

**ՀՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱ
ՄԵԽԱՆԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ**

ՄՈԹԱԼԼԵԲԻ ՄԵՑԵՂ ՌԵԶԱ

**ՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ՆԱԽԱՊԱՏՐԱՍՏՎԱԾՔՆԵՐԻՑ ԳԼՈՑՄԱՍԲ ՏԱՐԲԵՂ
ՀԱՏՈՒՑԹՆԵՐՈՎ ԱՐՏԱԴՐԱՏԵՍԱԿՆԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ
ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄ ԵՎ ՀԱՄԱՊԱՏԱՄԽԱՆ ԼԱՐՎԱԾՄԴԵՖՈՐՄԱՑԻՈՆ
ՎԻՃԱԿՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆ**

Ա.02.04 – «Ղեֆորմացվող պինդ մարմնի մեխանիկա» մասնագիտությամբ
սեխանիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման
ատենախոսության

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ 2013

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК РА
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ**

МОТАЛЛЕБИ СЕЙЕД РЕЗА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОКАТКОЙ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ПРОДУКТОВ РАЗЛИЧНОГО СЕЧЕНИЯ И
ИЗУЧЕНИЕ СООТВЕТСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ
СОСТОЯНИЙ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 01.02.04 - “Механика деформируемого твердого тела”

ЕРЕВАН 2013

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Երևանի պետական համալսարանում
Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ., պրոֆ. Գ. Լ. Պետրոսյան
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆ.մ.գ.դ., պրոֆ. Կ. Բ. Կազարյան
տ.գ.դ., պրոֆ. Բ. Ս. Բալասանյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի Ճարտարապետության և
Շինարարության Պետական Համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2013թ. Մայիսի 17-ին, ժամը 14 -ին, ՀՀ ԳԱԱ-ի
Մեխանիկայի ինստիտուտում գործող Մեխանիկայի-047 Մասնագիտական
խորհրդում, հասցեն՝ 0019, ք. Երևան, մարշալ Բաղրամյան պող. 24բ, e-mail:
avsah@mechins.sci.am

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԳԱԱ-ի Մեխանիկայի ինստիտուտի
գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքված է 2013թ. ապրիլի 12-ին:

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար, ֆ.-մ.գ.դ. **Ա.Վ. Սահակյան**

Тема диссертации утверждена в Ереванском государственном университете.

Научный руководитель: д.т.н., проф. Г. Л. Петросян
Официальные оппоненты: д.ф.м.н., проф. К. Б. Казарян
д.т.н., проф. Б. С. Баласанян

Ведущая организация: Ереванский Государственный Университет
Архитектуры и Строительства

Защита диссертации состоится 17 мая 2013г. В 14⁰⁰ ч. на заседании
Специализированного совета 047- “Механика”, действующего при Институте
механики НАН Армении по адресу: 0019, г. Ереван, пр. маршала Баграмяна,
24б, e-mail: avsah@mechins.sci.am

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института механики НАН
РА.

Автореферат разослан 12 апреля 2013г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
д.ф.-м.н.

А.В. Саакян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На современном этапе развития науки и техники важное место отводится сферам металлургии и машиностроения, особенно при решении задач обработки давлением литых и порошковых материалов.

Прокатка – один из наиболее производительных, точных, энерго- и ресурсосберегающих методов обработки металлов давлением. Данный процесс позволяет с минимальными затратами металла получить полосовые и кольцевые детали, трубы квадратного и прямоугольного поперечных сечений с точными геометрическими параметрами и высокими механическими свойствами, а также качественной поверхностью.

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

С целью правильного выбора технических характеристик оборудования и процессов, а также совершенствования технологического процесса получения деталей с указанными эксплуатационными и физико-механическими свойствами возникает необходимость исследования аналитическими методами напряженно-деформированного состояния (НДС) деформированной заготовки при больших пластических деформациях.

Аналитическое исследование прокатки спеченных полос, раскатки колец больших диаметров, придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм – достаточно сложный и малоизученный процесс, что связано с их многопараметричностью. Эти исследования, в основном, приближенные, а полученные формулы имеют эмпирический вид. В последнее десятилетие с учетом важности процесса раскатки колец проводилось много новых исследований, в которых представлены как уточненные в какой-то мере аналитическими методами решения, так и данные, полученные на основе метода конечных элементов (МКЭ) – одного из усовершенствованных численных методов с применением автоматизированного программного пакета (АПП). Однако, все эти исследования не полностью отражают реальную картину процесса прокатки, а данных по МКЭ недостаточно.

Исходя из вышеизложенного, исследование НДС при прокатке различных типов заготовок из литых и порошковых материалов и их применение для определения технологических параметров соответствующих процессов является вполне актуальным.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является выявление особенностей процессов прокатки полос, раскатки колец, а также придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм, развитие методов их теоретического, компьютерного и

экспериментального исследования и определение оптимальных параметров, позволяющих усовершенствовать технологические процессы.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- выявление особенностей процессов прокатки полос, раскатки колец больших диаметров, а также придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм;
- на основе деформационной теории пластичности пористых материалов (ДТПМ) разработка методов оценки величин пористости спеченной полосы прямоугольного сечения после прокатки;
- разработка методики определения начальных и текущих взаимосвязанных геометрических параметров процесса раскатки кольца;
- теоретическое исследование напряженного состояния процесса раскатки кольца;
- моделирование процессов прокатки полос и придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм в среде АПП “ABAQUS”;
- сопоставление полученных результатов с данными экспериментальных и производственных исследований, выполненных в иранском заводе производства труб и стальных профилей “KNG” (г. Рашт).

Методы исследования. Исследования по определению пористости полосы после ее прокатки проводились на основе современной ДТПМ с использованием простейших функций пористости.

Для теоретического решения задач процессов прокатки полос и раскатки колец был использован метод тонких сечений. Путем обобщенного решения задачи определения компонентов напряженного состояния колец при раскатке получено известное решение задачи прокатки полосы.

Задачи процессов прокатки полос и придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм моделированы в среде АПП “ABAQUS”. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с экспериментальными и производственными данными.

Научная новизна. В процессе исследования получены результаты, отличающиеся существенной новизной:

1. Используя уравнения ДТПМ, разработаны инженерные методы оценки величин пористости спеченной полосы прямоугольного сечения после прокатки. При этом путем некоторых преобразований формула пористости значительно упрощается.

2. Определены начальные и текущие взаимосвязанные геометрические параметры процесса раскатки кольца.

3. Дается обобщенное решение задачи определения компонентов напряженного состояния колец при раскатке. Показан переход от схемы

процесса раскатки кольца к схеме деформирования плоской полосы в случае постепенного увеличения радиуса кольца.

