

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

*Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки
матеріалів у машинобудуванні та металургії*

№ 31 (1203) 2016

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ «ХПІ» 2016

Вісник Національного технічного університету «ХПІ»

Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 31 (1203)– 83 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАНУ (**голова**)

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**)

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл. -кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитрисенко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Николаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.

Заступник відповідального редактора: Ю. О. Плєснецов, канд. техн. наук, ст.н.с.

Відповідальний секретар: В. М. Левченко, канд. тех. наук, доц.

Члени редколегії: І. С. Алієв, д-р техн. наук, проф., Г. А. Баглюк, д-р техн. наук, проф.; Бар Рюдигер, д-р техн. наук, проф.; В. В. Драгобецький, д-р техн. наук, проф.; С. В. Єршов, д-р техн. наук, проф.; В. Л. Калюжний, д-р техн. наук, проф.; Є. М. Смирнов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; М. Є. Тараненко, д-р техн. наук, проф.; В. А. Тітов, д-р техн. наук, проф.; О. І. Тришевський, д-р техн. наук, проф.; С. В. Федоров, д-р техн. наук, проф.; Є. А. Фролов, д-р техн. наук, проф.; В. Хомберг, д-р техн. наук, проф.; В. В. Чигиринський, д-р техн. наук, проф.

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»

Протокол № 8 від 04 листопада 2016 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2016

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

BULLETIN
OF
THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

*Series: Innovative technologies and equipment handling
materials in mechanical engineering and metallurgy*

No 31 (1203) 2016

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkiv
NTU "KhPI" 2016

Collected Works. Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – No 31 (1203) – 83 p.

State Edition

Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy

KB No 5256 from July 2, 2001

The collection is published in Ukrainian and Russian.

The Bulletin of the National Technical University "KhPI" is put on "The List of Scientific Professional Editions of Ukraine that publish the data of theses for the degree of candidate of sciences and the degree of doctor" approved by the Decision of the Certifying Board of the Ministry of Education and Science of Ukraine as to the Activities of Special Academic Councils of December 2015. Order No1328 (Supplement No8) of 21.12.2015.

Coordinating Council:

L.L. Tovazhnyansky, Dr. of Sciences, correspondent-member of National Academy of Sciences (head)

K.A. Gorbunov, PhD. (secretary)

A.P. Marchenko, Dr. of Sciences, professor; E.I. Sokol, Dr. of Sciences, correspondent-member of National Academy of Sciences, Dr. of Sciences, professor; E.E. Aleksandrov, Dr. of Sciences, professor; A. Boyko, Dr. of Sciences, professor; F.F. Gladkiy, Dr. of Sciences, professor; M.D. Godlevskiy, Dr. of Sciences, professor; A.I. Grabchenko, Dr. of Sciences, professor; V.G. Danko, Dr. of Sciences, professor; V.D. Dmytryyenko, Dr. of Sciences, professor; J.F. Domnina, Dr. of Sciences, professor; V. Epifanov, PhD., professor; Y.I. Zaitsev, PhD., professor; P. Kachanov, Dr. of Sciences, professor; V.B. Klepikov, Dr. of Sciences, professor; S. Kondrashov, Dr. of Sciences, professor; V.M. Koshelnyk, Dr. of Sciences, professor; V. Kravchenko, Dr. of Sciences, professor; G.V. Lisachuk, Dr. of Sciences, professor; O.K. Morachkovskiy, Dr. of Sciences, professor; V. Nikolaenko, PhD., professor; P.G. Pererva, Dr. of Sciences, professor; V.A. Pulyaev, Dr. of Sciences, professor; M.I. Rischenko, Dr. of Sciences, professor; V.B. Samorodov, Dr. of Sciences, professor; G.M. Suchkov, Dr. of Sciences, professor; M.A. Tkachuk, Dr. of Sciences, professor.

The editorial board of the series:

Editor: A.P. Marchenko, Dr. of Sciences, professor.

Deputy managing editor: Y.O. Plesnetsov, PhD., senior scientist

Secretary: V.N. Levchenko, PhD., Sciences Assoc.

Members of the Editorial Board: I.S. Aliyev, Dr. of Sciences, professor; G.A. Bahlyuk, Dr. of Sciences, professor; Bar Ryudyher, Dr. of Sciences, professor; V. V. Drahobetsky, Dr. of Sciences, professor; S.V. Ershov, Dr. of Sciences, professor; V. L. Kalyuzhny, Dr. of Sciences, professor; E.M. Smirnov, Dr. of Sciences, professor; G.M. Suchkov, Dr. of Sciences, professor; M.E. Taranenko, Dr. of Sciences, professor; V.A. Titov, Dr. of Sciences, professor; O.I. Trishevsky, Dr. of Sciences, professor; S.V. Fedorov, Dr. of Sciences, professor; E.A. Frolov, Dr. of Sciences, professor; V. Homberh, Dr. of Sciences, professor; V. V Chigirinsky, Dr. of Sciences professor.

Recommended for publication by the Academic Council of NTU "KhPI"

Protocol No 8 from November 04, 2016

УДК 621.777.01

Л. И. АЛИЕВА, К. В. ГОНЧАРУК, А. В. ШКИРА

**ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ СТЕРЖНЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ С ФЛАНЦЕМ
ПРИ РАДИАЛЬНО-ПРЯМОМ ВЫДАВЛИВАНИИ**

Проведено моделювання процесу радіально-прямого видавлювання деталей з фланцем і стержневим отростком методом кінцевих елементів при допомозі програмного продукту QForm 2D. Цель данного исследования – определить характер изменения энергосиловых параметров выдавливания и формоизменения заготовки, провести сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных. В соответствии с проведенными исследованиями установлено, что очаг интенсивной деформации сосредоточен на переходных кромках деформирующего инструмента. Методом планирования эксперимента получены зависимости приведенного давления выдавливания и формоизменения от геометрических параметров получаемой детали. Экспериментально подтверждены теоретические исследования законности формоизменения стержневых деталей с фланцем.

Ключевые слова: комбинированное выдавливание, приведенное давление, метод конечных элементов, формоизменение.

Проведено моделювання процесу радіально-прямого видавлювання деталі з фланцем і стрижневим відростком методом кінцевих елементів за допомогою програмного продукту QForm 2D. Мета даного дослідження – визначити характер зміни енергосилових параметрів видавлювання і формозміни заготовки, провести порівняльний аналіз теоретичних і експериментальних даних. Відповідно до проведеного дослідження, було встановлено, що осередок інтенсивної деформації зосереджений на перехідних крайках деформуючого інструменту. Методом планування експерименту отримані залежності приведенного тиску видавлювання і формозміни від геометричних параметрів одержуваної деталі. Експериментально підтверджені теоретичні дослідження формозміни стрижневих деталей з фланцем.

Ключові слова: комбіноване видавлювання, приведений тиск, метод кінцевих елементів, формозміна.

A simulation of the radial direct extrusion parts with a flange and a rod appendage finite element method using the software QForm 2D. The goal of this study – to determine the behavior of the power parameters of extrusion and forming the workpiece, a comparative analysis of theoretical and experimental data. According to the research, it was found that the focus of intense deformation is focused on transition edges deforming tool. Methods of planning the experiment to obtain the dependence reduced pressure extrusion and forming the geometric parameters of receiving items. Experimentally verified theoretical studies forming core parts with flange. The finite element method assesses the stress-strain state of the workpiece and the values of deformations in the radial direct extrusion. It was found that the deformation zone is centered on the transition edges of half-matrix. Graphic dependences described energy-power parameters and forming the workpiece. Comparative analysis of theoretical and experimental deformation pressure data showed that the estimates by 5-12% higher than the values obtained in the experiments

Keywords: composite extrusion, the reduced pressure, finite element method, forming.

Введение. Одним из прогрессивных ресурсосберегающих методов получения изделий высокого качества является холодная объемная штамповка. При холодной объемной штамповке достигается: деформационное упрочнение, отсутствие надрезов, появляется направленность волокон вдоль конфигурации штампованной заготовки, улучшается микрогеометрия, увеличивается коэффициент использования металла (по сравнению с обработкой резанием, литьём и горячей штамповкой).

Развитие науки тесным образом связано с повышением практического использования ее результатов в промышленности. Важнейшим фактором в решении технологических задач является разработка новых процессов, позволяющих получать изделия высокого качества с заданными эксплуатационными свойствами и с наименьшими затратами на их производство. В связи с этим необходимо также непрерывное улучшение традиционных процессов холодного выдавливания и переход от простых базовых процессов к более сложным схемам – комбинированным и гибридным методам обработки [1, 2].

Оценка энергосиловых зависимостей выдавливания на основе метода конечных элементов с применением элементов планирования эксперимента позволяет оценить силовой режим процесса [3, 4].

Одним из перспективных процессов холодной объёмной штамповки является комбинированное выдавливание, в частности радиально-прямое (рис. 1). Данный процесс может быть успешно применён для изготовления изделий с фланцем.

Целью работы является определение энергосиловых параметров выдавливания и характера формоизменения заготовки при комбинированном выдавливании деталей с фланцем.

Методика исследований. Анализ процесса радиально-прямого выдавливания проводился с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Граничные условия для осесимметричной задачи были заданы в следующем виде: упрочнение алюминиевого материала АД31 описано кривой упрочнения $\sigma_s = 191.55 \cdot e^{0.202} \text{ МПа}$ при скорости деформирования $0,25 \text{ с}^{-1}$, плотность материала 2800 кг/м^3 ; модуль Юнга 71000 МПа ; коэффициент Пуассона $0,3$; коэффициент трения по Леванову $\mu_s = 0,16$; скорость перемещения инструмента 1 мм/с ; инструмент абсолютно жесткий.

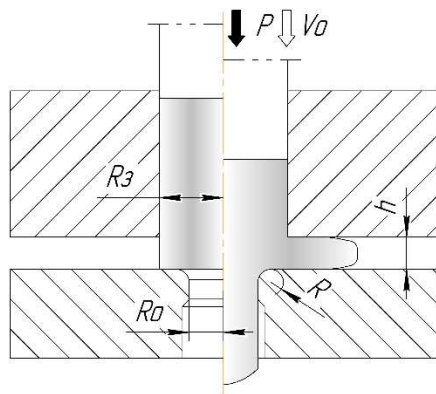


Рис. 1 – Схема комбинированного выдавливания

Применение математического аппарата планирования эксперимента позволяет произвести статистическую обработку полученных расчетных данных КЭ-модели [2].

В результате планирования эксперимента ожидается получить зависимости энергосиловых параметров выдавливания и формоизменения от геометрических параметров (относительная высота фланца $\bar{h} = h/R_3$, относительный радиус отрезка $\bar{R}_0 = R_0/R_3$ и относительный радиус закругления матрицы $\bar{R} = R/R_3$).

Исследуется трехфакторная модель. Изменение факторов будем вести на трех уровнях. Первым этапом планирования является выбор центра плана X_{i_0} и определение шагов варьирования ΔX_i по каждому фактору. Интервалы варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе на основном, верхнем и нижнем уровнях указаны в таблице уровней факторов (табл.1).

Таблица 1 – Уровни факторов

Факторы	$X_1 (\bar{h})$	$X_2 (\bar{R}_0)$	$X_3 (\bar{R})$
Основной уровень (X_{i_0})	0,33	0,50	0,14
Интервал варьирования (ΔX_i)	0,13	0,16	0,07
Верхний уровень ($x_i = 1$)	0,46	0,66	0,21
Нижний уровень ($x_i = -1$)	0,20	0,34	0,07

Кодированные значения факторов (x_i) связаны с натуральными значениями (X_i) следующим соотношением (1):

$$x_i = (X_i - X_{i_0}) / \Delta X_i, \quad (1)$$

где X_{i_0} – натуральное значение основного уровня;

ΔX_i – интервал варьирования;

i – номер фактора.

Уравнение регрессии представлено формулой (2). Коэффициенты регрессионного уравнения определены для данной схемы в табл. 2.

$$Y(h, R_0, R) = b_0 + b_1 \cdot \frac{h - 0.33}{0.13} + b_2 \cdot \frac{R_0 - 0.5}{0.16} + b_3 \cdot \frac{R - 0.14}{0.07} + \left(b_{12} \cdot \frac{h - 0.33}{0.13} \cdot \frac{R_0 - 0.5}{0.16} \right) + \left(b_{13} \cdot \frac{h - 0.33}{0.13} \cdot \frac{R - 0.14}{0.07} \right) + \left(b_{23} \cdot \frac{R_0 - 0.5}{0.16} \cdot \frac{R - 0.14}{0.07} \right) + b_{11} \cdot \left(\frac{h - 0.33}{0.13} \right)^2 + b_{22} \cdot \left(\frac{R_0 - 0.5}{0.16} \right)^2 + b_{33} \cdot \left(\frac{R - 0.14}{0.07} \right)^2 \quad (2)$$

Таблица 2 – Коэффициенты регрессионного уравнения

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
Энергосиловые параметры выдавливания										
P	19,3	-4,1	2	-3,2	1,7	3,5	-1,5	4,1	-5	6,63
p	342	-19	63	-12	3,5	12,3	-10	4,4	-2	11,5
\bar{p}	1,64	-0,1	0,3	-0,1	0,1	0,05	-0,1	0,1	0,4	0,06
Истечение металла										
$\frac{V_\phi}{V}$	0,7	0,08	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	-0,1	0,01

Для проверки приемлемости полученных расчетных выражений, были проведены соответствующие эксперименты радиально-прямого выдавливания. Натурные эксперименты проводились с использованием материала АД31 на испытательной машине МС-500 в универсально-переналаживаемом штампе. Использовалась цилиндрическая заготовка с диаметром 45 мм и высотой 28 мм. Изменение значения высоты фланца выдавливаемой детали находилось в диапазоне $h = 5 \div 7 \div 9$ мм, изменение диаметра отрезка – $2R_0 = 16 \div 21.2 \div 28$ мм. Коэффициент трения $\mu = 0.08$ достигался за счет использования козьего жира как технологической смазки.

Результаты исследований. По результатам расчетов МКЭ получен массив математических экспериментов, в виде полей деформаций и напряжений. Так же метод позволил проследить поэтапное формоизменение заготовки. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

В соответствии с проведенным моделированием в пакете QForm [5], было установлено, что очаг деформации сосредоточен на переходных кромках деформирующего инструмента (полуматриц); максимальные значения логарифмической деформации находятся в пределах 0,82–0,85. Искажение делительной сетки показывает отсутствие проявлений дефектов в заготовке.

