальном направлении. Поэтому необходимо акцент исследований по данному вопросу сместить в сторону теоретических, чтобы на их основе выработать комплекс теоретически обоснованных технических решений.

Цель

Основным вопросом при пластическом формоизменении заготовок является определение напряженно-деформированного состояния в любой точке участков полуфабриката и определение основных параметров процесса, которые оказывают влияние на изменение поля напряжений и деформаций.

Исследование

Исследования, посвященные этому вопросу при радиально-ротационном профилировании, основаны

на гипотезе жесткопластического, изотропного; гипотезы Киргоффа-Лява, которые сводят деформацию оболочки к деформации ее срединной поверхности; связь между напряжениями и деформациями по деформационной теории пластичности; условие пластичности для плоского напряженного состояния по гипотезе максимальных касательных напряжений; толщина металла не изменяется в процессе деформации, очаг деформации рассматривался в установившемся статическом режиме, не учитывается трение между вращающимися роликами и заготовкой и изгибающие моменты, действующие в меридиональном тангенциальном направлении, принимается, что заготовка пластически деформируется только в области действия инструмента, остальная часть заготовки деформируется упруго. При этом в очаге деформации материал заготовки – жесткопластический, за его пределами – упругий, подчиняющийся закону Гука.

Схема деформирования заготовки обода колеса изображена на рисунке 1.

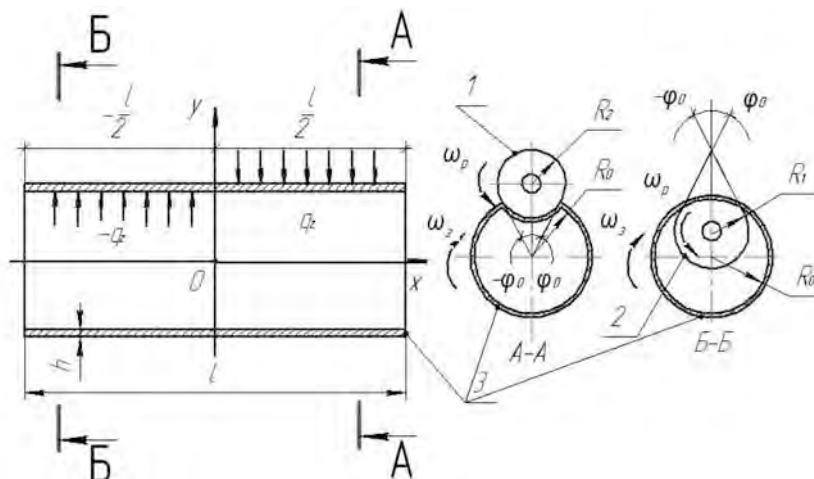


Рис. 1. Профилирование заготовки в обод (1–верхний ролик, 2–нижний ролик, 3–заготовка)

на положениях теории пластичности, теории листовой штамповки и механики сплошных сред [5, 6, 7]. Эти исследования имеют как присущие только им преимущества, так и недостатки. В первых двух не учитывается локальность приложения усилия при профилировании, хотя здесь вводятся поправочные коэффициенты или протяженность очага деформации, что позволяет получить достаточно простые и наглядные решения, в последнем – задача решается в общем виде и удовлетворяет условиям равновесия, пластичности и совместности деформаций, однако не позволяет в явном виде учитывать влияние геометрических и технологических факторов на распределение напряжений.

Для определения напряжений и деформаций на первой операции радиально-ротационного профилирования принимали следующие допущения: материал заготовки принимался как идеальный упру-

Исходя из уравнений безмоментной теории цилиндрических оболочек, будем иметь [8]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial s} &= 0, \\ \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial N_s}{\partial s} &= 0, \\ N_s &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где N_x – нормальное усилие, действующее в меридиональном направлении;

N_s – нормальное усилие, действующее в тангенциальном направлении;

S – касательное усилие, действующее в плоскости XOS .

Нагрузку, действующую на заготовку, в уравнениях равновесия не учитываем. Так как $N_2=0$, проинтегрируем второе уравнение системы (1) по x

$$S = f_1(\varphi) \quad (2)$$

где $f_1(\varphi)$ – неизвестная функция от φ .

Подставляем (2) в первое уравнение системы (1) и учитываем, что $S = R_o(\varphi)$ будем иметь

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{f_1'(\varphi)}{R_o \partial \varphi} = 0, \quad N_x = -\frac{1}{R_o} x f_1'(\varphi) + f_2(\varphi), \quad (3)$$

где $f_2(\varphi)$ – новая неизвестная функция от φ .