4. Проведено моделирование задач исследования НДС процессов прокатки полос и придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм в среде АПП “ABAQUS”.

5. Объясняются причины процесса перемещения края пластической зоны в задаче придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм, полученной в среде АПП “ABAQUS”.

Практическая ценность и реализация результатов исследования. Выполненные исследования позволяют расширить возможности методов исследования НДС в случае холодного и горячего деформирования заготовок из литых и спеченных материалов, что является основой для совершенствования технологических процессов.

1. Оценка пористости спеченного материала после прокатки полос выполнена на базе современной ДТППМ. Знания о величинах пористости полосы после прокатки дает возможность оптимизировать технологический процесс.

2. Методом тонких сечений исследовано НДС кольца при раскатке с учетом начальных и текущих взаимосвязанных геометрических параметров, что позволяет повысить точность определения технологических параметров процесса.

3. Моделированием в среде АПП “ABAQUS” процессов прокатки полос и придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм определяется распределение по объему заготовок компонентов НДС. Полученные результаты силовых и деформационных параметров могут быть использованы для проектирования технологического процесса и расчета приспособлений с целью получения соответствующих продуктов с высокими механическими и эксплуатационными свойствами.

Предложенные методы исследования НДС деформированных заготовок из литых и спеченных материалов, а также полученные результаты решения задач одобрены со стороны иранского завода производства труб и стальных профилей “KNG” (г. Рашт) актом-рекомендацией и могут быть использованы для определения силовых параметров соответствующих технологических процессов, проектирования и настройки приспособлений.

Результаты исследования являются составной частью научно-технической темы “Моделирование и исследование процессов раскатки колец из сплошного и спеченного материалов аналитическим, экспериментальным методами и в программной среде ABAQUS” Государственного комитета науки МО и Н РА (2011-2013гг., шифр 11-2d435).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методы оценки величин пористости спеченной полосы прямоугольного сечения после прокатки.
2. Методики определения взаимосвязанных геометрических параметров процесса раскатки кольца, получения универсальных уравнений и вычисления компонентов его напряженного состояния.
3. Моделирование в среде АПП “ABAQUS” процессов прокатки полос и придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм, установление величин компонентов НДС этих заготовок и сопоставление их с экспериментальными и производственными данными.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на:

- ежегодной научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов ГИУА (Ереван, 2011);
- международных науч.- техн. Конференциях: "Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред" (Горис-Степанакерт, 2011), "Машиностроительные технологии и техника автоматизации" (Севастополь, Украина, 2011), "Машиностроение и Техносфера XXI века" (Севастополь, Украина, 2012),
- 8-й Европейской конференции "Механика твердого тела " (Граз, Австрия, 2012).
- Общем научном семинаре кафедры Механики ЕГУ и Института Механики НАН РА.

Публикации. Основные результаты исследования опубликованы в 10 научных статьях, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 97 наименований. Работа изложена на 124 страницах, включает 85 рисунков и 25 таблиц. Диссертация написана на английском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, представлены научная новизна и практическая ценность работы. Выделены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описывается сущность процессов прокатки полос, раскатки колец, а также придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм. Выявляются особенности их теоретического и компьютерного исследования в среде АПП “ABAQUS” .

Учитывая, что в основе всех исследований лежит процесс прокатки полос прямоугольного поперечного сечения, особое внимание уделено обсуждению технологических вопросов этого процесса и теоретическим исследованиям данной задачи. Приведены основные схемы прокатных станов, дается классификация полученной продукции, а также геометрических, технологических, силовых и деформационных параметров. Важное значение придается вопросам получения и методам интегрирования дифференциальных уравнений, позволяющих определить компоненты НДС заготовок.

Отличительной технологической особенностью раскатки кольца является использование в основном двух типов специальных станов: чисто радиальной и радиально-аксиальной машины. Дается описание основных деталей раскатанных станов, классификация процесса, особенности его проектирования и учета. Что касается вопросов определения силовых и деформационных параметров, то из-за их многочисленности и трудности решения задачи они обсуждаются в главе 3.

Известно несколько методов придавания цилиндрическим трубам квадратной, прямоугольной или других форм. Теоретические проблемы этого процесса недостаточно изучены, поэтому в конце главы приведены некоторые известные результаты, полученные компьютерным моделированием МКЭ в среде АПП "ABAQUS".

Во второй главе обсуждаются особенности исследования процессов прокатки полос из литых и спеченных материалов. С этой целью выявлены особенности учета реальных свойств материалов при малых и больших деформациях, которые устанавливаются с использованием соответствующих теорий упругости и пластичности. Для упрощенного решения задач определения пористости материала достаточно использовать следующие уравнения ДТППМ:

$$v = 1 - (1 - v_0) \exp\left(-\frac{9v_0^m \sigma_0 \varepsilon_{eq}}{(1-v)^{3n} \sigma_{eq0}}\right), \quad (1)$$

$$\sigma_{eq0} = \frac{1}{(1-v)^{n+0,5}} \left(\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} + 9v_0^m \sigma_0^2 \right)^{0,5}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{eq} = (1-v)^{2n-0,5} \left(\frac{2}{3} e_{ij} e_{ij} + \frac{\varepsilon_0^2}{v_0^m} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{3\varepsilon_{eq}}{2(1-v)^{3n} \sigma_{eq0}} \left[\sigma_{ij} - (1-2v_0^m) \delta_{ij} \sigma_0 \right], \quad (4)$$

где S_{ij} и e_{ij} - компоненты девиаторов напряжений и деформаций; $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - среднее и главные напряжения; $\varepsilon_0 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)/3$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - средняя и главные деформации; v, v_0 - текущая и начальная пористости материала; δ_{ij} - символ Кронекера; $\sigma_{eq}, \varepsilon_{eq}$ - эквивалентные напряжения и деформации, при этом величина σ_{eq0} определяется из σ_{eq} при $v^m = v_0^m$.

Решение задачи оценки величин пористости спеченной полосы прямоугольного сечения после прокатки с использованием уравнения определения пористости материала (1), аналитических формул аппроксимации контактного края зоны прокатки двумя хордами, безразмерных величин числовых данных $\bar{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma_y, \bar{p} = p / \sigma_y$ (где σ_y - предел текучести материала) и данных из рис.1 осуществляется для неупрочненного материала ($\sigma_{eq} = \sigma_y$). Рассматриваются два случая:

1. Зона пластического деформирования полосы при прокатке разделена на определенное число частей.