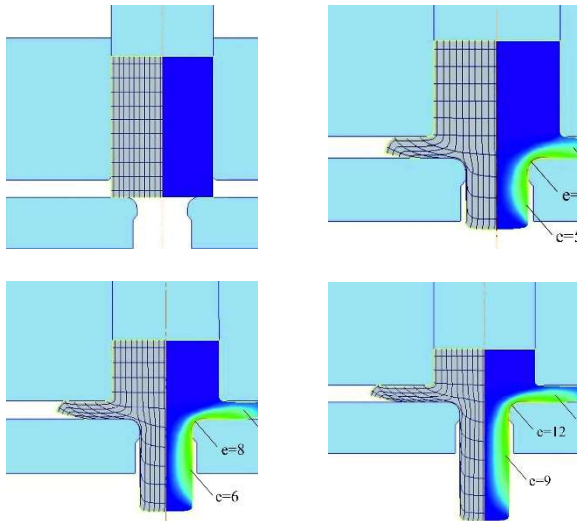
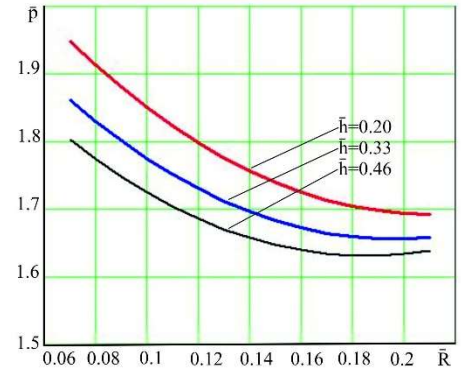


Рис. 2 – Поетапное формоизменение заготовки

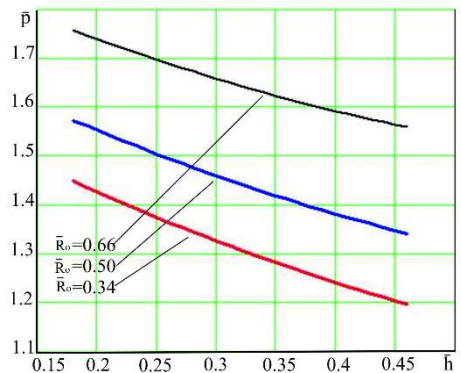
С использованием методики [6], при помощи программы MathCAD были получены зависимости приведенного давления выдавливания (рис. 3) и формоизменения детали от варьируемых величин (рис. 4).

Из графиков, приведенных на рис. 3а, видно, что приведенное давление с увеличением относительного радиуса закругления матрицы \bar{R} падает. Это связано с появлением плавного течения материала. Так же при наличии большего радиуса закругления снижается концентрация напряжений в месте изменения поперечного сечения.

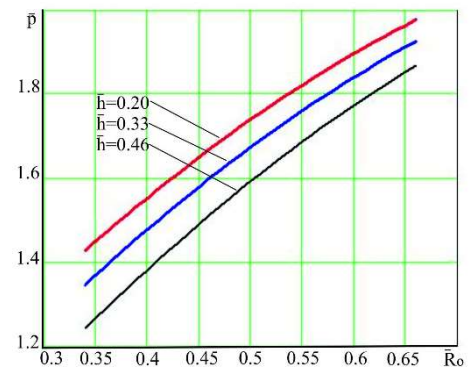
Аналогичный характер изменения энергосиловых параметров при изменении относительной высоты фланца \bar{h} . Снижение значений давлений происходит за счет уменьшения степени деформации во фланце. При изменении относительного радиуса отростка \bar{R}_0 , приведенное давление возрастает с увеличением данного параметра. Это связано с изменением напряженного состояния при прямом выдавливании и увеличением площади поверхности контактного трения с нижней полуматрицей.



а



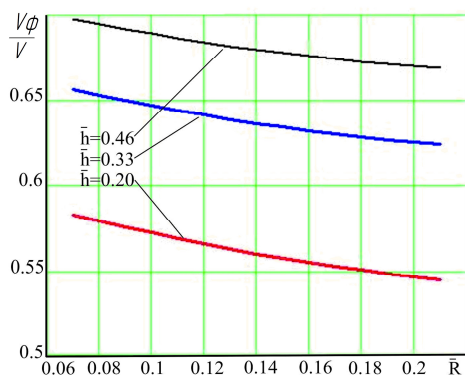
б



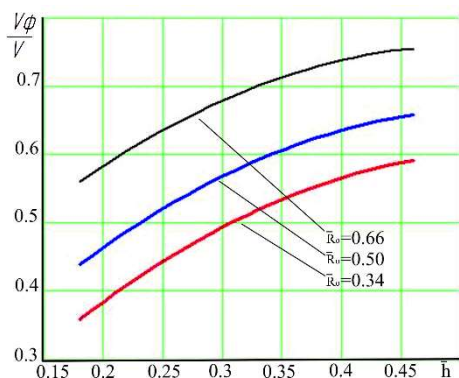
в

Рис. 3 – Графики зависимости приведенного давления выдавливания от относительных геометрических параметров процесса:
а – в зависимости от относительного радиуса закругления матрицы; б – в зависимости от относительной высоты фланца; в – в зависимости от относительного радиуса отростка

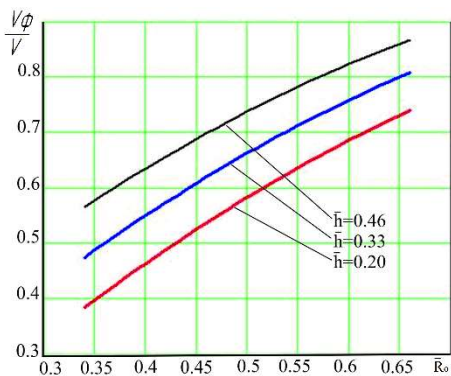
Для анализа формоизменения было рассмотрено соотношение количества истекаемого материала во фланец к общему объему проработанного материала V_{ϕ}/V . Полученные графики показаны на рис. 4 [4].



а



б



в

Рис. 4. – Графики оценки формоизменения детали при разных геометрических параметрах:

а – при увеличении относительного радиуса закругления матрицы; б – при увеличении относительной высоты фланца и относительного радиуса отрезка; в – при возрастании относительного радиуса отрезка

При увеличении относительного радиуса закругления матрицы \bar{R} (рис. 4а), количество материала, который затекает во фланец, уменьшается. Это связано с изменением зоны среза при прямом истечении металла.

Увеличение относительной высоты фланца \bar{h} и относительного радиуса отрезка \bar{R}_0 приводит к увеличению количества металла, который заполняет полость под фланец детали. Также истечению материала в радиальном направлении благоприятствует разноименная схема напряженного состояния во фланце.

С возрастанием относительного радиуса

отрезка \bar{R}_0 облегчаются условия для течения материала в прямом направлении.

На рис. 5 показан ряд деталей, полученных при проведении экспериментов в лабораторных условиях.



Рис. 5 – Детали, полученные комбинированным выдавливанием

По результатам экспериментальных данных построен график зависимости приведенного давления выдавливания от относительного радиуса отрезка \bar{R}_0 (рис. 6).

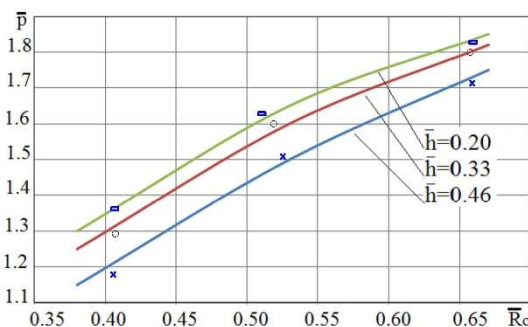


Рис. 6 – Зависимость приведенного давления выдавливания от радиуса отрезка

При сравнения теоретических данных с экспериментальными (рис. 7), установлено, что теоретические расчеты на 5–12 % превышают значения, полученные при лабораторных экспериментах.

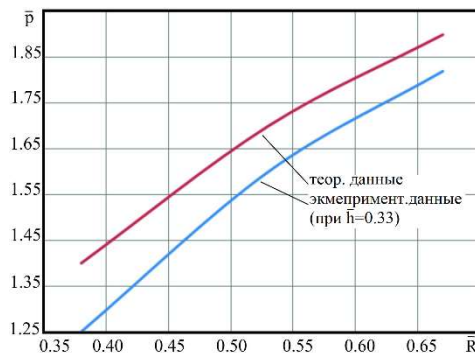


Рис. 7 – Сравнительный график теоретических и экспериментальных данных при комбинированном выдавливании ($\mu=0,08$)

Выводы. Методом конечных элементов дана оценка напряженно-деформированного состояния заготовки и определены значения деформаций при радиально-прямом выдавливании. Установлено, что очаг деформации сосредоточен на переходных кромках полуматриц. Графическими зависимостями описаны энергосиловые параметры и параметры формоизменения заготовки. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных давлений деформирования показал, что расчетные данные на 5–12 % превышают значения, полученные при экспериментах.

Список литературы:

1. Степанский Л.Г. Система управления качеством изделий, изготавливаемых холодной объемной штамповкой / Л.Г. Степанский, А.Н. Шляхин, А.В. Кутышкин // КШП, № 9, 2005, с. 44–46.
2. Kawalla R., Lehnert W.. Качество путем обработки давлением. Qualitat durch Umformung. Metalurgija (Zagreb). 2004. 43, No 3, с. 169–179. Нем.; рез. рус., хорват.. HR. ISSN 0543-5846.
3. Алиева Л.И. Компьютерное моделирование силового режима при комбинированном выдавливании стержневых деталей / Л.И. Алиева, Г.П. Клименко, С. В. Мартынов, К.В. Гончарук // Научный Вестник ДГМА. – Краматорск: ДГМА, 2013. – № 2 (12Е). – С. 44–51.
4. Алиева Л.И. Силовые параметры комбинированного выдавливания стержневых деталей с фланцем / Л.И. Алиева, К.В. Гончарук // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 1 (40). – С. 18–22.
5. Биба Н.В. QForm – универсальная и эффективна программа для моделирования коки и штамповки / Н.В. Биба, С.А. Стебунов, Ю.А. Гладков, П.С.Мордвинцев // КШП, № 1, 2011, с. 36–42.
6. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методом планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов // М. : Машиностроение. – 1980. – 304 с.

References (transliterated)

1. Stepankiy L.G. Sistema upravleniya kachestvom izdeliy, izgotovlyаемых holodnoy ob'emnoy shtampovkoy [The quality management system of products that are made with cold forging]. KShP, No 9, 2005, p. 44–46.
2. Kawalla R., Lehnert W.. Kachestvo putem obrabotki davleniem. [Quality by Forming] Qualitat durch Umformung. Metalurgija (Zagreb). 2004. 43, No 3, p. 169–179. Nem.; rez. rus., horvat.. HR. ISSN 0543-5846.
3. Alieva L.I. Kompyuterno modelirovanie silovogo rezhima pri kombinirovannom vyidavlivanii sterzhnevyyh detaley [Computer simulation of the power mode when the combined extrusion rod parts]. Nauchniy Vestnik DGMA. – Kramatorsk: DGMA, 2013. – No 2 (12E). – P. 44–51.
4. Alieva L.I. Silovyye parametry kombinirovannogo vyidavlivaniya sterzhnevyyh detaley s flantsem [Power parameters of the combined extrusion rod parts with flange]. Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnykh trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2015. – No 1 (40). – P. 18–22.
5. Biba N.V. QForm – universalnaya i effektivnaya programma dlya modelirovaniya koki i shtampovki [QForm – versatile and effective program for the simulation of coca and punching]. KShP, No 1, 2011, P. 36–42.
6. Novik F.S. Optimizatsiya protsessov tehnologii metallov metodom planirovaniya eksperimentov [Process optimization technology of metals experimental design method]/Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. – 304 p.

Поступила (received) 30.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Формоизменение стержневых деталей с фланцем при радиально-прямом выдавливании / Л. И. Алиева, К. В. Гончарук, А. В. Шкира // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 5–10. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

Формозміна стержневих деталей з фланцем при радіально-прямою видавлюванні / Л. І. Алієва, Х. В. Гончарук, О. В. Шкіра // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 5–10. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

Bar forming parts with flanges radial direct extrusion / L. I. Aliieva, K. V. Goncharuk, A. V. Shkira // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 30 (1202). – P. 5–10. – Bibliogr.: 6 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Алиева Лейла Игратовна – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Обработка металлов давлением» Донбасской государственной машиностроительной академии, ул. Парковая, 61/85, г. Краматорск, Украина, 84301, тел.: (06264) 41-67-20, e-mail: omd@dgma.donetsk.ua

Алієва Лейла Ігратовна – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри «Обробка металів тиском» Донбаської державної машинобудівної академії, вул. Паркова, 61/85, м. Краматорськ, Україна, 84301, тел. : (06264) 41-67-20, e-mail: omd@dgma.donetsk.ua

Aliieva Leila, Ph.D. – associate professor, Doctoral Student of the Department "Metal Forming" Donbass State Engineering Academy, ul. Park, 61/85, Kramatorsk, Ukraine, 84324, contact phone: (06264) 41-67-20, e-mail: omd@dgma.donetsk.ua

Гончарук Кристина Васильевна – аспирант кафедры «Обработка металлов давлением» Донбасской государственной машиностроительной академии, ул. Парковая, 44/30, г. Краматорск, Украина, 84320, тел.: (06264) 41-67-20, e-mail: goncharuk_omd@mail.ua

Гончарук Кристина Васильевна – аспирант кафедры «Обработка металлов давлением» Донбасской государственной машиностроительной академии, ул. Парковая, 44/30, г. Краматорск, Украина, 84320, тел.: (06264) 41-67-20, e-mail: goncharuk_omd@mail.ua

Goncharuk Kristina – graduate student of the Department "Metal Forming" Donbass State Engineering Academy, ul. Park and 44/30, Kramatorsk, Ukraine, 84320, contact phone: (06264) 41-67-20, e-mail: goncharuk_omd@mail.ua

Шкира Алексей Витальевич – аспирант кафедры «Обработка металлов давлением» Донбасской государственной машиностроительной академии, ул. Батюка, 2а/52, г. Славянск, Украина, 84121, тел.: (06264) 41-67-20, e-mail: salexv89@mail.ru

Шкира Олексій Віталійович – аспірант кафедри «Обробка металів тиском» Донбаської державної машинобудівної академії, вул. Батюка, 2а/52, м Слов'янськ, Україна, тел.: (06264) 41-67-20, e-mail: salexv89@mail.ru

Shkira Alexey – graduate student of the Department "Metal Forming" Donbass State Engineering Academy, ul. Park and 44/30, Kramatorsk, Ukraine, 84320, contact phone: (06264) 41-67-20, e-mail: salexv89@mail.ru.

УДК 621.774.25

С. П. ГОЖІЙ, А. В. КЛІСКО, Г. М. СУБОТЕНКО

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ЦЕНТРАЛЬНОЮ ПОРОЖНИНОЮ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

Пропонується спосіб вдосконалення процесу виготовлення деталей із застосуванням силової дії на заготовку в центральній її частині, а також формоутворення центральної порожнини в заготовці пуансоном до початку та протягом об'ємного деформування активним інструментом периферійної її частини, причому, швидкість осевого наближення пуансона може бути рівною або відмінною від швидкості осевого наближення активного інструменту. Завдяки чому збільшуються технологічні можливості виготовлення деталей штампуванням обкочуванням.

Ключові слова: штампування обкочуванням, деформування, активний інструмент.

Предлагается способ усовершенствования процесса изготовления деталей с применением силового воздействия на заготовку в центральной ее части, а также формообразование центральной полости в заготовке пуансоном до начала и в процессе объемного деформирования активным инструментом периферийной ее части, причем, скорость осевого приближения пуансона может быть равной или отличной от скорости осевого приближения активного инструмента. Благодаря этому увеличиваются технологические возможности изготовления деталей штамповкой обкатыванием.