Для отыскания функции $f_2(\varphi)$, если нагрузку примем в виде ряда $q = \sum_m \sum_n q_z \sin \frac{m\pi x}{l} \sin \varphi n$, используем граничное условие на левом торце заготовки:

$$x = -\frac{l}{2}; N_x = 0; S = \sum_m \sum_n q_z n \sin m\varphi, \text{ тогда}$$

$$f_2(\varphi) = \frac{l}{2R_o} n^2 \sum_n \cos n\varphi, \quad N_x = -\frac{1}{R_o} x f_1'(\varphi) + \frac{l}{2R_o} n^2 \sum_n \cos n\varphi. \quad (4)$$

Далее, выражаем деформации в тангенциальном и осевом направлении через перемещения и напряжения по деформационной теории пластичности и учитывая граничное условие в начале координат получим выражение для перемещения v в тангенциальном направлении

$$N_x = -\frac{1}{R_o} x f_1'(\varphi) + \frac{l}{2R_o} n^2 \sum_n \cos n\varphi, \quad (5)$$

где E_c – секущий модуль;

h – толщина заготовки.

При локальном нагружении заготовки парой деформирующих роликов в месте приложения усилия обечайка испытывает изгиб и искривление срединной поверхности

$$v = f_1 \frac{3x}{E_c h} + \frac{1}{E_c h R_o} \left(f_1''(\varphi) \frac{x^3}{6R_o} + \frac{x l n^3}{4R_o} q_z \sin \varphi n \right), \quad (6)$$

Кривизна в месте плотного прилегания ролика к заготовке будет равна $\chi_y = \frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_1}$ [10] и, учитывая

граничное условие при $x = -\frac{l}{2}; \varphi_0 = 0$, а также то, что перемещение w равно подаче ролика s_n , деформирующего полку в определенный момент времени, [9], тогда и можно записать

$$-s_n \sin \varphi n = -f_1 \frac{3l}{2E_c h} + \frac{1}{E_c h R_o} \times \left(f_1''(\varphi) \frac{l^3}{48R_o} + \frac{(ln)^3}{16R_o} q_z \sin \varphi n \right), \quad (7)$$

$$\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_1} = -\frac{R_o}{2E_c h} \left(f_1''(\varphi) \frac{l}{2R_o} - \frac{ln^3}{2R_o} q_z \cos \varphi n \right) - \frac{\partial^3 v}{\partial \varphi^3} R_o - \frac{1}{R_o} \frac{\partial v}{\partial \varphi}. \quad (8)$$

Полученные уравнения решаем методом подстановки двойных тригонометрических рядов [10], принимаем

$$v = \sum_m \sum_n A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{l} \sin \varphi n, \quad S = \sum_m \sum_n n B_{mn} \sin \frac{m\pi x}{l} \sin \varphi n,$$

где A_{mn}, B_{mn} – постоянные.

Подставляем данные уравнения в (7) и (8) и, решая их относительно постоянных, получим выражение для касательного усилия

$$S = \sum_m \sum_n \left(\frac{(nl)^2}{24R_o^2} q_z + \frac{2E_c h s_n}{3ln} \right) \sin \varphi_0 n \sin \frac{m\pi x}{l} \sin \varphi n. \quad (9)$$

Для отыскания меридионального усилия подставим уравнение (8) в первое уравнение системы (1), тогда дифференцируя по φ и интегрируя по x , получим для левой части заготовки

$$N_x = \sum_m \sum_n \frac{l}{m\pi R_o} \left(-\frac{n^3 l^2}{24R_o^2} q_z + \frac{2E_c h s_n}{3l} \right) \times \sin \varphi_0 n \cos \frac{m\pi x}{l} \cos \varphi n,$$

аналогично для правой части

$$N_x = \sum_m \sum_n \frac{l}{m\pi R_o} \left(\frac{n^3 l^2}{24R_o^2} q_z + \frac{2E_c h s_n}{3l} \right) \times \sin \varphi_0 n \cos \frac{m\pi x}{l} \cos \varphi n.$$

Так как $E_c = \frac{\sigma_l}{\varepsilon_l}$ [9], при профилировании обо-

дьев можно принять $\varepsilon_i = \varepsilon_0 = \frac{R_o - R_n}{R_o} = (1 - k_{расд})$ и $\sigma_i = \sigma_s$, а действующую нагрузку представить в виде

$q_z = \sum_m \sum_n \frac{8\sigma_s \sin \varphi_0 n}{\pi n - \pi^2 m n}$ [10], окончательно выражения для меридионального усилия будут иметь вид

$$N_x = \sum_m \sum_n \frac{\sigma_s l}{m\pi R_o} \left(-\frac{n^2 l^2 \sin \varphi_0 n}{3R_o^2 \pi (1 - \pi m)} + \frac{2hs_n}{3l(1 - k_{расд})} \right) \times \sin \varphi_0 n \cos \frac{m\pi x}{l} \cos \varphi n, \quad (1)$$

$$N_x = \sum_m \sum_n \frac{\sigma_s l}{m\pi R_o} \left(\frac{n^2 l^2 \sin \varphi_0 n}{3R_o^2 \pi (1 - \pi m)} + \frac{2hs_p}{3l(1 - k_{обж})} \right) \times \sin \varphi_0 n \cos \frac{m\pi x}{l} \cos \varphi n, \quad (2)$$



для левой и правой частей заготовки соответственно.