Учитывая, что преобразованный член $-9v_0^m \sigma_0 \varepsilon_{eq} / (1-v_0)^{3n} \sigma_{eq0}$ формулы (1) выполняет основную роль при решении задачи, поэтому в случае плоской деформации полосы и с учетом условия пластичности Треска - Сен-Венана преобразуем его к виду

$$-9v_0^m \sigma_0 \varepsilon_{eq} / (1-v_0)^{3n} \sigma_{eq0} = -9 \left(v_0^m / (1-v_0)^{3n} \right) \left(\sigma_0 / \sigma_{eq} \right) \varepsilon_{eq} = -9 f_1(v_0) f_2(\sigma) \varepsilon_{eq},$$

где $f_1(v_0) = v_0^m / (1-v_0)^{3n}, f_2(\sigma) = \sigma_0 / \sigma_{eq} = -p / \sigma_{eq} + 0,5 < 0,$
 $\varepsilon_{eqi} = \ln(h_{xi} / h_{x(i+1)}). \quad (5)$

Численные результаты были получены при использовании следующих начальных данных: $v_0 = 0,3; m = 1; n = 0,25; h_0 = 7 \text{ мм}; h_1 = 3 \text{ мм}.$

Расчеты по формулам (1) и (5) выполняются начиная с левой недеформированной стороны зоны прокатки (соответствует точка a на рис.1), от которой величины относительных контактных давлений берутся по abc - основной кривой. Полученные значения текущей пористости материала прокатанной полосы и других параметров приведены в таблице.

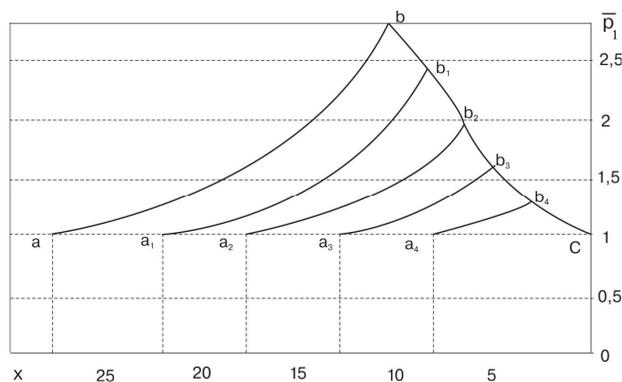


Рис.1. График $\bar{p} - x$ для различных величин контактного угла α , где abc - основная кривая

Как видно из данных таблицы, при уменьшении угла прокатки от 8 до 5° пористость материала практически приравнивается нулю. Тем самым обосновывается эффективность процесса прокатки - одного из самых производительных технологических процессов с точки зрения как получения высококачественной продукции, так и уплотнения пористых материалов.

Что касается безразмерной величины силы, действующей на валок, то она определяется умножением ширины прокатываемой заготовки на площадь эпюры давления \bar{p} .

Таблица
Значения параметров напряженно-деформированного состояния полосы прокатки в зависимости от угла φ_x в пределах от 8 до 5°

φ_x	8°	7°30'	7°	6°30'	6°	5°30'	5°
$h_x/2, мм$	3,446	3,221	2,990	2,785	2,595	2,420	2,261
$\bar{\sigma}_0$	-0,500	-0,520	-0,570	-0,620	-0,690	-0,780	-0,900
\bar{p}	1,000	1,029	1,068	1,122	1,93	1,285	1,402
ε_{eq}	0,069	0,070	0,069	0,069	0,068	0,067	0,064
f_1	0,392	0,247	0,156	0,097	0,058	0,0327	0,017
ν	0,300	0,209	0,140	0,091	0,056	0,032	0,017

2. Зона пластического деформирования полосы при прокатке рассматривается как одна часть.

Сложность учета пористости, приведенной в случае 1, заключается в том, что давление \bar{p} в данном случае изменяется в пределах 1,0...2,8. Для

этого задача решается ступенчато, и ее применение на практике представляет значительные затруднения.

На рис.1 показаны также диаграммы $\bar{p} - x$ (кривые a_1b_1c , a_2b_2c , a_3b_3c , a_4b_4c) при различных значениях контактного угла α . Как видно, при уменьшении угла α уменьшается и давление \bar{p} . Отметим, что при малых α (малых степенях деформации) давление \bar{p} приближается к единице.

Учитывая, что технологический процесс прокатки обычно осуществляется многочисленными малыми проходами (рис.1, кривая a_4b_4c), возникает возможность решения задачи по ним, принимая давление в каждом случае равным $\bar{p} = 1$, т.е. эта задача решается без предварительного исследования НДС заготовки.

В качестве примера определена пористость полосы после одного прохода при 20%-й начальной пористости материала, когда $\alpha = 3^\circ$, $h_0 = 7 мм$, $h_1 = 6,45 мм$, $R = 200 мм$, $\bar{p} = 1$. Из (1) получено $\nu = 12,8\%$.

Исследовано НДС заготовок прямоугольного сечения при холодной и горячей прокатке с использованием среды АПП "ABAQUS". Задача решена комплексно с учетом различных параметров технологического процесса: радиуса валков, числа их вращения, степени деформирования и т.д.

По полученным данным холодной прокатки полосы из упочненного материала построены графики распределения нормальных и касательных напряжений. При этом форма эпюры давления \bar{p} совпадает с данными рис.1, вычисленными аналитическим методом.

Учтены вопросы влияния изменения радиусов валков и степени деформирования при одинаковом коэффициенте трения (0,2). Показывается, что при увеличении этих параметров, а также коэффициента трения увеличиваются компоненты напряженного состояния полосы.

На рис.2 видны положения зон отставания и опережения, а также неравномерное распределение τ_{xy} по ширине полосы.

При горячей прокатке полосы применяют соответствующее уравнение деформированного состояния материала, в которое входят эквивалентные деформации и их скорости, сопротивление деформированию материала (216,3 МПа), температура (300, 400 и 500 °С) и другие начальные параметры. При этом изменение скорости деформации обеспечивается различным числом оборотов валков, выраженных в об/мин, а температура влияет на сопротивление деформированию материала. В качестве материала выбирается алюминиевый сплав АА5083. На рис. 3 показана зависимость силы, действующей на валок, от различного числа их оборотов. Полученные результаты компьютерного моделирования не только хорошо согласуются с теоретическими данными исследования НДС заготовок, но и содержат большое количество другой важной информации о технологическом

процессе, которые теоретическими методами невозможно определить.