Ключевые слова: штамповка обкатыванием, деформирование, активный инструмент.

Punching to the running as one of the types of local shaping, has a number of technological advantages over traditional, as the processing is carried out simultaneously throughout the volume of the preform. Processing Efficiency in stamping run-derives from the qualitative features that are unique to this process. Improving the running of technology achieved by the fact that the workpiece is placed in a die and a body deformed by its peripheral part of the movable force that formed the influence of the active tool, which brings the workpiece to the die by a mechanism of axial movement. A method of improving the process of manufacturing parts using force action on the workpiece in the central part, and forming a central cavity in the blank punch before and during deformation peripheral part of the workpiece using the active tool. Moreover, the axial velocity approaching the punch may be equal to or different from the axial velocity approaching the active tool. This increased technological capabilities orbital forging for manufacturing parts. The developed technology expands the possibilities of technological processes in the manufacture of complex shapes with the cavity, and also reduces the energy-power parameters of the process through the use of variable speed axial approach of the punch.

Keywrds: rotary forging, deformation, active tool.

Вступ. Штампування обкочуванням як один із видів локального формоутворення має низку технологічних переваг перед традиційними, коли обробка одночасно проводиться у всьому об'ємі заготовки. Ефективність обробки при штампуванні обкочуванням впливає із якісних особливостей, які притаманні лише цьому процесу. Зокрема відомий спосіб виготовлення деталей методом штампування обкочуванням із циліндричної заготовки із співвідношенням $4 < D/H < 0,8$ шляхом призначення кінематичних параметрів процесу, що забезпечують постійність значення коефіцієнта співвідношення площ λ під час всього процесу деформування [1].

Існує спосіб виготовлення деталей [2]. Його суть полягає в тому, що при об'ємному деформуванні фланцевих деталей до початку і протягом об'ємного деформування рухомим пуансоном, заготовку притискують до штампу постійним за напрямом, і спрямованим вздовж осі штампу, фіксуючим зусиллям, яке спрямовують крізь механізм обкочування і рухомий пуансон, який виконують з наскрізним центральним отвором.

Основним недоліком зазначених способів є вузькі технологічні можливості процесу, які обмеженні умовою неможливості деформування центральної частини заготовки.

Мета публікації – вдосконалення способу виготовлення деталей із застосуванням силової дії на заготовку в центральній її частині, шляхом утворення пластичних деформацій в цій частині заготовки, а саме – формоутворенню центральної порожнини в заготовці пуансоном до початку та протягом об'ємного деформування активним

інструментом периферійної її частини, причому, швидкість осевого наближення пуансона може бути або рівною, або відмінною від швидкості осевого наближення активного інструменту. Завдяки чому розширюються технологічні можливості процесу штампування обкочуванням та зберігаються позитивні особливості способу виготовлення деталей.

Поставлена задача досягається тим, що в способі виготовлення деталей з центральною порожниною, який полягає в тому, що заготовку розташовують в штампі і об'ємно деформують її периферійну частину рухомим зусиллям, яке утворюють дією активного інструменту, який наближують до штампа за допомогою механізму осевого наближення і переміщують по поверхні заготовки за допомогою механізму обкочування, а на центральну частину заготовки додатково діють постійним за напрямом осевим зусиллям, яке утворюють дією пуансона, і яке спрямовують крізь механізм обкочування та активний інструмент, які виконані з крізними центральними отворами, **новим** є те, що центральну порожнину в заготовці об'ємно формоутворюють пуансоном до початку та протягом об'ємного деформування активним інструментом, причому пуансон виступає за горизонтальну твірну активного інструменту на незмінну величину, яка відповідає глибині порожнини, протягом всього періоду виготовлення, для цього швидкість осевого наближення пуансона задають таку ж, як і швидкість осевого наближення активного інструменту, або центральну порожнину в заготовці формоутворюють пуансоном, незалежно

від стадії формоутворення активним інструментом, для цього швидкість осьового наближення пуансона задають відмінною від швидкості осьового наближення активного інструменту.

Спосіб виготовлення деталей з центральною порожниною полягає в наступному.

Початкову заготовку 1 (рис. 1) без центральної порожнини розташовують в штампі 2 і об'ємно деформують її центральну частину постійним за напрямом осьовим зусиллям F_n , яке утворюють дією пуансона 3, із швидкістю наближення v_n , і який спрямовують крізь механізм обкочування та активний інструмент 4, які виконані з крізними центральними отворами. Активний інструмент 4 наближують до штампі 2 за допомогою механізму осьового наближення із швидкістю наближення v_a та надають йому кутову швидкість ω_a за допомогою механізму обкочування. Пуансон 3 виступає за горизонтальну твірну активного інструменту 4 на величину k , яка визначає глибину порожнини. Для даного випадку, на протязі всього часу виготовлення деталі, пуансону 3 та активному інструменту 4 надають однакову швидкість осьового

наближення, $v_n = v_a$ відповідно (тобто, на протязі всього часу виготовлення деталі, $k = const$).

Суть способу полягає в наступному. Початкову заготовку 1 (рис. 1) без центральної порожнини розташовують в штампі 2 і об'ємно деформують її центральну частину постійним за напрямом осьовим зусиллям F_n , яке утворюють дією пуансона 3, із швидкістю наближення v_n , і який спрямовують крізь механізм обкочування та активний інструмент 4, які виконані з крізними центральними отворами. Активний інструмент 4 наближують до штампі 2 за допомогою механізму осьового наближення із швидкістю наближення v_a та надають йому кутову швидкість ω_a за допомогою механізму обкочування. Пуансон 3 виступає за горизонтальну твірну активного інструменту 4 на величину k , яка визначає глибину порожнини. Для даного випадку, на протязі всього часу виготовлення деталі, пуансону 3 та активному інструменту 4 надають однакову швидкість осьового наближення, $v_n = v_a$ відповідно (тобто, на протязі всього часу виготовлення деталі, $k = const$).

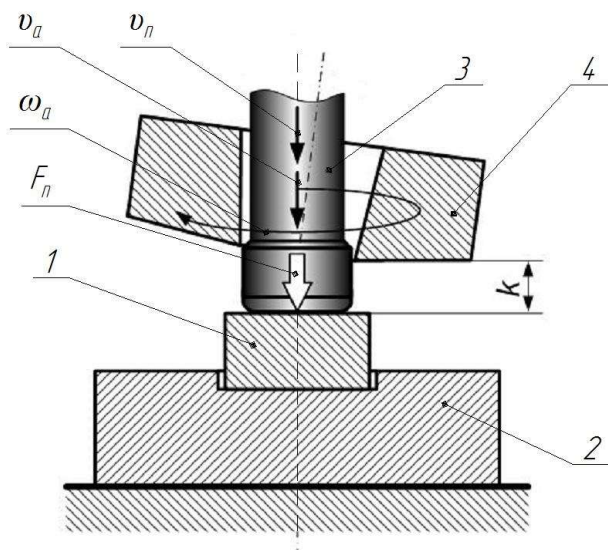


Рис. 1 – Початковий момент формоутворення центральної порожнини пуансоном при однакових швидкостях наближення пуансона і активного інструмента

Після переміщення пуансону 3 на величину k (рис. 2) він зануриться в тіло проміжної заготовки 5 і здійснить формоутворення центральної порожнини. Активний інструмент 4 при цьому досягне торцевої поверхні заготовки 5, внаслідок чого виникне рухоме зусилля F_a , завдяки якому почне формоутворення її периферійної частини. Суттєво, що з початком формоутворення

периферійної частини деталі 5 активним інструментом 4 в її центральній частині виникає зона, в якій діють напруження розтягування, тому при одночасному формоутворенні в цій зоні центральної порожнини пуансоном 3 осьове зусилля F_n зменшується, і як наслідок – знижуються інші енергосилові показники процесу.

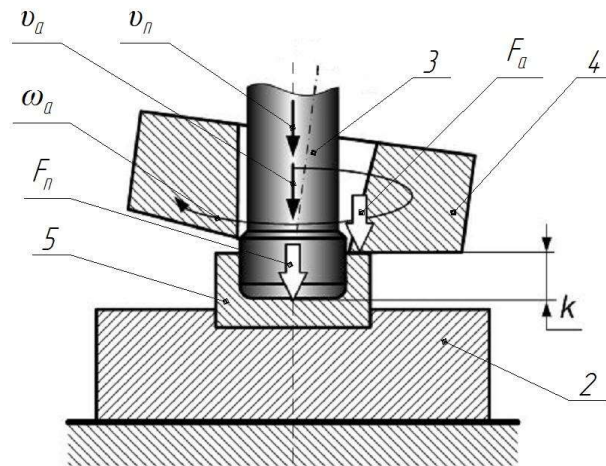


Рис. 2 – Проміжний момент формоутворення центральної порожнини в момент дотику активного інструменту до заготовки

З досягненням заданої висоти деталі 6 (рис. 3) процес виготовлення припиняють. Для цього випадку на весь час виготовлення величина $k = const$, а $v_n = v_a$. Однакові швидкості формоутворення порожнини пуансоном 3 і

периферійної частини деталі 6 активним інструментом 4 можуть бути утворені при застосуванні для їх переміщення вздовж осі (спільного) механізму осьового наближення.

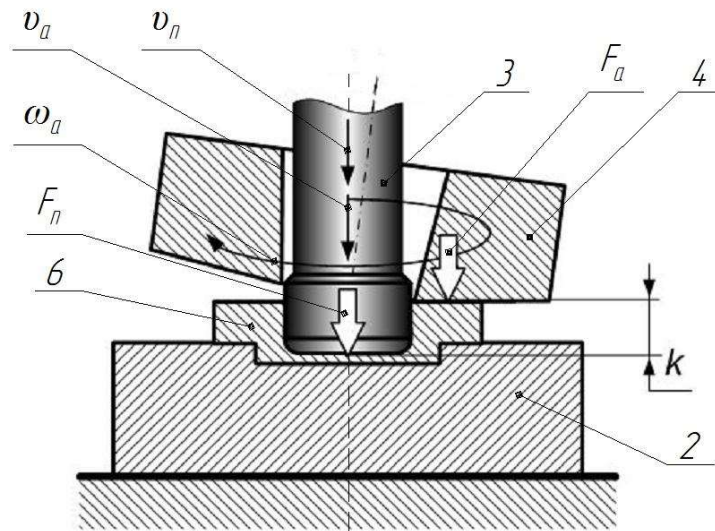


Рис. 3 – Кінцевий момент формоутворення центральної і периферійної частин деталі при однакових швидкостях осьового наближення пуансона і активного інструменту

Можливі і інші варіанти виготовлення, в тому числі з відмінними і змінними швидкостями наближення пуансона 3 (v_n) і активного інструмента 4 (v_a) (рис. 4). Початкову заготовку 1 розташовують в штампі 2 і одночасно формоутворюють її периферійну частину рухомих зусиллям F_a , яке утворюють дією активного інструменту 4, а центральну частину заготовки 1 осьовим зусиллям F_n , яке утворюють дією пуансона 3. В даному

випадку, для першої стадії процесу, торець пуансона 3 не виступає за горизонтальну твірну активного інструменту 4 ($k = 0$), а $v_n = v_a$. Оскільки формоутворення периферійної частини заготовки 1 активним інструментом 4, що призводить до утворення напружень розтягування в її центральній частині, проходить одночасно з формоутворенням центральної частини пуансоном 3, осьове зусилля F_n зменшується, або повністю спадає.

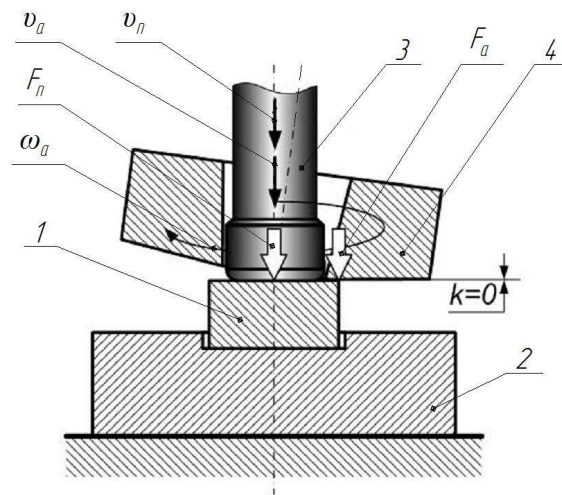


Рис. 4 – Схема початку виготовлення з відмінними і змінними швидкостями наближення пуансона і активного інструмента

З досягненням заданої висоти проміжної заготовки 7 (рис. 5) починається друга стадія процесу, яка проходить із повною зупинкою руху наближення активного інструмента 4 до штампку 2, тобто при $v_a = 0$. Пуансон 3 при цьому продовжує

рух наближення до штампку 2 із поперечною швидкістю v_n та зростанням величини k , для цього пуансон 3 оснащений власним і незалежним механізмом осьового наближення.

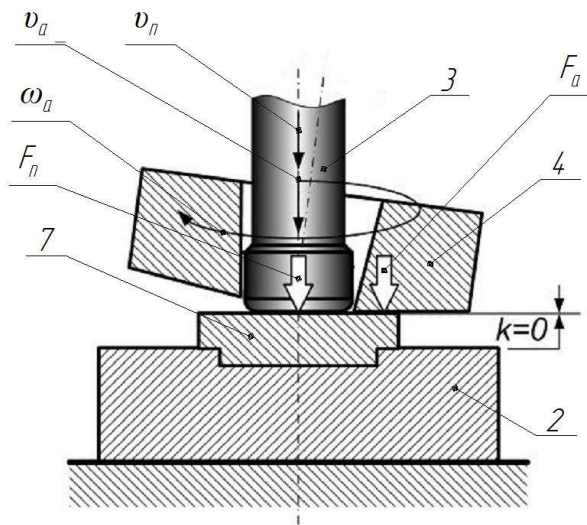


Рис. 5 – Проміжна стадія процесу виготовлення

З досягненням заданої глибини порожнини деталі 6 (рис.6), на момент коли торець пуансону 3 виступає за горизонтальну твірну активного інструмента 3 на величину k , процес виготовлення

припиняють. Для цього варіанту на весь час виготовлення величина $k \neq const$, а $v_n \neq v_a$.

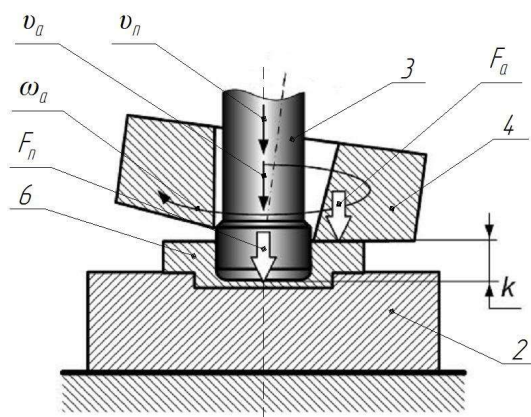


Рис. 6 – Кінцевий момент формоутворення центральної і периферійної частин деталі з відмінними і змінними швидкостями осьового наближення пуансону і активного інструменту

Можливі і інші варіанти виготовлення деталей, зокрема деталі 7 складної форми (рис. 7) з порожниною 8 та виступами 9 на верхньому торці з початкової заготовки 1 без центральної порожнини

(показана пунктирною лінією), що досягається різноманітними співвідношеннями швидкостей осьового наближення v_n та v_a під час обробки.