Имея значения меридиональных усилий, значения напряжений будут равны $\sigma_x = \frac{N_x}{h}$.

Для отыскания распределения величины тангенциальных напряжений в пластической области используем уравнение пластичности по гипотезе максимальных касательных напряжений для плоского напряженного состояния [11]

$$(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4\tau^2 = \sigma_s^2, \quad (13)$$

а так как заготовка пластически деформируется только в месте приложения усилия, то для отыскания поля напряжений в пластической области используем второе уравнение равновесия системы (1).

Определение поля деформаций в пластической области находим из уравнений связи напряжений и деформаций по деформационной теории пластичности и уравнения неразрывности деформаций, в упругой области – используем закон Гука.

Выводы

Теоретический анализ профилирования заготовки для обода колеса с позиций теории оболочек вращения показал, что распределение напряжений и деформаций зависит от технологических факторов (величина подачи, усилие, коэффициент раздачи-обжима), геометрических размеров заготовки (радиус, длина, толщина заготовки) и механических характеристик используемого металла (предел текучести). Радиусы деформирующих роликов и величина подачи оказывают влияние на размеры очага деформации и, соответственно, на поле напряжений. Анализируя зависимости (11), (12) можно заключить, что величина меридиональных напряжений зависит от двух слагаемых, одно из которых характеризует деформацию заготовки в месте приложения нагрузки и с увеличением квадрата радиуса обечайки оно уменьшается, а с увеличением квадрата длины – увеличивается, также локальная составляющая растет с увеличением угла захвата заготовки деформирующим инструментом ($\sin_0 n$). Второе слагаемое характеризует деформацию оболочки как конструкции в целом и увеличивается с ростом толщины заготовки и подачи и уменьшается с увеличением длины оболочки, что вполне соответствует физической сущности процесса профилирования оболочек. Но для

эффективного определения зон дополнительного внешнего воздействия необходимо строить эпюры распределения напряжений и деформаций в окружном и осевом направлении, так как их распределение носит волновой характер.

Литература

- [1] Левченко Р. В. Влияние автомобильного транспорта на окружающую среду и пути уменьшения вредных выхлопов путем совершенствования технологии и машин для профилирования / Р. В. Левченко, Р. Г. Пузырь, Д. В. Мосьпан // XIII міжнародна науково-практична конференція «Ідеї академіка Вернадського та науково-практичні проблеми стійкого розвитку регіонів». Матеріали конференції. – Кременчук: КрНУ, 2011. – С. 108–110.
- [2] Третьяков А. В. Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании / А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов, М. К. Гурьянова. – М.: Машиностроение, 1971. – 65 с.
- [3] Tailored steel strip direct from coil [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.tailored-blanks.com/home.html>.
- [4] Долой лишний вес: (рубрика «Автодром») [Электронный ресурс] / А. В. Воробийов-Обухов // Вокруг света – 2009. – №1 (2820). – Режим доступа до журн.: <http://www.vokrugsveta.ru/>.
- [5] Потекушин Н. В. Исследование напряжений при радиальном профилировании заготовок на первых переходах / Н. В. Потекушин, Э. З. Сайфулин. // Обработка металлов давлением. – Ижевск: 1974. – вып. 2. – С. 111–114.
- [6] Коноваленко А. Д. Исследование усилий при изготовлении широкопрофильных ободьев колес. // Математичні проблеми технічної механіки: Тез. допов. другої Всеукраїн. наук. конф. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2002. – с.70.
- [7] 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.
- [8] Филин А.П. Элементы теории оболочек / А. П. Филин. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1975. – 256 с.
- [9] Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М.: Главн. ред. физико-математической литературы, 1967. – 984 с.
- [10] Авдонин И. С. Прикладные методы расчета оболочек и тонкостенных конструкций / И. С. Авдонин. – М.: Машиностроение, 1969. – 403 с.
- [11] Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.