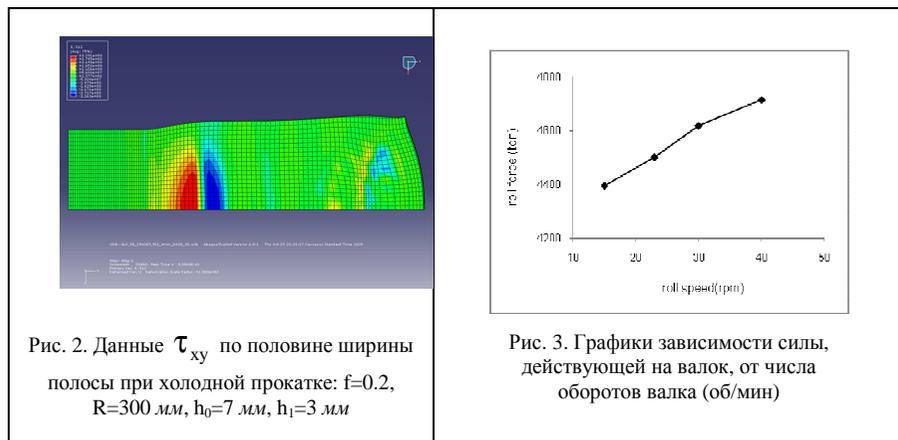


Рис. 2. Данные τ_{xy} по половине ширины полосы при холодной прокатке: $f=0.2$, $R=300$ мм, $h_0=7$ мм, $h_1=3$ мм

Рис. 3. Графики зависимости силы, действующей на валок, от числа оборотов валка (об/мин)

Третья глава посвящена разработке методики определения начальных и текущих взаимосвязанных геометрических параметров процесса раскатки кольца большого диаметра и теоретическому исследованию его напряженного состояния. Рассматривается схема раскатки кольца с начальными внешним R_e и внутренним R_i радиусами (рис.4), которая позволяет согласовать на данном этапе зоны деформированной заготовки форму и параметры раскатки кольца: контактные углы $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$, толщины кольца h_0 и h_1 , его выходные радиусы r_e, r_i , а также радиусы R_1 и R_2 ведущих и холостых валок.

На основании некоторых допущений получены следующие основные формулы, связывающие начальные параметры процесса раскатки кольца большого диаметра:

$$\gamma = \Delta h_1 / \Delta h_2 = \frac{1/R_1 + 1/R_e}{1/R_2 - 1/R_i} = \frac{(R_e + R_1)R_2R_i}{(R_i - R_2)R_1R_e}, \quad (6)$$

$$\Delta h_2 = \Delta h : \left(\frac{(R_1 + R_2)R_i}{(R_i - R_2)R_1} \right), \quad (7)$$

$$R_2 = R_i R_1 \sin \varphi_1 / (R_e \sin \varphi_2), \quad 1 - \cos \varphi_2 = k \sin \varphi_2, \quad (8)$$

где

$$k = R_e [h_0 \cos \varphi_0 - h_1 - R_1 (1 - \cos \varphi_1)] / (R_i R_1 \sin \varphi_1). \quad (9)$$

Уравнения (8) и (9) позволяют определить R_2, k и φ_2 .

Отметим также, что из (6) и (7) можно найти значения $\gamma, \Delta h_1$ и Δh_2 .

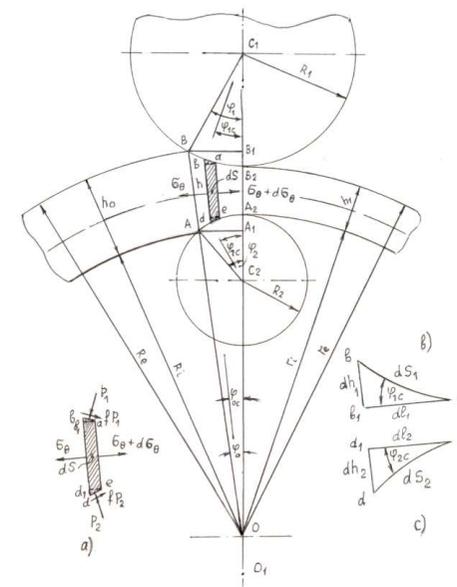


Рис. 4. Схема раскатки кольца, где на а,б,в, г показаны часть, отделенная двумя поперечными сечениями, и элементы соответствующих ее концов

Численное решение задачи выполнено для трех случаев. В случае использования начальных данных ($h_0=7$ мм, $h_1=3$ мм, $\Delta h=h_0-h_1=4$ мм, $R_1=200$ мм, $\varphi_1=6^\circ$, $R_e=400$ мм, $R_i=393$ мм) получим: $\varphi_0=3^\circ$, $k=0,14069$, $\varphi_2=16^\circ$, $R_2=74,5$ мм, $\gamma=0,69$, $\Delta h_2=2,37$ мм и $\Delta h_1=1,63$ мм.

Анализ полученных для трех случаев данных показывает, что увеличение R_e и R_i приводит к постепенному выравниванию величин R_1 и R_2 , Δh_1 и Δh_2 , φ_1 и φ_2 , т.е. приходим к случаю прокатки плоской полосы.

Для изучения напряженного состояния кольца, используя метод тонких сечений, составляются уравнения равновесия элемента $abde$ кольца (рис.4) с единицей ширины, проектируя возникаемые нормальные силы в поперечных сечениях, нормальные и касательные силы в контактных поверхностях на касательной его dS дуги и на радиусе, соединяющем среднюю точку дуги dS с центром кольца O , а также условие пластичности Треска – Сен-Венана. В результате получаем систему уравнений:

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

$$p_2 = p_1 dS_{1c} \cos \varphi_{1c} / (dS_{2c} \cos \varphi_{2c}), \quad \sigma_\theta + p_1 = \sigma_y \quad (10)$$

и зависимости, связывающие текущие геометрические параметры:

$$R_1 d\varphi_{1c} = dS_{1c}, \quad R_2 d\varphi_{2c} = dS_{2c}, \quad \sin \varphi_{1c} = dh_1 / dS_{1c}, \quad \sin \varphi_{2c} = dh_2 / dS_{2c}, \\ dh_1 = R_1 d\varphi_{1c} \sin \varphi_{1c}, \quad dh_2 = R_2 d\varphi_{2c} \sin \varphi_{2c}. \quad (11)$$

Отметим, что в основном уравнении системы (10) для зоны отставания в скобке используется знак “минус” (-), а для зоны опережения – знак “плюс” (+). При этом из (10) можно получить уравнения для случая прокатки плоской полосы, если принять $\varphi_{1c} = \varphi_{2c}$, т.е. $R_1 = R_2$ или $\varphi_1 = \varphi_2$.

В случае разделения зоны деформирования кольца на определенное количество конечных элементов основная формула приращения окружного напряжения в его различных сечениях представляется в следующем виде:

$$\Delta \sigma_\theta = -\sigma_\theta \frac{\Delta h_c}{h} + \frac{p_1 \Delta h_{1c}}{h} (1 \mp 2f / tg \varphi_{1c} + tg \varphi_{2c} / tg \varphi_{1c}). \quad (12)$$

Численные данные задачи определены для вышеотмеченного случая.