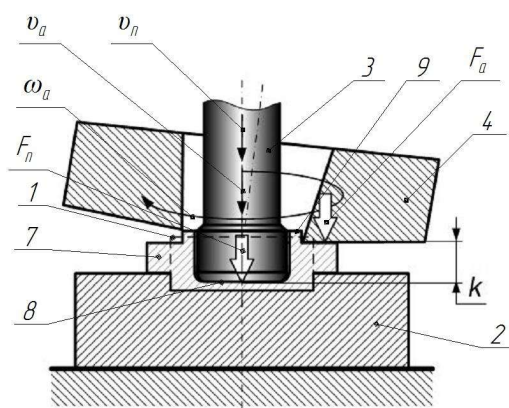


Рис. 7 – Варіант виготовлення деталі складної форми.

Висновки. Таким чином, даний спосіб дозволяє розширити технологічні можливості процесу при виготовленні деталей складної форми з порожниною з одночасним зменшенням енергосилових параметрів при відмінних і змінних швидкостях осьового наближення пуансону і активного інструменту.

Список літератури

1. Патент на корисну модель № 66808, Україна, МПК B21D 37/12 (2006.01). Спосіб виготовлення деталей / С.П. Гожій, А.В. Кліско, Р.М. Ландар, А.І. Носенко; заявник і власник С.П. Гожій, А.В. Кліско, Р.М. Ландар, А.І. Носенко. – № u201103804; заявл. 29.03.2011; опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2, 2012 р.
2. Декларацийний патент на корисну модель № 15245, Україна, МПК B21D 37/00 (2006). Спосіб виготовлення деталей /

Л.Т. Кривда, С.П. Гожій; заявник і власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u200512822; заявл. 29.12.2005; опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6, 2006 р.

References (transliterated)

1. Patent na korisnu model' № 66808, Ukraïna, MPK B21D 37/12 (2006.01). Sposib виготовлення деталей / S.P. Gzhij, A.V. Klisko, R.M. Landar, A.I. Nosenko; заявник і власник S.P. Gzhij, A.V. Klisko, R.M. Landar, A.I. Nosenko. – No u201103804; заявл. 29.03.2011; опубл. 25.01.2012, Bjul. No 2, 2012 r.
2. Deklaracijnij patent na korisnu model No 15245, Ukraïna, MPK B21D 37/00 (2006). Sposib виготовлення деталей / L.T. Krivda, S.P. Gzhij; заявник і власник Nacional'nij tehničnij universitet Ukraïni «Kiïvs'kij politehničnij institut». – No u200512822; заявл. 29.12.2005; опубл. 15.06.2006, Bjul. No 6, 2006 r.

Надійшла (received) 16.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Енергоэффективный способ изготовления деталей с центральной порожниной из застосуванням процесів штампування обкочуванням / С. П. Гожій, А. В. Кліско, Г. М. Суботенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 11–16. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2519-2671

Энергоэффективный способ изготовления деталей с центральной полостью с применением процессов штамповки обкатыванием / С. П. Гожий, А. В. Клиско, Г. М. Суботенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 11–16. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2519-2671

The process of energy-efficient production of parts with the central cavity using orbital forging processes / S. P. Godziy, A. V. Klisko, G. M. Subotenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 11–16. – Bibliogr.: 2 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гожій Сергій Петрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», професор кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел. (044) 204-84-40; e-mail: s.godziy@mail.ru

Гожий Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», профессор кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел. (044) 204-84-40; e-mail: s.godziy@mail.ru

Gozhy Sergey Petrovich – doctor of technical sciences, professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute name Igor Sikorsky", professor of the Department of mechanics of plasticity of materials and resource-saving processes; tel. (044) 204-84-40; e-mail: s.godziy@mail.ru

Кліско Андрій Валерійович – асистент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», асистент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів, тел. (044) 204-95-31, e-mail: andrey.klisko@gmail.com

Клиско Андрей Валериевич – ассистент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», ассистент кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел. (044) 204-95-31, e-mail: andrey.klisko@gmail.com

Klisko Andrey Valerievich – Assistant, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute name Igor Sikorsky", assistant of the Department of mechanics of plasticity of materials and resource-saving processes; tel. (044) 204-95-31, e-mail: andrey.klisko@gmail.com

Суботенко Геннадій Миколайович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», аспірант кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел. (099) 954-19-17, e-mail: mr.gennadiy@i.ua

Суботенко Геннадий Николаевич – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», аспирант кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел. (099) 954-19-17, e-mail: mr.gennadiy@i.ua

Subotenko Gennady Nikolaevich – post-graduate student, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute name Igor Sikorsky", post-graduate student of the Department of mechanics of plasticity of materials and resource-saving processes; tel. (099) 954-19-17, e-mail: mr.gennadiy@i.ua

УДК 621.777.4

В. М. ГОРНОСТАЙ, С. Ф. САБОЛ, А. М. ПОТЯТИНИК, О. С. ГОЛОВКО**ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РІЗНОСТІННОСТІ ВИХІДНОЇ ЗАГОТОВКИ
НА ЯКІСТЬ КІНЦЕВОГО ВИРОБУ ПРИ ВИДАВЛЮВАННІ З ПОТОНШЕННЯМ**

Робота присвячена визначенню: впливу різностінності вихідної заготовки на якість кінцевого виробу при виготовленні холодним об'ємним штампуванням, технологічних параметрів поопераційних переходів шляхом чисельного експерименту та розробки технологічного процесу та штампового оснащення для отримання виробів спеціального призначення. Шляхом моделювання в програмному комплексі DEFORM-3D проведено чисельний експеримент технологічних переходів процесу холодного витягування з потоншенням послідовних трьох переходів з вихідної заготовки з різницею в товщині стінки 0,2, 0,1 та 0,05 мм, яка отримується холодним зворотним видавлюванням. Моделювання виконували в пружно-пластичній постановці з врахуванням розвантаження після операцій формозміни.

Ключові слова: холодне об'ємне штампування, різностінність вихідної заготовки, якість кінцевого виробу, технологічні переходи.

Работа посвящена определению: влияния разностенности исходной заготовки на качество конечного изделия изготовленного холодной объемной штамповкой, технологических параметров пооперационных переходов путем численного эксперимента и разработке технологического процесса и штамповой оснастки для получения изделий специального назначения. Путем моделирования в программном комплексе DEFORM-3D проведен численный эксперимент технологических переходов процесса холодного вытягивания с утонением последовательных трех переходов из исходной заготовки с разницей в толщине стенки 0,2, 0,1 и 0,05 мм, которая получается холодным обратным выдавливанием. Моделирование выполняли в упруго-пластической постановке с учетом разгрузки после операций формоизменения.

Ключевые слова: холодное объемная штамповка, разностенность исходной заготовки, качество конечного изделия, технологические переходы.

The work is devoted to the definition: the influence of varying wall thickness the initial workpiece on the quality of the final product was cold bulk punching process parameters variables and events navigation by means of numerical experiment and development of technological process and forging the snap-in to obtain special-purpose products. By modeling in DEFORM-3D software package, a numerical experiment technological transition process of cold drawing with thinning three successive transitions of the original billet with a difference in wall thickness of 0.2, 0.1 and 0.05 mm, which is obtained by cold extrusion reverse. Modeling was performed in the elastic-plastic formulation based on discharge after the forming operations. The effect of the variation in wall thickness of the initial preform in the quality of the final product and the ability to produce products in the manufacture of cold forging blanks for hollow articles. Experimentally established process parameters of operational transitions, stress-strain state of the blanks after deformation, the distribution of the use of the plasticity resource for the transaction. By calculation, the optimal parameters of the deforming tool and specific effort on it, determine the number of transitions for the final product of the required quality. The results obtained are necessary for the design of the die tooling.

Keywords: cold forging, variation in wall thickness of the initial, initial billet, the quality of the final product, technological transitions.

Вступ. Чисельні експерименти дозволяють встановити напружено-деформований стан в об'ємі здеформованої заготовки, кінцеві форми та розміри виробу з урахуванням пружної деформації, а також отримати розподіл нормальних напружень на контактуючих поверхнях заготовки з інструментом, що дозволяє розраховувати інструмент на міцність, отримати залежність зусилля процесів від переміщення пуансона, визначити ступінь використання ресурсу пластичності – можливість отримання даних виробів при певних вихідних параметрах процесу ще на стадії розробки технологічних процесів. Все це дозволяє суттєво скоротити час на розробку та впровадження нових технологій.

Постановка задачі. На рис. 1 показано розрахункова схема процесу (рис. 1, а, де 1 – матриця, 2 – пуансон, 3 – вихідна заготовка) та поопераційні ескізи напівфабрикатів. Вихідна заготовка (рис. 1, б) із сталі 10 з наступними властивостями: умовна межа течії $\sigma_{0,2} = 260$ МПа, модуль Юнга $2,1 \cdot 10^5$ МПа та коефіцієнт Пуассона 0,3 яка отримується холодним

зворотним видавлюванням з різницею товщини стінки 0,2, 0,1 та 0,05 мм, поступає на першу операцію холодного видавлювання з потоншенням, після якої отримують заготовку (рис. 1, в). Далі виконується 2 переходи витягування з потоншенням стінки (рис. 1, г, д), з відпадом між переходами. Отриманий напівфабрикат після останнього переходу є заготовкою під обтиск та механічну обробку для отримання кінцевого виробу спеціального призначення.

Шляхом чисельного експерименту в програмному комплексі DEFORM-3D проведено чисельний експеримент технологічних переходів процесу холодного витягування з потоншенням послідовних трьох переходів з вихідної заготовки з різницею в товщині стінки 0,2, 0,1 та 0,05 мм, яка отримується холодним зворотним видавлюванням. Моделювання виконували в пружно-пластичній постановці з врахуванням розвантаження після операцій формозміни.

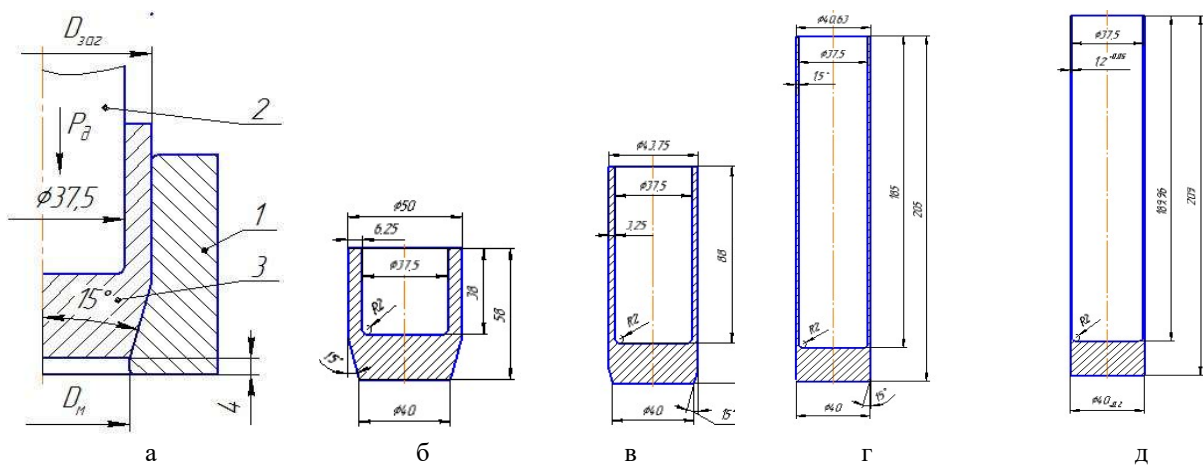


Рис. 1 – Розрахункова схема та поопераційні ескізи напівфабрикатів:
а – схема процесу; б – вихідна заготовка; в – перша операція; г – друга операція; д – кінцева операція

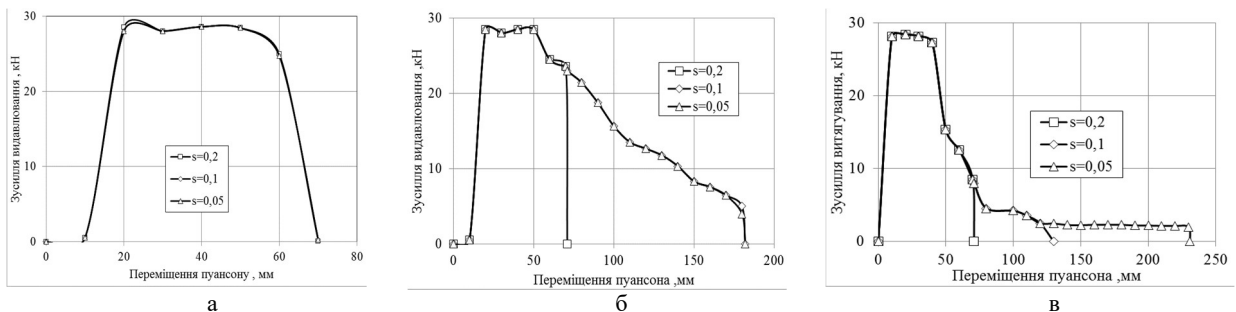


Рис. 2 – Залежність зусилля операції від переміщення пуансона:
а – перший перехід, б – другий перехід, в – третій перехід

Залежність зусилля процесу від переміщення пуансона для відповідних переходів представлено на рис. 2. Для витягування з потоншенням максимальне значення зусилля складало 275 кН на початку робочого ходу. Для різностінності 0,2 мм спостерігається відривання стінки заготовки на другому та третьому

переході, а для різностінності 0,1 мм відрив стінки може виникнути на третьому переході. За отриманими значеннями максимальних зусиль орієнтовно вибираємо обладнання для відповідних операцій.

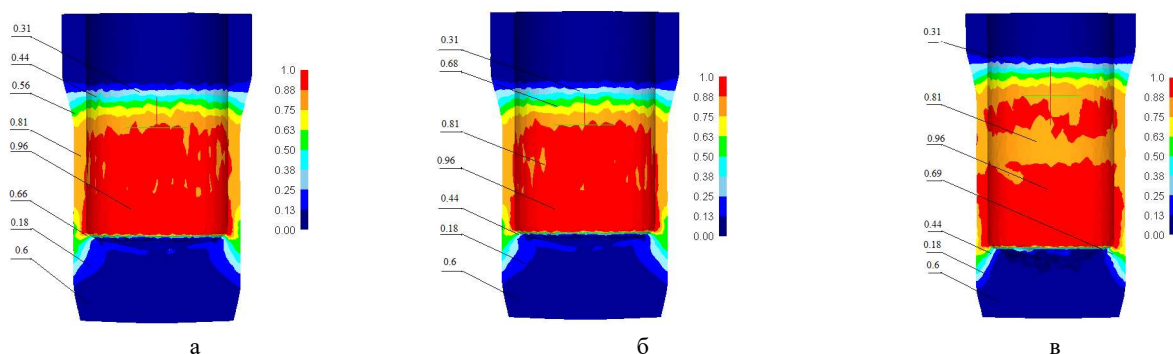


Рис.3 – Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності ψ після першого переходу:
а – 0,05 мм, б – 0,1 мм, в – 0,2 мм)

На рис. 3 показано розподіли ступеня використання ресурсу пластичності ψ після першого переходу. З якого видно що при різностінності 0,05 мм ступінь використання ресурсу пластичності максимальна на поверхневих шарах порожнини, при

збільшенні різностінності до 0,2 мм пластичність матеріалу вичерпується по всьому об'єму стінки. Враховуючи ці данні при розробці технологічного процесу необхідно вводити операцію відпалу після видавлювання.