Dragobetsky V.V., Puzyr R.G., Gaikova T.V., Argat R.G.
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Ukraine, Kremenchuk

**THE ANALYSIS OF THE INTENSIFICATION METHODS OF DRAWING
AND FORMING TO SHAPE SHEET STOCK TO THEIR FURTHER APPLICATION
IN RADIAL AND ROTATIONAL OPERATIONS OF FORMING TO SHAPE OF CLOSED
SHELLS FOR PERFECTION OF WHEEL MANUFACTURE TECHNOLOGIES**

Purpose. Presents the analysis of the sheet stamping processes (drawing) forming to shape sheet stock and radial and rotational forming to shape of shells.

Design/methodology/approach. It is shown that though the processes under consideration have similar schemes of the stress-strained state, it is necessary to consider geometrical sizes and the form of an initial blank and also the character of load application for their intensification, reduction of the transition quantity of deformation or for applying additional effect to reduce the variation in thickness of the finished product. It is shown that the technological techniques with the help of which it possible to avoid the thinning of metal in the dangerous areas during the drawing and forming to shape of sheet metal, absolutely. It not work in radial and rotational forming to shape. A comparative analysis of wheel rims production methods is made and the necessity of shifting the research accent to the theoretical area is grounded.

Findings. A dependence for calculation of meridian stresses value by solution of the approximate balance equations of a cylindrical shell by the method of substitution of dual trigonometric series is received.

Originality/value. The analysis of the formal dependence has shown that the distribution of stresses and deformations during the deformation of a closed shell has a wave character and is controllable after careful study of the loading diagrams and deformations in the typical shape sections in the meridian and tangential directions.

Keywords: drawing; forming to shape; steel; blank; shell; stresses

References

- [1] Levchenko R. V., Puzyr' R. G., Mos'pan D. V. Impact of road transport on the environment and ways of reducing harmful emissions by improving the technology and machines for profiling. XIII mizhnarodna naukovo-praktichna konferencija «Idei akademika Vernads'kogo ta naukovo-praktichni problemi stijkogo rozvitku regioniv». (XIII International Scientific and Practical Conference "Academician Vernadsky's ideas, scientific and practical problems of sustainable development of the regions"). Kremenchuk, 2011, pp.108-110.
- [2] Tret'jakov A. V., Trofimov G. K., Gur'janova M. K. *Mehanicheskie svojstva stalej i splavov pri plasticheskom deformirovanii.* (The mechanical properties of steels and alloys during plastic deformation). Moscow: Mashinostroenie, 1971, 65 p.
- [3] Tailored steel strip direct from coil, Available at: <http://www.tailored-blanks.com/home.html> (accessed 14 April 2014).
- [4] Vorobjov-Obuhov A. V. Doloj lishnij ves: (rubrika «Avtodrom»). [Down with overweight (column "Speedway")]: *Vokrug sveta*, 2009, No. 1 (2820). available at: <http://www.vokrugsveta.ru/>.
- [5] Potekushin N.V., Sajfulin Je.Z. *Issledovanie naprjazhenij pri radial'nom profilirovanii zagotovok na pervyh perehodah* (The study stresses the radial profiling blanks on the first transitions). *Izhevsk*, 1974. No. 2, pp. 111-114.
- [6] Konovalenko A. D. *Issledovanie usilij pri izgotovlenii shirokoprofil'nyh obod'ev koles.* (Research efforts in the manufacture of wide-rim). *Matematichni problemi tehnichnoï mehaniki: Tez. dopov. drugoï Vseukraïn. nauk. konf.* [Mathematical Problems of Engineering Mechanics: Proceedings of the Second All-Ukrainian Conference]/Dniprodzerzhins'k, 2002, pp. 70.
- [7] Chigirinskij V. V., Mazur V. L., Belikov S. V. i dr. *Sovremennoe proizvodstvo koles avtotransportnyh sredstv i sel'skohozjajstvennoj tehniki:* [Monografija]. (Modern production of wheels of vehicles and agricultural equipment [monograph]). Dnepropetrovsk, 2010, 309 p
- [8] Filin A. P. *Jelementy teorii obolochek.* (Elements of the theory of shells). Leningrad: Strojizdat, Leningr. otd-nie, 1975, 256 p.
- [9] Vol'mir A. S. *Ustojchivost' deformiruemyh sistem* (Stiffness of the malformed systems). Moscow: Nauka, 1967, 984 p.
- [10] Avdonin I. S. *Prikladnye metody rascheta obolochek i tonkostennyh konstrukcij.* (Applied methods of analysis of shells and thin-walled structures). Moscow: Mashinostroenie, 1969, 403 p.
- [11] Popov E. A. *Osnovy teorii listovoj shtampovki* (Bases of theory of the sheet stamping). Moscow: Mashinostroenie, 1977, 278 p.