Для выполнения численных расчетов зона деформирования кольца разделена на десять равномерных элементов с центральным углом шага $0,3^\circ$. Принимается, что остальные углы также разделены равномерно с шагами $0,6^\circ$ и $1,6^\circ$. Расчеты выполнялись с использованием величин параметров средних точек элементов и следующих безразмерных величин напряжений и давлений: $\overline{\Delta \sigma_\theta} = \Delta \sigma_\theta / \sigma_y$, $\overline{\sigma_\theta} = \sigma_\theta / \sigma_y$, $\overline{p_1} = p_1 / \sigma_y$ и $\overline{p_1} = 1 - \overline{\sigma_\theta}$.

Численное интегрирование формулы (12) выполняется с учетом следующих граничных условий: при входе и выходе из зоны деформирования кольца окружные напряжения отсутствуют, или контактные давления в этих сечениях равняются единице. Приведенные в таблице результаты расчетов показывают, что в данном случае при выходе из зоны деформирования кольца эти условия удовлетворяются приближенно. Точность этого граничного условия можно повысить увеличением числа элементов деления зоны. При этом нейтральное сечение находится в том месте, где приращение окружного напряжения меняет знак, а эти напряжения и контактные давления имеют экстремальные значения.

В четвертой главе, учитывая то обстоятельство, что малоизученные процессы придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм являются одним из важных и производственных методов получения бесшовных и малых размеров труб, для получения полных и достоверных данных проводится комплексное решение задачи, а именно: исследование НДС процессов путем моделирования их в среде АПП “ABAQUS”;

теоретическое объяснение причин расширения пластической зоны, происходящего в процессе постепенного деформирования заготовки; сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными, а также определение оптимальных параметров, позволяющих усовершенствовать технологические процессы.

1. Схема моделирования в среде АПП “ABAQUS” процесса придавания цилиндрическим трубам квадратной формы показана на рис.5. Рассматриваются алюминиевые трубы со следующими пластическими и упругими свойствами: $\sigma_{eq} = 420(0,048 + \varepsilon_{eq})^{0,25}$ МПа, $\sigma_y = 190$ МПа, $E = 70$ ГПа, $\nu = 0,33$. При этом используются трубы диаметром 80 мм и ролики радиусами 100, 125, 200 мм и ∞ , которые могут перемещаться 4 мм.

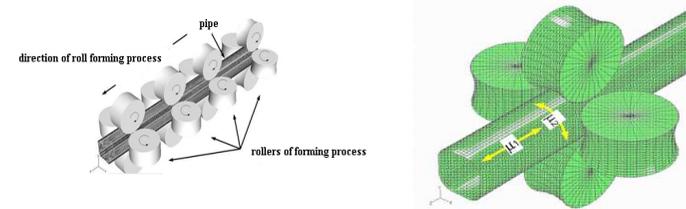


Рис. 5. Схема моделирования процесса придавания цилиндрическим трубам квадратной формы и ее одна степень

На рис. 6 показаны распределения напряжения Мизеса по поперечным сечениям труб при различных значениях проникания роликов. Видно, что край пластически деформированной зоны перемещается в сторону угла квадратной формы труб.

2. Теоретическое объяснение причин процесса расширения пластической зоны осуществляется каноническими уравнениями метода сил: решением задач исследования внутренних силовых факторов определенной длины окружности круглого кольца, нагруженного четырьмя симметрично расположенными сосредоточенными силами, и одинакового периметра рамы квадратной формы, нагруженной равномерно распределенной эквивалентной нагрузкой. Показано, что в действительности при превращении круглого кольца в квадратную форму из-за изменения формы трубы и типа внешней нагрузки изменяются величины и вид эпюр внутренних силовых факторов. Это приводит к расширению пластической зоны.

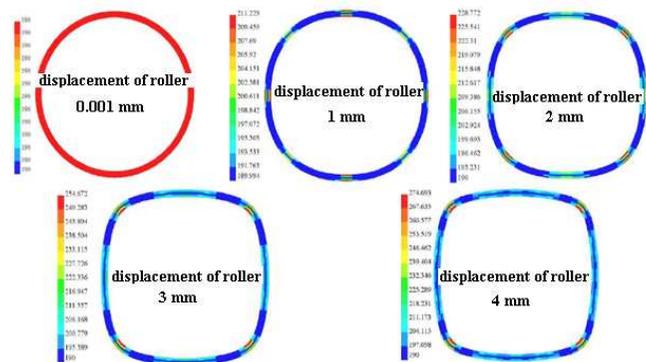


Рис. 6. Распределение напряжения Мизеса по поперечным сечениям труб при различных значениях проникания роликов радиусом 100 мм

3. Полученные результаты моделирования в среде АПП “ABAQUS” процессов придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований, проводимых в заводских условиях. При этом особое внимание уделено причинам возникновения дефектов - радиуса углов R_0 и впадины сторон c (рис.7) и способам их уменьшения. При различных толщинах труб анализированы величины растягивающих напряжений и их распределения по длине и кругу деформированных труб, влияние параметра проникания валков (в мм-ах) на величины основных дефектов: R_0 и относительной впадины сторон c/R (рис.8), где R – начальный радиус круглой трубы.

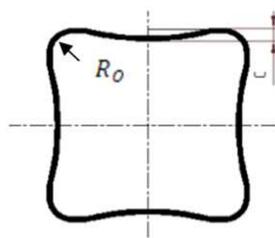


Рис. 7. Дефекты на деформированной трубе: R_0 - радиус углов, c - впадина сторон

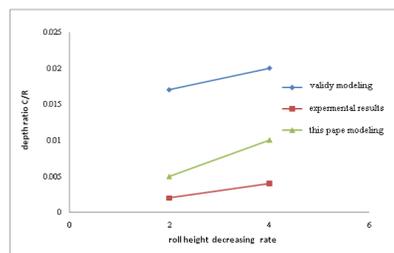


Рис. 8. Относительная глубина впадины сторон c/R от перемещения ролика при толщине трубы 3мм

В случае получения прямоугольных стальных труб марки St37 из первоначальных круглых труб диаметрами 75, 76, 77, 78 мм и толщинами 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 мм исследовалось их влияние на усилие прокатки, максимальную пластическую деформацию, радиуса углов продукции и т.д.

4. Используя полученные данные, методом Тагучи оптимизируется технологический процесс придавания цилиндрическим трубам прямоугольной формы. С этой целью была использована группа из трех параметров: величины характеристик базовых размеров прямоугольной трубы, ее начальные толщины и конструкция профиля роликов. При этом лучшая комбинация из этих величин определяется с использованием МКЭ.