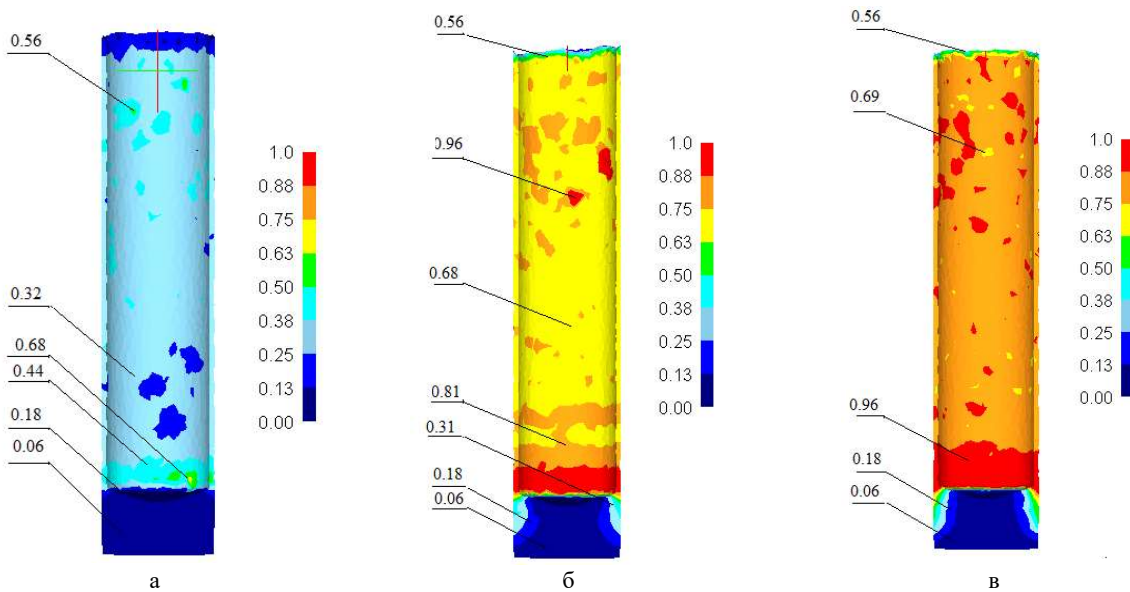


Рис.4. Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності ψ після другого переходу:
а – 0,05 мм, б – 0,1 мм, в – 0,2 мм)

При видавлюванні заготовок з різностінністю 0,2 мм спостерігається критичні значення ступеня використання пластичності рис. 4, в, що може призвести до відриву стінки заготовки на першому-другому переходах витягування. Експериментальні дослідження показують, що приблизно 60 % заготовок з різностінністю 0,2 мм, та більше, при витягуванні на другому переході руйнуються. Вплив різностінності на механічні властивості досліджено в роботі [4].

На рис. 5 представлено залежність зміни різниці товщини стінки в залежності від кількості переходів. З нього видно, що при видавлюванні за запропоновану кількість переходів отримуємо кінцевий виріб, який задовільняє вимогам по товщині стінки та фізико-механічним властивостям у дні та стінці виробу.

Відповідно до отриманих розрахунків було спроектовано технологічне оснащення для трьох переходів. На рис. 6 показано схему штапу для отримання заготовки під подальше видавлювання з потоншенням, який складається з блоку (нижня плита 14 та верхня плита 13, а також для направлення дві колонки 18, 19 та дві втулки 20, 21) та пакету штапа. На нижній плиті встановлена плита 12, на якій в свою чергу стоїть обойма 5 з опорним кільцем 3, п'ятою 6 та виштовхувачем 2.

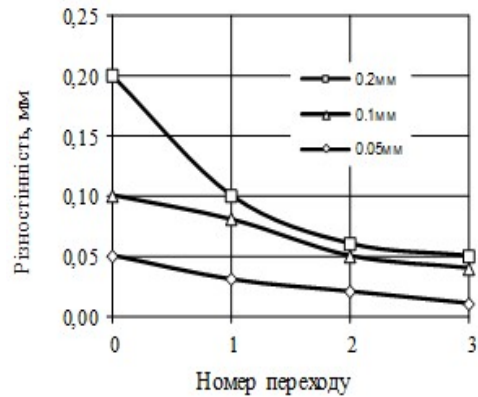


Рис.5 – Різностінність заготовки по переходам

На обойму встановлена бандажована матриця 1, що фіксується на нижній плиті притисним кільцем 4 за допомогою болтів 25 і шайб 31. До верхньої плити 13 за допомогою гвинтів 28 прикріплений пуансонотримач 10. В ньому розміщена п'ята 7 і конусне кільце 23. За допомогою шайби 8 і конусного кільця 23, пуансон 11 опирається на п'ята 7, яка притискається до плити 13. Пуансон 11 додатково направляється по матриці за допомогою направляючої втулки 9.

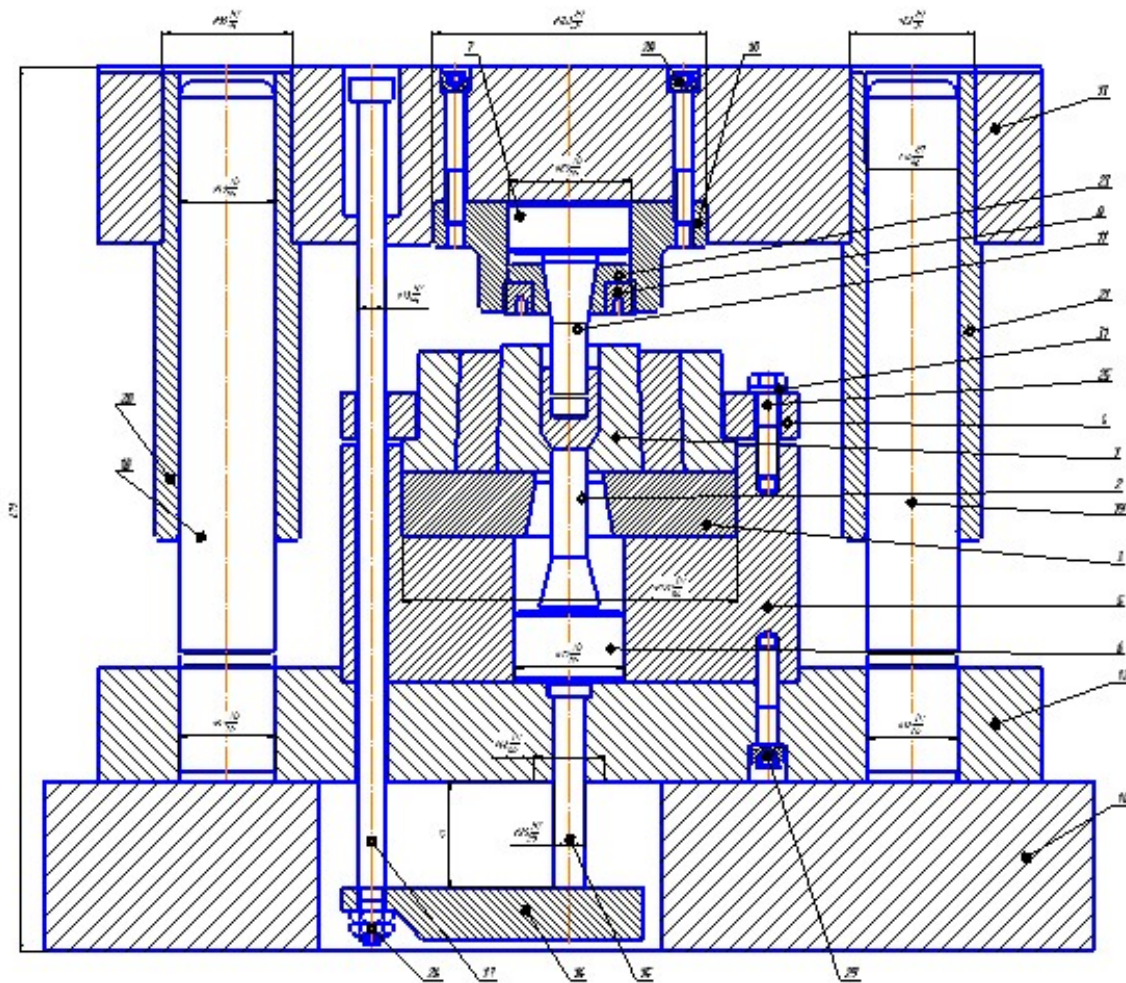


Рис. 6 – Схема штапу для зворотнього видавлювання порожнистих виробів

Для виштовхування деталі з матриці передбачені тяги 17, що зв'язані з верхньою плитою. В обоймі 5 передбачені отвори для тяг, до яких за допомогою гайок 26, кріпиться коромисло 16, на якому встановлено штовхач 15. Перед видавлюванням, зазор між торцем пуансона 11 і поверхнею матриці 1 повинен бути трохи більшим за висоту виробу. Вихідна заготовка встановлюється в матрицю 1. При ході повзуна вниз виконується процес прямого-зворотнього видавлювання. Після видавлювання верхня плита 13 піднімається вгору, тяги 17 діють на коромисло, на якому встановлено штовхач 15. Штовхач 15, рухаючись вгору, діє на п'яту 6 і виштовхувач 2, який видаляє заготовку з матриці.

Схема штапу для видавлювання з потоншенням наведено на рис. 7. Штамп складається з блоку, який містить нижню 5 та верхню плиту 4, а також має дві колонки 8, 9 та дві втулки 6, 7. На нижній плиті 5 встановлена обойма, на якій в свою чергу стоїть бандажована матриця 3, що опирається

разом з обоймою до нижньої плити за допомогою болтів. У верхню плиту 4 за допомогою пуансонотримача 10, що кріпиться болтами 13, встановлюється пуансон 2. Перед витягуванням зазор між торцем пуансона і поверхнею бандажованої матриці 3 повинен бути трохи більшим за висоту виробу. Вихідна заготовка встановлюється в матрицю. При ході повзуна вниз заготовка нижнім торцем розклинює знімачі 12 і виконується процес формування горловини. В крайньому нижньому положенні штапу знімачі 12 за допомогою пружин 17 повертаються у вихідне положення, впираючись в пуансон 2. Після чого верхня плита 4 разом з пуансоном рухається вгору, заготовка впирається верхнім торцем у знімачі 12 (3 штуки по контуру пуансона) і відбувається зняття деталі з пуансона. Готовий виріб потрапляє в отвір підставки та виймається. Конструкція штапу універсальна для трьох переходів. Змінними є пуансон з пуансонотримачем та бандажована матриця.

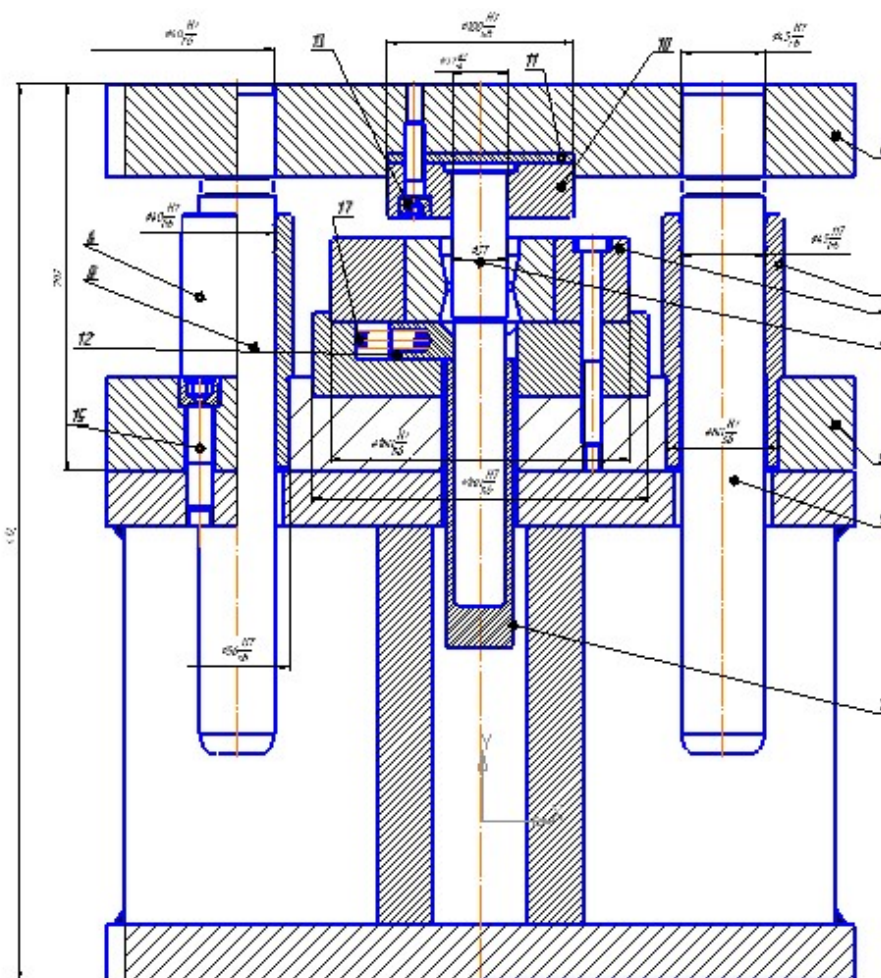


Рис. 7 – Схема штамп для видавлювання з потоншенням порожнистих виробів

Висновки. Досліджено вплив різностінності вихідної заготовки на якість кінцевого виробу та можливість отримання виробів при виготовленні холодним об'ємним штампуванням заготовок для порожнистих виробів, шляхом чисельних експериментів встановлено технологічні параметри поопераційних переходів, напружено-деформований стан заготовок після деформування, розподіл використання ресурсу пластичності для відповідної операції. Розрахунковим шляхом встановлено оптимальні параметри деформуючого інструменту та питомі зусилля на ньому, визначена необхідна кількість переходів для отримання кінцевого виробу необхідної якості (геометричні розміри які відповідають допускам на даний виріб, та фізико механічні властивості в об'ємі кінцевого виробу). Вказані данні необхідні для проектування штампового оснащення.

Список літератури

1. Сафарянц А.Р. Технология патронно-гильзового производства. Учебное пособие для техникумов // А.Р. Сафарянц – ЦИИИ информации, 1975. – С. 208.
2. Калужный В. Л. Математическое моделирование процесса обжима заготовок со ступенчатой полостью / В. Л. Калужный,

А. В. Калужный, В. В. Пиманов // Вестник НТУУ КПИ. Машиностроение, вып.55.–Київ.–2008., стр. 160-167.

3. Калужный А. В. Применение метода конечных элементов при расчетах процессов изготовления гильз для артиллерийских и стрелковых боеприпасов / А. В. Калужный // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2009. – № 2. – С. 31-43.
4. Ageev Н.П. Исследование влияния разностенности штампуемых способом вытяжки с утонением деталей на неравномерность распределения механических свойств в поперечных сечениях/ Ageev Н.П., Затуруха Е.В. // Известия МГТУ «МАМИ», № 2 (16), 2013, т. 2. – с.8–12

References (transliterated)

1. Safaryants A.R. *Tehnologiya patronno-gilzovogo proizvodstva. Uchebnoe posobie dlya tehnikumov* [Technology chuck-the gland production] – TsIII informatsii, 1975. – P. 208.
2. Kalyuzhnyi V. L. *Matematicheskoe modelirovanie protsessu obzhima zagotovok so stupenchatoy polostyu* // Vestnik NTUU KPI. Mashinostroenie, vyip. 55. – KiYiv. –2008. – P. 160–167.
3. Kalyuzhnyi A. V. *Primenenie metoda konechnykh elementov pri raschetah protsessov izgotovleniya gilz dlya artilleriyskikh i strelkovykh boeprapasov* / A. V. Kalyuzhnyi // Artilleriyskoe i strelkovoje vooruzhenie. – 2009. – No 2. – P. 31–43.
4. Ageev N.P. *Issledovanie vliyaniya raznostennosti shtampuemykh sposobom vytyazhki s utoneniem detaley na neravnomernost raspredeleniya mehanicheskikh svoystv v poperechnykh secheniyah* / Ageev N.P., Zateruha E.V. // Izvestiya MG TU «MAMI», No 2 (16), 2013, vol. 2. – P. 8–12

Надійшла (received) 16.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Визначення впливу різностінності вихідної заготовки на якість кінцевого виробу при видавлюванні з потоншенням / В. М. Горностай, С. Ф. Сабол, А. М. Потятиник, О. С. Головко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 17–22. – Бібліогр.: 4 назви. – ISSN 2519-2671

Определение влияния разной толщины стенки на качество изделия / В. Н. Горностай, С. Ф. Сабол, А. Н. Потятиник, О. С. Головко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 17–22. – Бібліогр.: 4 назви. – ISSN 2519-2671

To determine the effect of different wall thickness on the quality of products / V. M. Hornostai, S. F. Sabol, A. M. Potiatynuk, O. S. Golovko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 17–22. – Bibliogr.: 4 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Горностай Вадим Миколайович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (050) 5358653; e-mail: w.gornostay@kpi.ua

Горностай Вадим Николаевич – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», доцент кафедры Механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (050) 5358653; e-mail: w.gornostay@kpi.ua

Hornostai Vadym Mykolaiovych – candidate of technical sciences, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute them. Igor Sikorsky", Associate Professor of the Department of Mechanics of plasticity of materials and resource saving processes; tel.: (050) 5358653; e-mail: w.gornostay@kpi.ua

Сабол Сергій Францевич – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (050) 7193026; e-mail: s.sabol@kpi.ua

Сабол Сергей Францевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», доцент кафедры Механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (050) 7193026; e-mail: s.sabol@kpi.ua

Sabol Serhii Frantsevych – candidate of technical sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute them. Igor Sikorsky", Associate Professor of the Department of Mechanics of plasticity of materials and resource saving processes; tel.: (050) 7193026; e-mail: s.sabol@kpi.ua

Потятиник Андрій Миколайович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», тел.: (095) 3671932

Потятиник Андрей Николаевич – аспірант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», тел.: (095) 3671932

Potiatynuk Andrii Mykolaiovych – fellow, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute them. Igor Sikorsky", tel.: (095) 3671932

Головко Оксана Сергіївна – студентка, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», тел.: (099) 6074453; e-mail: oksana.golovko.2017@mail.ru

Головко Оксана Сергеевна – студентка, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», тел.: (099) 6074453; e-mail: oksana.golovko.2017@mail.ru

Golovko Oksana Sergeevna – Student, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute them. Igor Sikorsky", tel.: (099) 6074453; e-mail: oksana.golovko.2017@mail.ru

УДК 621.771.01

С. В. ЄРШОВ, К. Г. ГЕЙМУР, К. О. КРАВЧЕНКО, К. К. МАРЧЕНКО

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСУ КАЛІБРІВ ПРИ ПРОКАТУВАННІ КАТАНКИ
В УМОВАХ СЕРЕДНЬОСОРТНО-ДРОТОВОГО СТАНУ 400/200 ПАТ «ДМК»**

При виготовленні прокатної продукції необхідна велика кількість прокатних валків різної форми і розмірів. Крім того, в процесі експлуатації по причині зносу і різних пошкоджень десятки тисяч валків щорічно виходять з ладу і списуються в металобрухт. Ці обставини приводять до необхідності пошуку способів підвищення зносостійкості валків і покращення їх якості. Стаття містить результати аналізу виробничих даних зносу валків 6 і 16 клітей прокатного стану 400/200 ПАТ «ДМК» при виробництві катанки діаметром 5,5 мм і результати математичного моделювання в програмі ESV Deform. Приведені закономірності зносу валків в залежності від особливостей формозміни металу.

Ключові слова: прокатування, знос, сортовий валок, катанка, круглий калібр, моделювання, метод скінчених елементів.

При изготовлении прокатной продукции необходимо большое количество прокатных валков разной формы и размеров. Кроме этого, в процессе эксплуатации по причине износа и различных повреждений десятки тысяч валков ежегодно выходят из строя и списываются в металлолом. Эти обстоятельства приводят к необходимости поиска способов повышения износостойкости валков и улучшения их качества. Статья содержит результаты анализа производственных данных износа валков 6 и 16 клетей прокатного стана 400/200 ПАО «ДМК» при прокатке катанки диаметром 5,5 мм и результаты математического моделирования в программе ESV Deform. Приведены закономерности износа валков в зависимости от особенностей формоизменения металла.

Ключевые слова: прокатка, износ, сортовой валок, катанка, круглый калибр, моделирование, метод конечных элементов.

Manufacture of rolled products requires a large number of rolls of various shapes and sizes. In addition, during the operation due to wear and damages, tens of thousands of rolls fail debited and scrapped each year. These circumstances lead to necessity of finding ways to improve the rollers wear and tear and improve their quality. The article contains results of the analysis the production data of wear of rolls 6 and 16 rolling stands 400/200 PJSC "DMC" when rolling wire rod of 5,5 mm in diameter and results of mathematical modeling in the program ESV Deform. Results wear and tear patterns of the rolls depending on the characteristics of metal forming. The methods of forecasting gauge wear values using a special test that takes into account the average pressure, the average value of the metal sliding speed and the length of the deformation zone. Prediction wear on the results of the simulation confirmed by experimental data. It was shown that even when the similarity deformation schemes similar wear pattern in caliber may be different, since it largely depends on the metal flow pattern. In round calibers stand the maximum wear amount is observed in areas of maximum deformation and transverse metal broadening diagonally caliber. More research is needed to identify the dependence of wear gauges on the parameters defined in the caliber of the metal flow.

Keywords: rolling, wear, long roll, rod, round caliber, simulation, finite element method.

Вступ. На сьогодні у світі спостерігається тенденція підвищення вимог до якості готової продукції без збільшення її собівартості. Прокатні валки вважаються основним інструментом, експлуатаційні характеристики якого впливають безпосередньо на продуктивність стану і якість прокату – чим довше термін роботи валків, тим краще такий техніко-економічний показник, як витрата валків на тонну одержаного прокату, менше часу займає заміна валків, а, отже, підвищується продуктивність всього стану. Витрата валків – складова частина собівартості продукції. Вона може досягати ~1000 т на 1 млн т прокату, а через постійне зростання ціни частка валків в собівартості прокату сягає 12–15%.

Аналіз стану питання. Зносом називають зміну форми і розмірів калібру, які неможливо виправити налаштуванням клітей. Поверхня калібру нового прокатного валка після початку його експлуатації починає випрацьовуватися, нерівності на поверхні зминаються і зрізаються, внаслідок чого поверхня калібру стає гладкою. Потім під час подальшої роботи утворюються нові нерівності, які, в свою чергу, поступово згладжуються. З часом встановлюється рельєф поверхні, який однаково змінюється по всьому колу поверхні калібру. Рельєф поверхні залежить як від умов служби (тиску,

швидкості, температури), так і від мікроструктурних і міцносних характеристик металу валка. Потім відбувається посиленний знос валків, зміна геометричної форми калібрів і пов'язані з цим різкі зміни умов роботи поверхонь тертя [1]. Валки вимагають регулярного переточування, доки випрацьованість не досягне максимально можливої величини, після чого валок не підлягає подальшій експлуатації.

До факторів, що впливають на величину зносу металу валків, відносяться: ковзання металу, що прокатується, по валкам під час проходження осередку деформації; температурні умови тертя і охолодження валків; наявність рухомого проміжного шару; хімічний склад сталі, яку прокатують; якість валків; режим обтиснень металу [2]. Знос по поверхні валка може розподілятися нерівномірно, що пов'язано з нерівномірністю нагріву металу, що прокатується, нерівномірним розподіленням обтиснень, нерівномірністю твердості металу валка, а також пов'язано зі станом арматури і правильністю налаштування прокатного стану.

Збільшення зносостійкості валків можна досягнути кількома методами. До найбільш розповсюджених відносяться підвищення твердості поверхні легування та модифікації металу валку, використання валків з литими ривчаками,

загартуванням. Удосконалення існуючих та розробка нових технологічних процесів дозволяють забезпечити необхідний рівень твердості, міцності, розмір і співвідношення структурних складових по периметру калібру. До числа найбільш ефективних способів, що дозволяють забезпечити одночасно високу міцність і твердість робочого шару, відносяться вилівка грубопрофільованих валків і методи відцентрового лиття.

Наявність великої кількості факторів, що впливають на величину зносу валків, ускладнює одержання залежностей, які би враховували їх в повній мірі і дозволяли обчислити величину зносу. На сьогодні ефективним методом прогнозування і дослідження величини зносу стало комп'ютерне моделювання методом скінчених елементів, для проведення якого не потрібно витрачати великі кошти на дослідне прокатування, яке важко реалізувати в умовах реального виробництва. Моделювання дозволяє якісно оцінити інтенсивність зносу і врахувати одержані при розробці або вдосконаленні калібрування валків для збільшення кількості прокатуваного металу у заданих допусках.

Мета дослідження, постановка проблеми. Актуальність проблеми підвищення експлуатаційних характеристик валків і їх стійкості в умовах

впровадження у прокатне виробництво високошвидкісних станів безперервного прокатування постійно зростає. Метою даної роботи є: дослідження зносу калібрів валків при прокатуванні катанки в умовах дрібносоротно-дротового стану 400/200 ПАТ «ДМК»; виявлення величини впливу плинину металу та розповсюдження деформації на знос калібрів при прокатуванні; визначення величини критерію зносу на основі даних тиску по довжині осередку деформації; порівняння отриманих результатів та зробленого на їх основі прогнозу зносу валків по ширині калібру з даними, отриманими на прокатному стані у виробничих умовах.

Матеріали досліджень. Кліть №6 чорнової групи. Для дослідження зносу при прокатуванні овальної заготовки в круглому калібрі були зібрані дані зносу на середньосоротно-дротовому стані 400/200 ПАТ «ДМК». Дані були зібрані за допомогою щупу та шаблону в кліті №7.

Величини зносу калібрів показані на рис. 1, де також вказано порядковий номер калібру, комплект, дату початку та кінця прокатування в даному калібрі та кількість прокатуваного металу за вказаний проміжок часу.

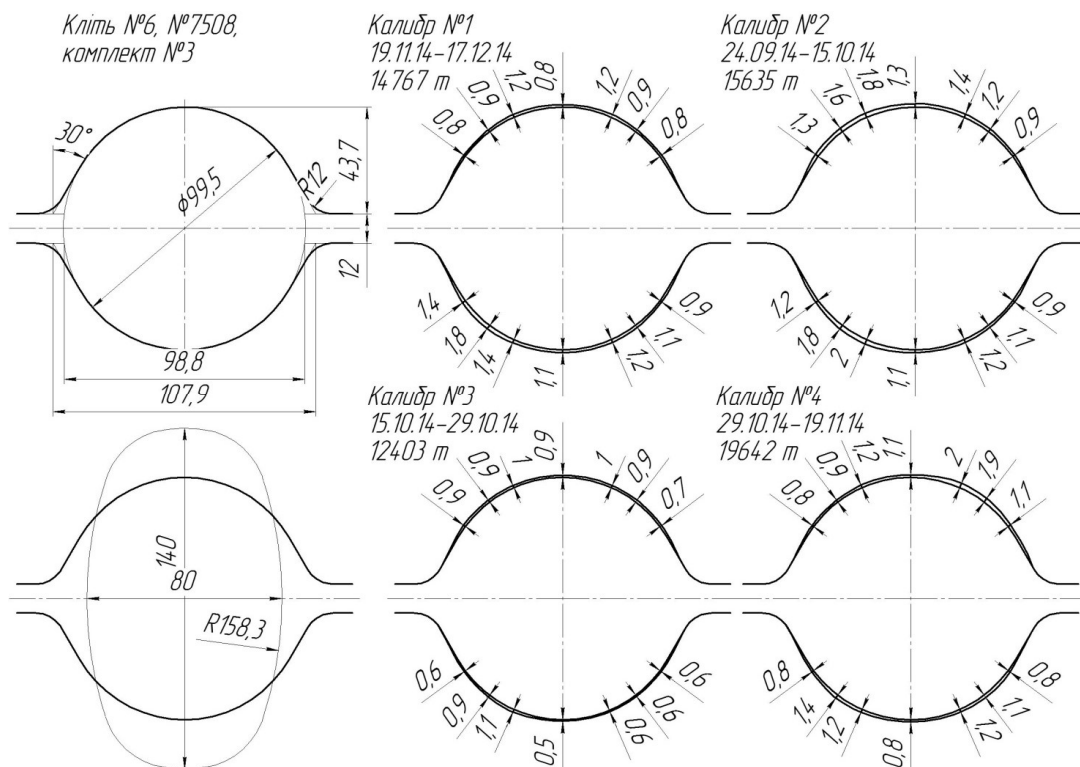


Рис. 1 – Розміри калібру і розкату, що задається в кліть №6, і величина зносу по калібрам

Найбільший знос спостерігався в місцях, що знаходяться під кутом приблизно 30° до вертикальної осі калібру. Такий знос обумовлений різницею у ковзанні металу на різних ділянках калібру. Мінімальне ковзання металу в осередку

деформації повинно бути посередині калібру, де спостерігається тільки поздовжнє ковзання при мінімальній довжині осередку деформації і поблизу місць роз'єму, куди метал надходить в результаті

поширення в кінці обтиснення перед виходом з осередку деформації.