Установлено, что максимальное влияние на радиус углов R_0 и относительную впадину сторон c/R в первую очередь имеет характеристика базовых габаритных размеров трубы и далее - величины начальных толщин труб и конструкции профиля роликов.

Таким образом, процесс оптимизации основан на методе Тагучи и МКЭ. С использованием достоверного МКЭ и ряда экспериментов исследуется влияние на качество продукта различных параметров процесса: характеристика базовых габаритных размеров трубы, ее толщины и различные профили валок. Изучены и измерены величины дефектов c/R и R_0 прямоугольной трубы. Полученные оптимальные результаты позволяют дать ценные рекомендации для лучшего понимания характеристики деформации и точного контроля этого процесса.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Выполненное исследование позволяет сделать следующие основные выводы:

1. На основе ДТППМ разработан метод оценки величин пористости спеченной полосы прямоугольного сечения после прокатки. Доказывается, что:

а) при малых степенях деформирования пористость материала при начальной пористости 30% практически приравнивается нулю. Тем самым обосновывается эффективность процесса прокатки для получения не только упрочненной продукции, но и уплотненной;

б) при решении задачи с малыми проходами безразмерное давление в каждом проходе принимается равным $\bar{p}=1$, т.е. задача решается без предварительного исследования НДС заготовки.

2. Исследование НДС прямоугольных заготовок при холодной и горячей прокатке в среде “ABAQUS” осуществлено комплексно с учетом различных параметров технологического процесса. Полученные результаты не только хорошо согласуются с теоретическими данными, но и содержат большое количество другой важной информации о технологическом процессе, которые теоретическими методами невозможно определить.

3. Разработана методика определения начальных и текущих взаимосвязанных геометрических параметров процесса раскатки кольца большого диаметра. Анализ полученных данных показал, что увеличение внешнего и внутреннего радиусов кольца приводит к постепенному выравниванию величин других параметров этого процесса, т.е. приходим к случаю прокатки плоской полосы.

4. При исследовании напряженного состояния кольца при раскатке получены два универсальных дифференциальных уравнения, из которых также получаются уравнения для случая прокатки плоской полосы. Численные расчеты осуществляются с использованием условия пластичности Треска-Сен-Венана и безразмерных величин окружного напряжения и контактного нормального давления, позволяющих полученные результаты использовать для любых металлов.

5. В среде “ABAQUS” моделирован процесс придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм. Получены полные данные распределения компонентов НДС по всему объему заготовок при различных параметрах технологических процессов. Установлено, что при различных значениях проникания роликов в цилиндрическую трубу пластически деформированная зона перемещается в сторону угла квадратного прямоугольного продукта.

6. Теоретическое объяснение причин процесса расширения пластической зоны осуществляется каноническими уравнениями метода сил. При этом

решаются следующие статически неопределимые задачи: исследование внутренних силовых факторов заданной длины окружности кругового кольца (начальное состояние) и одинакового периметра рамы квадратной формы (продукт), по соответствующим этапам их деформирования, нагруженными эквивалентными нагрузками.

7. Полученные результаты моделирования в среде “ABAQUS” процессов придавания цилиндрическим трубам квадратной и прямоугольной форм хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований, проводимых в заводских условиях. При этом особое внимание уделено причинам возникновения дефектов (радиуса углов и впадины сторон) и способам их уменьшения. Анализированы величины и распределения растягивающих напряжений по длине и кругу деформированных труб при их различных толщинах, а также влияние величины проникания валков на показатели основных дефектов.

8. В случае получения прямоугольных стальных труб из первоначальных круглых труб различных диаметров и толщин исследовалось их влияние на усилие прокатки, максимальную пластическую деформацию угла продукции и т.д. Используя полученные данные, методом Тагучи оптимизирован технологический процесс придавания цилиндрическим трубам прямоугольной формы. С этой целью была использована группа из трех основных параметров (базовые габаритные размеры труб, их начальные толщины и конструкция профиля роликов). Доказывается, что первый параметр имеет максимальное влияние на величины указанных дефектов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Petrosyan G.L., Motallebi S.R. Studying the Internal Force Factors Analyze of Circle Pipe Reshaping Process to Production Square Section Profile and Modeling on Automated Programming Medium // Collection of works XVIII International Scientific and Technical Conference, Donecq (12-17 September 2011, Sevastopol).- 2011.- V. 4.- P.125-129.
2. Պետրոսյան Գ.Լ., Մոտալլեբի Ս.Ռ., Լևոնյան Հ. Հարթ նախապատրաստվածքների սառը և տաք գլոցման գործընթացների համալիր հետազոտումը “ABAQUS” ծրագրային միջավայրում // ՀՊՃՀ(Պ) Լրաբեր: Գիտ. և մեթ. հոդվ. ժող.- Երևան, 2011.- Հատոր 3, մ.1.- էջ 67-72:
3. Պետրոսյան Գ.Լ., Սահակյան Վ.Ա., Մոտալլեբի Ս.Ռ. Ողղանկյուն հատույթով շերտի գլոցման գործընթացի խնդրի լուծման ճարտարագիտական մեթոդ // Հայաստանի ճարտ. ակադ. Լրաբեր. – 2011. – Հ. 8, № 3.- էջ 514-518:
- 4.Петросян Г.Л., Моталлеби С.Р., Саакян В.А. Исследование реального процесса прокатки плоской полосы с учетом влияния пористости материала и числа оборотов валков // Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред: Труды 7-й Международной

- конференции, сентябрь 19-23, 2011.- Горис-Степанакерт, 2011.- С. 333-338.
5. Պետրոսյան Գ.Լ., Պետրոսյան Հ.Գ., Մոտալլեբի Ս.Ռ. Մեծ կորության շառավղով օղակի գրտնակման գործընթացի վերլուծական մեթոդով մոդելավորումը: Հաղորդում 1. Օղակի գրտնակման գործընթացի երկրաչափական պարամետրերի որոշման առանձնահատկությունները // Հայաստանի Ճարտ. ակադ. Լրաբեր. – 2011. –Հ. 8, № 2.- էջ 337-341:
 6. Петросян Г.Л., Петросян А.Г., Моталлеби С.Р. Особенности определения компонентов напряженного состояния процесса раскатки кольца большого радиуса кривизны/ Известия НАН Армении. Механика.-2012.- Т.65, N3.- С.61-67.
 7. Petrosyan G.L., Petrosyan H.G., Motallebi S.R. Modeling of large radius curvature ring rolling process by an analytical method // “8th European Solid Mechanics Conference” in Graz, Austria, July 9-13, 2012.- In Programme P.151, in Book of Abstract 2 p.
 8. Motallebi S.R. Optimization of cylindrical pipe reshaping process for production of rectangular pipe// Proceedings of Engineering academy of Armenia (PEAA).- 2012.- V. 9, № 3.- P. 576-583.
 9. Seyed Reza Motallebi, Amin Khalili Rad. Investigation of Influence Parameters on the Hot Rolling Process Using Finite Element Method // Journal of Materials Science and Engineering B 1.- 2011.- P. 332-338.
 10. Петросян Г.Л., Петросян А.Г., Сафарян М.Б., Моталлеби С.Р. Вопросы численного и экспериментального моделирования процесса раскатки кольца большого радиуса кривизны // Сборник трудов „Машиностроение и Техносфера XXI века” Международной научно-технической конференции.- Донецк, Том 2, 2012 (17-22 сентября 2012, Севастополь).- С. 273-275.