У місцях, відповідних максимальному зносу, спостерігається найбільше ковзання, оскільки метал в цьому випадку проходить найбільший шлях уздовж осередку деформації, і в цих же місцях виникає максимальне поперечне ковзання від розширення.

Кількість прокатоного металу у кожному калібрі кліті №6 у 2–3 рази перевищує дозволена за технологічною інструкцією, яка складає 6000 т.

Наступним кроком було виконання теоретичного розрахунку деформованого стану при прокатуванні в калібрах з подальшим аналізом одержаних даних. Розрахунок виконували в програмному пакеті ESV-Deform, розробленому на кафедрі ОМТ ДДТУ, обчислення в якому відбуваються за допомогою методу скінчених елементів. Загальна методика процесу моделювання наведена в роботі [3].

Для виконання розрахунку були обрані наступні налаштування програми: параметри прямокутної сітки – довжина, ширина та висота кожної сторони прямокутника становила 3,5 мм; тип скінчених елементів – прямокутні призми з 8 вузлами; в якості алгоритму рішення був використаний метод штрафних функцій; температура початку прокатки –

1150°C; діаметри валків кліті становлять 660 мм; швидкість прокатування 0,30 м/с; кількість обертів при цьому – 10,5 об/хв.; температура валка 20°C.

При моделюванні процесу прокатування отримано тривимірну модель осередку деформації, яка була розділена на три перерізи для розгляду плинину металу в кожному: площину в момент контакту металу з валками на вході в осередок деформації (90 мм від вісі валків); площину посередині осередку деформації (60 мм від вісі валків) і на виході з осередку деформації (20 мм від вісі валків). Результати розрахунку мають вигляд кольорових полів, при цьому кожен колір означає певне числове значення досліджуваного параметра. Результати розрахунків представлені на рис. 2, поряд з номером перерізу вказано відстань до вертикальної осі валків.

З наведених даних на рис. 2 видно, що під час проходження розкату по довжині осередку деформації інтенсивність плинину металу збільшується. Максимальна інтенсивність зосереджена в області контакту металу з валком та направлена в напрямку центру розкату. Також спостерігається плин металу від центру розкату в горизонтальному напрямку, що пов'язане з вільним поширенням металу у відкритому калібрі.

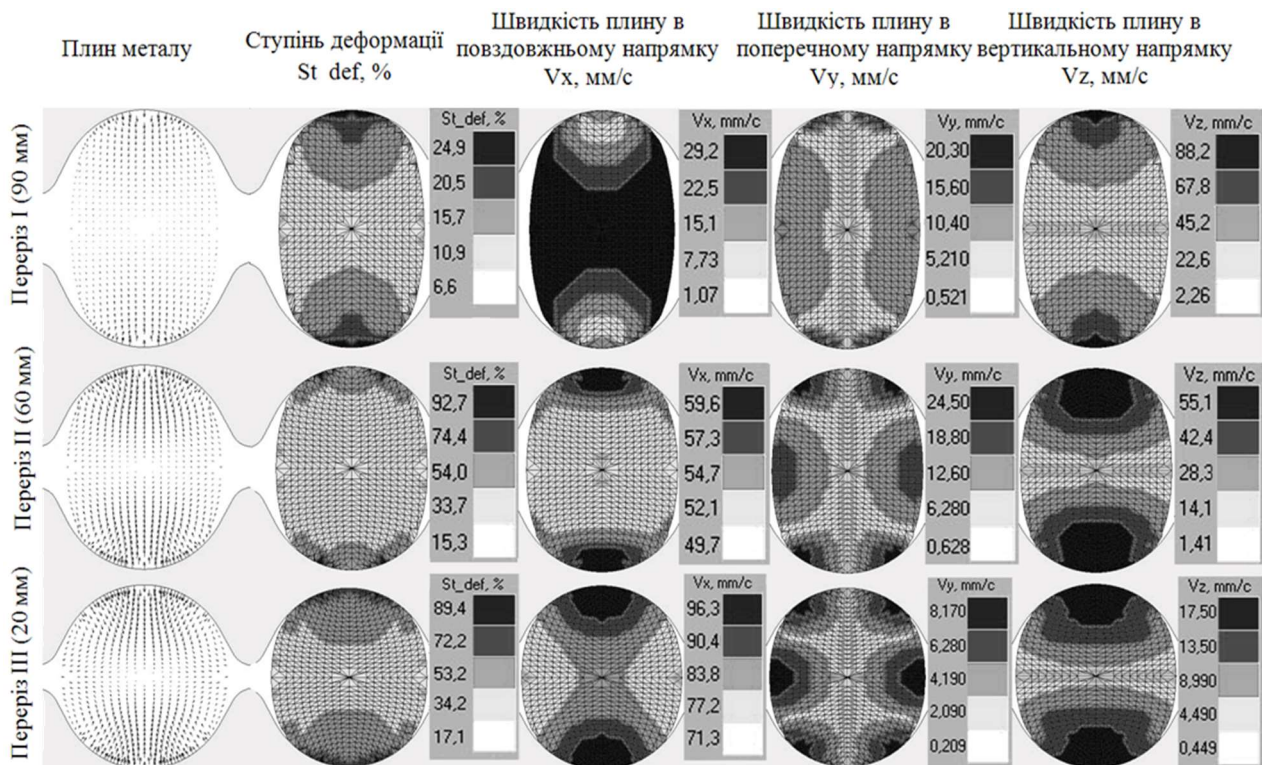


Рис. 2 – Результати розрахунку деформованого стану для калібру кліті №6

Розглядаючи характер деформації у перерізі I бачимо, що першочергово контакт металу з валками відбувається по дну калібру. Найбільш інтенсивний плин металу спостерігається у ділянках, розташованих по дну верхнього і нижнього валка у напрямку середини розкату, які й будуть піддаватися

найбільшому обтисненню при прокатуванні. Оскільки розкат ще не вступив у контакт з валками по всьому периметру, то плин металу по краях розкату, що викликаний початком обтиснення цієї частини заготовки, незначний. В калібрі відбувається прокатування високої смуги. При цьому

спостерігається змінання кромки розкату, а середня частина рухається з більшою швидкістю в повздовжньому напрямку. У поперечному напрямку найбільша швидкість спостерігається по краях області контакту металу з валками та дещо менша швидкість спостерігається по бічних ділянках розкату. Поле швидкостей по висоті максимальне у місці контакту і рівномірно зменшується у напрямку центру калібру. Найбільше значення ступеня деформації є в місці контакту металу з валками, при цьому воно поступово зменшується у напрямку центру заготовки.

Переходячи до розгляду перерізу II бачимо, що плин металу зберігає свою закономірність, яка почалася з моменту входу розкату у валки. При цьому збільшується його інтенсивність, особливо в місцях контакту металу з валками. Швидкість в повздовжньому напрямку зберігає великі значення на невеликій ділянці у місці контакту металу з валками. Більша частина розкату має однакове значення швидкості. У поперечному напрямку найбільша швидкість спостерігається по краях ділянок контакту металу з валками і поступово зменшується, майже зникаючи, у напрямку центру ривчака. Також бічні ділянки мають середні значення швидкості переміщення. Це пов'язано з дією розширення. По висоті поле швидкостей має максимальні значення від дна калібру і поступово зменшуються в напрямку його центру. Максимальні значення ступеня деформації розташовані в області контакту металу з валками. Як бачимо, калібр майже повністю заповнився металом, що свідчить про те, що прийнятний розмір розкату, що задається в валки, задовільний.

У III перерізі плин металу зберігає той самий напрямок, як і всередині осередку деформації. Поля швидкостей переміщення частинок в повздовжньому напрямку, на відміну від попереднього перерізу, більше проникли в середину, максимальні значення знаходяться по краях розкату у вертикальному напрямку, а мінімальні по краях розкату на горизонтальній вісі. В поперечному напрямку швидкість плину стала більш інтенсивною в

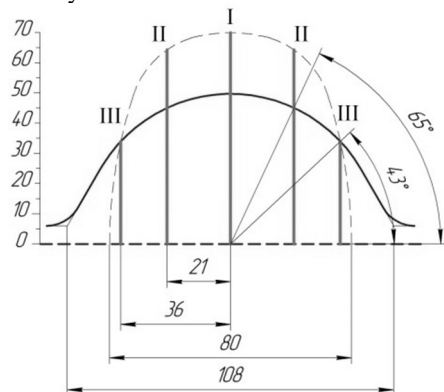


Рис. 3 – Розподіл перерізів по ширині калібру кліт №6

порівнянні з попереднім перерізом. Ступінь деформації глибше розповсюдилася в середину розкату.

Для прогнозування інтенсивності зносу калібрів приймаємо критерій, який враховує наступні параметри: розподіл тиску по довжині осередку деформації, швидкість ковзання металу з валками та довжину контакту.

$$K_{zn} = \int p_{x_{cp}} \cdot v_{ков.ср.} \cdot ldt; \quad (1)$$

де $p_{x_{cp}}$ – середнє значення тиску металу на валки в даному перерізі, Н/мм²;

$v_{ков.ср.}$ – середнє значення швидкості ковзання металу з валками в перерізі, мм/с;

l – довжина контакту металу з валком в даному перерізі, мм.

Оскільки $p_{x_{cp}}$ та $v_{ков.ср.}$ приймаємо незмінними величинами, а l змінюється по довжині осередку деформації, то формула (1) приймає вигляд:

$$K_{zn} = p_{x_{cp}} \cdot v_{ков.ср.} \cdot \frac{l^2}{2}. \quad (2)$$

В дослідженнях П. Л. Клименка «Дослідження розподілу питомого тиску на контактній поверхні при прокатуванні в калібрах» наведено дані розподілу тиску по довжині контакту при прокатуванні овальної заготовки розмірами по висоті 47,9 мм та шириною 30 мм в круглому калібрі діаметром 32 мм (табл. 35, [4]). Прокатували сталь з вмістом С = 0,16 %, Mn = 0,40 % при температурі 1050°C. Також на основі розподілу мездоз по ширині калібру в дослідженні Клименко наведена схема розподілу досліджуваних перерізів при прокатуванні в круглому калібрі з заданими розмірами (рис. 3). За даними розподілу тиску, що були одержані в його дослідженнях (табл. 35, [4]), нами буда побудована просторова діаграма розподілу тиску по довжині контакту при прокатуванні овальної заготовки в круглому калібрі в кожному перерізі калібру кліт №6 (рис. 4).

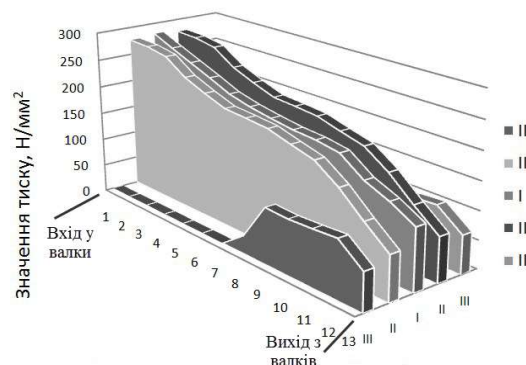


Рис. 4 – просторова діаграма розподілу тиску по довжині осередку деформації по перерізам при прокатуванні в круглому калібрі

При розрахунку швидкість ковзання металу по поверхні валків визначалася в повздовжньому напрямку при моделюванні в програмі ESV Deform. Для визначення величини критерію зносу в кліті №6 чорнової групи в формулу (2) підставляли середнє значення тиску, середнє значення швидкості

ковзання та довжину контакту металу з валком в кожному з перерізів по черзі. Розрахувавши значення K_{zn} для кожного перерізу, отримали графік розподілу величини критерію зносу по ширині круглого калібру (рис. 5).

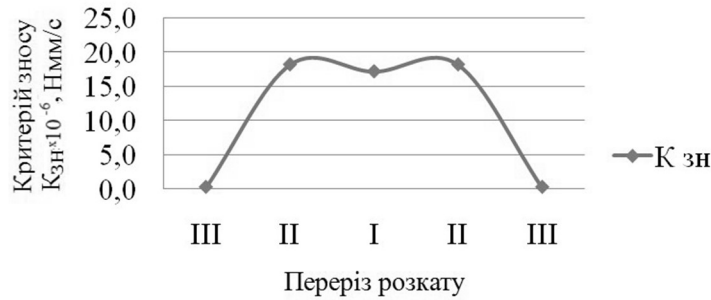


Рис. 5 – Графік розподілу величини K_{zn} по ширині круглого калібру

Кліть 16 чистової групи. Порядок прокатування в цій кліті є послідовним, з 1 калібру до 17. У 18 калібрі прокатування не велось. Для наочності під кожним калібром приведена еюра розподілення зносу (рис. 6, б).

В перших трьох калібрах (прокатування в яких велось з 14.01.15 по 25.01.15), спостерігається сильний знос не тільки по середині калібру, а й по випускам. Зважаючи на зношеність калібрів попередніх клітей: №6 (09.01.15-21.01.15) 12961 т (на 5461 т більше норми) та клітей №3, №7 [5], №9, можна судити про те, що прокатування в 16 кліті велось з переповненням металом. Переповнення присутнє в калібрах № 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15.

Допустимє значення кількості прокатуваного металу за технологічною інструкцією складає 1300 тонн на калібр. З рис. 6,б видно, що в деяких калібрах кількість прокатуваного металу перевищує допустиму більше, ніж в 3 рази.

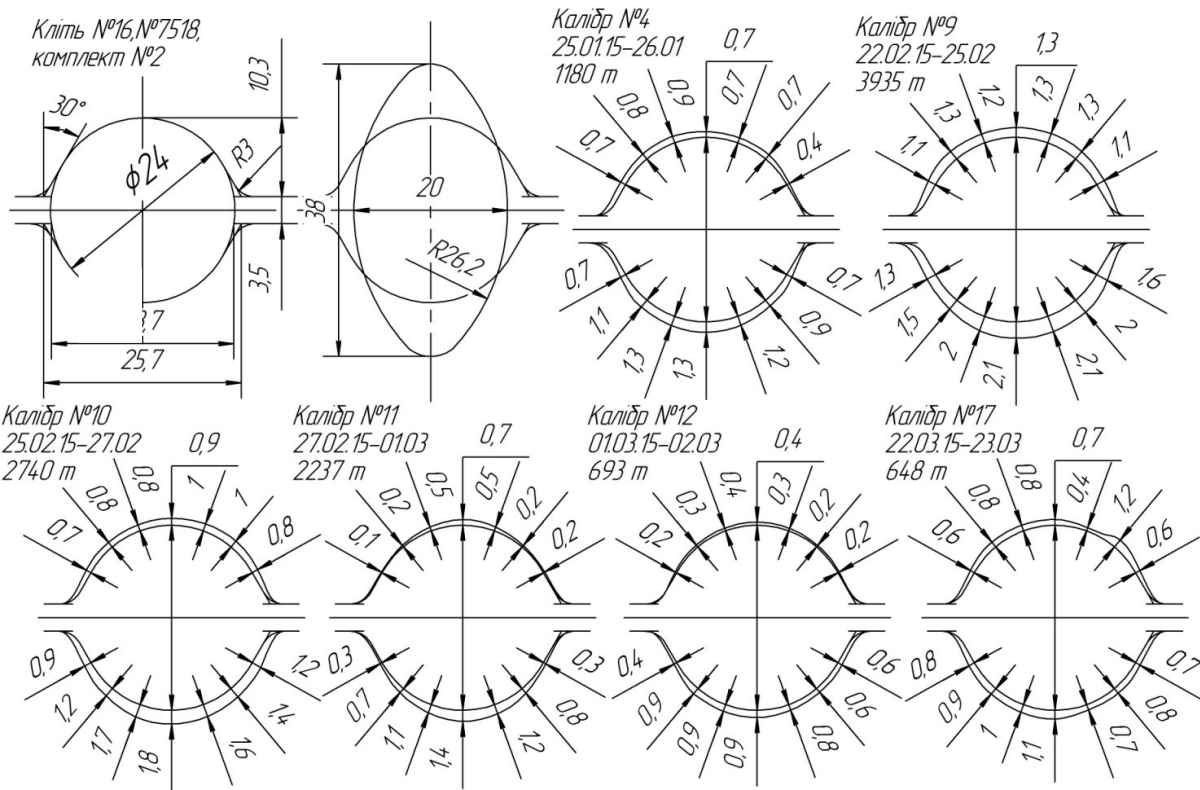


Рис. 6 – Розміри калібрів та заготовки кліті №16 та величини зносу калібрів

Налаштування програми ESV-Deform для 16 кліті: параметри прямокутної сітки – довжина, ширина та висота кожної сторони прямокутника становила 1 мм, температура прокатування дорівнювала 950°C, інші параметри співпадають з параметрами попереднього розрахунку. Діаметри валків в першій обтискній кліті становлять 380 мм, швидкість прокатування прийняли рівною 4,85 м/с, кількість обертів при цьому – 244 об/хв, температура валка 20°C. У калібр чистової кліті №16 задається розкат овальної форми розмірами 38x20 мм. Форма калібру представлена на рис. 6, а.