ՄԵՅՐԴ ՌԵԶԱ ՄՈԹԱԼԼԵԲԻ
ՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ԼԱՍՄԱՊԱՏՐԱՍՏՎԱԾՔՆԵՐԻՑ ԳԼՈՑՄԱՍԲ ՏԱՐԲԵՐ
ՀԱՏՈՒՅԹՆԵՐՈՎ ԱՐՏԱԴՐԱՏԵՍԱԿՆԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾՆՆԹԱՑՆԵՐԻ
ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄ ԵՎ ՀԱՄԱՊԱՏԱՍԽԱՆ ԼԱՐՎԱԾԱԴԵՖՈՐՄԱՑԻՈՆ
ՎԻՃԱԿՆԵՐԻ ՌԻՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆ
Անտառագիտ

Վերլուծական մեթոդով ուղղանկյուն հատույթով շերտի գլոցման գործընթացի լարվածադեֆորմացիոն վիճակի (ԼԴՎ) հետազոտումը բավականին բարդ է և քիչ ուսումնասիրված: Վերջին ժամանակներս երևան եկան տվյալներ, որոնք ստացվել են վերջավոր տարրերի մեթոդի հիման վրա ստեղծված “ABAQUS” ավտոմատացված ծրագրային փաթեթի (ԱԾՓ) միջավայրում: Սակայն այդ տվյալները սակավաթիվ են: Հետևաբար, գլոցման գործընթացի ԼԴՎ հետազոտումը լիովին արդիական է:



Աշխատանքի նպատակն է՝ բացահայտել շերտի գլոցման, մեծ տրամագծով օղակի գրտնակման, ինչպես նաև կլոր խողովակի քառակուսի և ուղղանկյան ձև տալու գործընթացների առանձնահատկությունները, զարգացնել դրանց տեսական, համակարգչային և փորձարարական հետազոտության մեթոդները և որոշել տեխնոլոգիական գործընթացների օպտիմալ պարամետրերը, որոնք հնարավորություն կտան կատարելագործել դրանք՝ տվյալ հատկություններով արտադրանք ստանալու համար:

Նախաբանում հիմնավորվել է թեմայի արդիականությունը, ներկայացվել են հետազոտման նպատակը, ինչին հասնելու համար դրված և լուծված խնդիրները, հետազոտման մեթոդները, գիտական նորույթը, գործնական արժեքը, հետազոտման արդյունքների իրականացումն և պաշտպանության հանած ատենախոսության հիմնական դրույթները:

Առաջին գլխում նկարագրվում է վերը նշված տեխնոլոգիական գործընթացների էությունը և քննարկվել են այդ խնդիրների լուծմամբ ստացված հայտնի տվյալները: Քանի որ ուղղանկյուն հատույթով շերտի գլոցման գործընթացը բոլոր այդ հետազոտությունների հիմքն է, մանրամասն քննարկվում են դրա տեսական և տեխնոլոգիական հարցերը:

Հատուկ ուշադրություն է դարձվում դիֆերենցիալ հավասարումների ստացմանը և ինտեգրմանը, ինչպես նաև “ABAQUS” ԱԾՓ-ի միջավայրի օգտագործմանը, որոնք հնարավորություն են տալիս որոշել դեֆորմացված նախապատրաստվածքների ԼԴՎ-ի բաղադրիչները:

Երկրորդ գլխում վերլուծական եղանակով ցույց է տրվում ուղղանկյուն հատույթով եռակաված շերտի գլոցման դեպքում նյութի ծակոտկենության փոքրացման արդյունավետությունը: Այդ նպատակի համար ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսության հիման վրա մշակվել է եռակաված շերտի գլոցումից հետո նյութի ծակոտկենության գնահատման մեթոդ:

Ապացուցվում է, որ գլոցման գոտու դեֆորմացման փոքր աստիճաններում նյութի ծակոտկենությունը գործնականում հավասարվում է գրոյի, ինչպես նաև փոքր քայլերով խնդիրը լուծելու համար կարելի է ընդունել յուրաքանչյուր քայլում չափում չունեցող հպակային նորմալ ճնշման մեծությունը հաստատուն և հավասար մեկի ($\bar{p}=1$): Դա հնարավորություն կտա գլոցումից հետո նյութի ծակոտկենությունը որոշել առանց շերտի ԼԴՎ-ի նախնական հետազոտման:

Ուղղանկյուն հատույթով շերտերի լարվածադեֆորմացիոն վիճակների հետազոտումը սառը և տաք գլոցման դեպքերում “ABAQUS” ԱՕՓ-ի միջավայրում իրականացվել է համալիր ձևով՝ հաշվի առնելով տեխնոլոգիական գործընթացի տարբեր պարամետրեր:

Երրորդ գլխում ներկայացված է մեծ տրամագծով օղակի գրտնակման գործընթացի սկզբնական և ընթացիկ երկրաչափական փոխկապակցված պարամետրերի որոշման մեթոդիկա, ինչպես նաև դրա լարվածային վիճակի հետազոտության համար ստացվել է համապիտանի երկու դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգ:

Ստացված թվային տվյալների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ օղակի արտաքին և ներքին շառավիղների մեծացումը հանգեցնում է տանող և պարապ գրտնակների շառավիղների, ինչպես նաև տեխնոլոգիական գործընթացի այլ նույնատիպ պարամետրերի մեծությունների աստիճանաբար հավասարեցման, ինչը բնորոշ է հարթ շերտի գլոցման դեպքին: Ընթացիկ երկրաչափական պարամետրերի փոփոխությունը հանգեցնում է նաև հարթ շերտի գլոցման դեպքի լարվածային վիճակի հետազոտման հավասարումների ստացմանը:

Չորրորդ գլխում կլոր խողովակը քառակուսաձև և ուղղանկյունաձև դարձնելու գործընթացների մոդելավորումը հիմնականում իրականացվում է “ABAQUS” ԱՕՓ-ի միջավայրում: Ստացվել են նախապատրաստվածքի ամբողջ ծավալով ԼԴՎ-ի բաղադրիչների բաշխման լրիվ տվյալները տեխնոլոգիական գործընթացի տարբեր պարամետրերի դեպքում: Ցույց է տրվել, որ գրտնակի կլոր խողովակի մեջ ներխրման տարբեր արժեքների դեպքում պլաստիկ դեֆորմացման գոտու եզրը տեղաշարժվում է քառակուսաձև կամ ուղղանկյունաձև արտադրանքի անկյան կողմը, ինչը բացատրվում է ուժային մեթոդի կանոնական հավասարումների միջոցով՝ խողովակից անջատված միևնույն բնութագրիչ չափսերով և համարժեք բեռնավորված կլոր օղակի (սկզբնական վիճակ) և քառակուսաձև շրջանակի (արտադրանք) ստատիկորեն անորոշելի խնդիրների լուծմամբ:

“ABAQUS” ԱՕՓ-ի միջավայրում կլոր խողովակը քառակուսաձև և ուղղանկյունաձև դարձնելու գործընթացների մոդելավորման դեպքում հատուկ ուշադրություն է դարձվում արտադրանքի թերությունների առաջացման պատճառներին և դրանց պակասեցման մեթոդներին: Օգտագործելով ստացված արդյունքները՝ Թագույսի մեթոդով կլոր խողովակը ուղղանկյունաձև դարձնելու տեխնոլոգիական գործընթացը օպտիմալացվել է:

MODELING OF ROLLING PROCESSES OF METALLIC BLANKS FOR MAKING DIFFERENT SECTION ITEMS AND THE STUDY OF CORRESPONDING STRESS-STRAIN STATE

Abstract

Analytic investigation of rolling processes is a rather complicated and little-studied process especially this concerns the rolling of different types of blanks of cast and sintered powder materials, which depends on their multivariate nature. Recently, data acquired on the basis of finite element method (FEM) – one of the most improved numerical methods with application of automated program package (APP) “ABAQUS” have appeared. However, these data are few in number. Proceeding from the above mentioned, investigation of the stress-strain state in the rolling of different types of blanks and their usage for determination of the technological parameters of the corresponding processes is quite timely.

The objective of this work is to reveal the peculiarities of strip rolling, large diameter ring expansion, as well as cylindrical pipe reshaping into a square and rectangular form, and the development of methods of their theoretical, computer and experimental research and determination of the optimal parameters, allowing improvement of the technological processes for the production of items with the given properties.

In the introduction the topicality of the subject is grounded, the objective, the problems have been set and solved; methods of research, scientific novelty, practical value and implementation of the research results and the main positions of the dissertation to be defended are presented.

In the first chapter the essence of strip rolling processes, large diameter ring expansion and cylindrical pipe reshaping into a square and rectangular form are described, the known data of their theoretical investigation and modeling in the medium of automated program package (APP) “ABAQUS” are discussed.

Since the rectangular cross section strip rolling process is the basis of all these investigations the theoretical and technological problems of that process are discussed in detail.

Special attention is paid to the obtaining and integration of differential equations, as well as to the usage of the medium of APP “ABAQUS”, which allow defining the components of the stress-strain state of the deformed blanks.

In the second chapter the effectiveness of the decrease of material porosity in the case of rectangular cross section sintered stripe rolling by the analytical method is revealed. The method of estimation of the porosity value of a sintered stripe after rolling has been developed on the basis of porous material plasticity deformation theory. It is proved, that in case of low levels of deformation of the rolling zone, on decreasing the rolling angle from 8^0 to 5^0 the material porosity is practically equal to zero.

It is considered that the technological process of rectangular cross section stripe rolling is usually realized by numerous small passages. It is shown that in this case it is necessary to solve the problem by passages, accepting the value of dimensionless contact normal pressure in each passage as constant and equal to one ($\bar{p}=1$). This allows

determining the porosity of the material after rolling without preliminary investigation of the stress-strain state of the strip.

The stress-strain state of rectangular cross section strips during cold and hot rolling in the medium of APP “ABAQUS” is investigated in complex, taking into account different parameters of the technological process: roller diameter, number of their revolutions, deformation degree of strip material and so on. The obtained results of computer modeling correspond to the theoretical data and contain a lot of other important information about the technological process, which is impossible to define by theoretical methods.

In the third chapter the methodology of defining initial and current interconnected geometrical parameters of large diameter ring expansion process is presented. The system of two universal differential equations is obtained for the investigation of ring stress state during expansion.

Numerical calculations are carried out using plasticity condition of Treska – Sen-Venan, dimensionless value of stress and contact normal pressure, which allow using the obtained results for rings of any metal.

By the analysis of the obtained data it was shown that increase of the ring external and internal radii leads to the gradual equating of the values of the radii of leading and idle rollers and other corresponding parameters of the technological process that is characteristic for the case of plane strip rolling. The change of current geometrical parameters also leads to the obtaining of corresponding equations of stress state investigation of the plane strip rolling case.

In the fourth chapter the problem of modeling of the processes of the cylindrical pipe reshaping into a square and rectangular form is carried out mainly in the medium of APP “ABAQUS”. Complete data of distribution of the stress-strain state components through the whole volume of blanks at different parameters of technological process are obtained. It was determined that for different values of penetration of rollers into the cylindrical tube the border of plastic deformed zone is moved to the angle of the square or rectangular form of the product.

Theoretical explanation of the cause of the plastic zone border displacement process is realized by canonical equations of the method of forces by solving the following statically indeterminate problems: investigation of internal power factors of certain circumference length of a circular ring (initial state), loaded with four symmetrically placed concentrated compressive forces and a square frame of the same perimeter (final product), loaded with uniformly distributed equivalent load, as well as a comparison of the obtained data.

The obtained results of modeling in the medium of APP “ABAQUS” of processes of cylindrical pipe reshaping into a square and rectangular form conform well to the experimental research data carried out in plant conditions. At the same time, it focuses on the cause of defects and ways of reducing them.

On obtaining rectangular steel tubes the effects of various diameters and thickness of walls upon force of rolling, upon maximum plastic deformation of the angle of production, etc. are analyzed.

Using the obtained data by the method of Taguchi the technological process of cylindrical pipe reshaping into a rectangular form was optimized. For this purpose, using a group of three main parameters (basic dimensions of pipes, their initial thickness and roller profile structure) it is proved that the first parameter has maximum influence on the values of the mentioned defects.