За підсумками моделювання отримані три перерізи: площина в момент контакту металу з валками на вході в осередок деформації (40 мм від вісі валків); площина по середині осередку деформації (20 мм від осі валків), і на виході з осередку деформації (5 мм від вісі валків). Результати наведені на рис. 7.

В першому перерізі спостерігаємо, як плин металу поступово зменшується у напрямку від місць

контакту з валками до центру розкату. Швидкість плину металу як у повздовжньому (V_x), так і у вертикальному (V_z) напрямках буде максимальною в області контакту металу з валками і мінімальною в центрі розкату. Аналогічна закономірність спостерігається зі ступенем деформації (St_{def}).

В перерізі II попередній розподіл плину металу доповнюється рухом металу від центру по різні боки розкату – відбувається поширення. Також більш інтенсивною стає швидкість плину металу в поперечному напрямку (V_y) від вертикальної осі розкату в різні боки. Характер V_x та V_z якісно не змінюється.

В останньому перерізі – III, середні значення величин V_x , V_z та St_{def} більше розповсюджуються до центру, а мінімальні значення продовжують спостерігатися у бічних частинах розкату. В третьому перерізі напрямки швидкості плину металу в поперечному напрямку якісно співпадає з розподілом V_y при прокатуванні в кліті №6 чорнової групи.

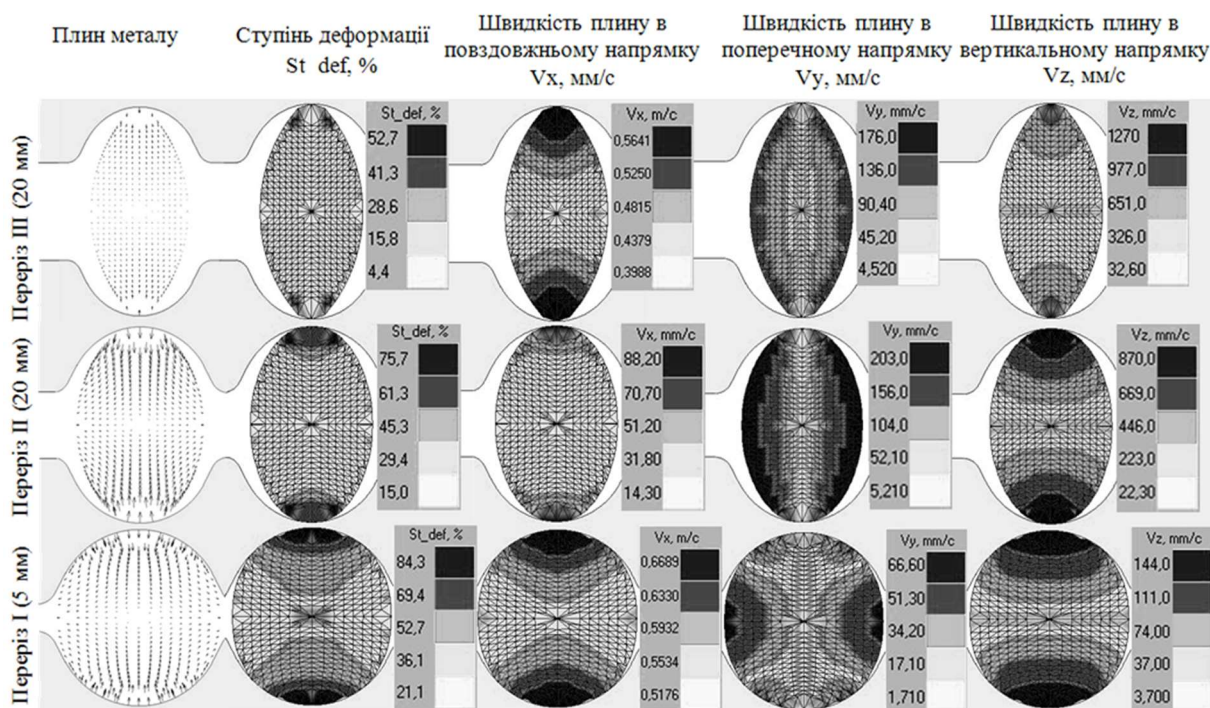


Рис. 7 – Результати розрахунку деформованого стану для калібру кліті №16

На рис. 8 була приведена просторова діаграма розподілу тиску по довжині осередку деформації для випадку прокатування металу в кліті 16, яка була побудована на основі даних розподілу тиску. Критерій зносу визначаємо за формулою (2) та отримуємо графік розподілу величини K_{zn} по перерізам в кліті №16. З рис. 9 видно, що в I перерізі

значення K_{zn} найвищі, тому що тут спостерігаються найбільші значення середнього тиску та довжини осередку деформації. В II перерізі менші значення K_{zn} , а в перерізі III значення критерію зносу мінімальні, оскільки він враховує лише повздовжні швидкості переміщення металу.



Рис. 8 – Просторова діаграма розподілу тиску

Рис. 9 – Розподіл величини $K_{зН}$ по перерізам при прокатуванні в круглому калібрі кліті №16

Висновки. Стаття містить результати виробничих даних зносу валків та математичного моделювання прокатування катанки діаметром 5,5 мм в 6 та 16 клітях прокатного стану 400/200 ПАТ «ДМК». В круглих калібрах кліті №6 максимальна величина зносу спостерігається на ділянках максимальної деформації і поперечного поширення металу по діагоналях калібру. В кліті №16, де також прокатування ведеться у круглих калібрах, інший характер зносу – найбільша його величина спостерігається у центральній частині калібру зі сторони верхнього і нижнього рівчаків, тобто максимальний знос відбувається по дну калібру. Така відмінність пояснюється різною формою овалу, що задається в 6 і 16 кліті.

По всім клітям спостерігається підвищений знос калібрів внаслідок перевищення кількості прокатаного металу порівняно з допустимою в 2–3 рази. Цей фактор впливає на знос наступних калібрів та може вплинути на розміри готового прокату, також зменшуючи кількість переточувань на валках.

Наведена методика прогнозування величини зносу калібру за допомогою спеціального критерію, який враховує середній тиск, середнє значення швидкості ковзання металу та довжини осередку деформації. Прогнозування зносу за результатами моделювання підтверджується практичними даними, зібраними на стані 400/200.

Показано, що навіть при схожості схем деформації характер зносу в однотипних калібрах може відрізнитися, оскільки він в значній мірі залежить від схеми плинину металу.

Існує необхідність проведення додаткових досліджень для виявлення залежності зносу калібрів від параметрів, що визначаються плинном металу в калібрах стану 400/200.

Список літератури

- Северденко В. П. Валки для профільного проката / В. П. Северденко, Ю. Б. Бахтинов, В. Б. Бахтинов. – М.: «Металлургия», 1979. – 224 с.
- Чекмарев А. П. Износ прокатных валков / А. П. Чекмарев, Р. А. Машковцев. – Харьков: «Металлургиздат», 1955. – 148 с.
- Ершов С. В. Развитие теории напряженно-деформированного состояния металла при прокатке крупных круглых профилей с пониженным трещинообразованием в системах сортовых калибров: дис. на соискание научной степени докт. техн. наук: 05.03.05 / Ершов Сергей Владимирович. – Днепропетровск, 2008. – 339 с.
- Клименко П. Л. Контактные напряжения при прокатке / П. Л. Клименко, В. Н. Данченко. – Днепропетровск: «Пороги», 2007. – 292 с.
- Ершов С. В. Дослідження зносу калібрів при прокатуванні круглої заготовки в овалному калібрі / С. В. Ершов, К. Г. Геймур, К. О. Кравченко, К. К. Марченко // 36. Наук. пр. ДДТУ (технічні науки). – Дніпропетровськ: ДДТУ. – 2015. – №2 (27). – С. 60–65.

References (transliterated)

- Severdenko V. P., Ju. B. Bahtinov and V. B. Bahtinov *Valki dlja profil'nogo prokata* [The rolls for the rolled sections]. Moscow, Metallurgia Publ., 1979, 224 p.
- Chekmariev A. P. and R. A. Mashkovcev *Iznos prokatnyh valkov*. [Wear rolls]. Khar'kov, Metallurgizdat Publ., 1955, 148 p.
- Ershov S. V. *Razvitie teorii naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla pri prokatke krupnyh kruglyh profiliej s ponizhennym treshhinoobrazovanijem v sistemah sortovyh kalibrov*: dis. na soiskanie nauchnoj stepeni dokt. tehn. nauk: 05.03.05. Dneprodzerzhinsk, 2008. 339 p.
- Klimenko P. L. and V. N. Danchenko. *Kontaktnye naprjazhenija pri prokatke* [Contact voltage at rolling]. Dnepropetrovsk, Porogi, Publ., 2007, 292 p.
- Ershov S. V., K. G. Gejmur, K. O. Kravchenko and K. K. Marchenko. "Doslidzhennja znosu kalibriv pri prokatuvanni krugloj zagotovki v oval'nomu kalibri". *Zb. nauk. pr. DDTU* (technical sciences). Dniprodzerzhinsk, DDTU, no.2 (27), 2015, pp. 60–65.

Надійшла (received) 11.11..2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження зносу калібрів при прокатуванні катанки в умовах середньосортно-дротового стану 400/200 ПАТ «ДМК» / С. В. Єршов, К. Г. Геймур, К. О. Кравченко, К. К. Марченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 23–30. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671

Исследование износа калибров при прокатке катанки в условиях среднесортно-проволочного стана 400/200 ПАО «ДМК» / С. В. Ершов, К. Г. Геймур, Е. А. Кравченко, К. К. Марченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 23–30. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671

Study of wear and tear of gauges at rolling wire rod in a medium-wire mill 400/200 PJSC "DMC" / S. V. Ershov, K. G. Geymur, K. O. Kravchenko, K. K. Marchenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 23–30. – Bibliogr.: 5 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єршов Сергій Володимирович – доктор технічних наук, професор, Дніпродзержинський державний технічний університет, завідувач кафедру ОМТ, м. Кам'янське, тел.: (0569) 55-11-98.

Ершов Сергей Владимирович – доктор технических наук, профессор, Днепродзержинский государственный технический университет, заведующий кафедрой ОМД, г. Камянское, тел.: (0569) 55-11-98.

Ershov Sergiy Volodimirovich – Ph.D., professor, Dneprodzerzhinsk State Technical University, Head of the Department of Metal forming, Kam'yanske, tel. (0569) 55-11-98.

Геймур Костянтин Георгійович – ПАТ «ДМК», заст. начальника прокатного цеху, м. Кам'янське, e-mail: konstantin.geymur@list.ru.

Геймур Константин Георгиевич – ПАО «ДМК», зам. начальника прокатного цеха, г. Камянское, e-mail: konstantin.geymur@list.ru.

Geymur Kostjantin Georgijovich – PJSC “DMC”, Deputy Head of Rolling Shop, e-mail: konstantin.geymur@list.ru.

Кравченко Катерина Олександрівна – Дніпродзержинський державний технічний університет, асистент кафедри ОМТ, м. Кам'янське, e-mail: katarina088@gmail.com.

Кравченко Екатерина Александровна – Днепродзержинский государственный технический университет, ассистент кафедры ОМД, г. Камянское, e-mail: katarina088@gmail.com.

Kravchenko Katerina Oleksandrivna – Dneprodzerzhinsk State Technical University, assistant of the Department of Metal forming, e-mail: katarina088@gmail.com.

Марченко Костянтин Костянтинович – ПАТ «ДМК», слюсар-ремонтник по ремонту і ревізії високошвидкісних дротових блоків прокатного цеху, м. Кам'янське, e-mail: marchenokk@gmail.com.

Марченко Константин Константинович – ПАО «ДМК», слесарь-ремонтник по ремонту и ревизии высокоскоростных проволочных блоков прокатного цеха, г. Каменское, e-mail: marchenokk@gmail.com.

Marchenko Kostjantin Kostjantinovich – PJSC “DMC”, mechanic-repairman of repair and inspection of high-speed wire blocks of Rolling Shop, e-mail: marchenokk@gmail.com.

УДК 669:1:539.374

О. В. ЗАГОРЯНСКИЙ**МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ТЕЧЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ
И ИХ ДЕФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ВАРИАЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ**

В статье на основе вариационных принципов механики сплошных сред разработаны математические зависимости для распределения истинного поля скоростей в очаге деформации при осадке двухслойных полос. Рассмотрены случаи, когда отсутствует скольжение между слоями двухслойной полосы и когда имеется скольжение, то есть при наличии схватывания между слоями двухслойной полосы и при его отсутствии. На основе полученных зависимостей определяются зависимости распределения деформаций по слоям двухслойной полосы при ее обжатии. Полученные зависимости позволяют определять поле скоростей в очаге деформации в двухслойных полосах, изготовленных из любых металлов.

Ключевые слова: осадка полосы, двухслойная полоса, вариационные зависимости, поле скоростей, неравномерность деформаций.

У статті на основі варіаційних принципів механіки суцільних середовищ розроблені математичні залежності для розподілення істинного поля швидкостей в осередку деформації при осаджуванні двохшарових смуг. Розглянуті випадки, коли відсутнє ковзання між шарами двохшарової смуги та коли має місце ковзання, тобто при наявності схлопювання між шарами двохшарової смуги та при його відсутності. На основі розроблених залежностей визначаються залежності розподілу деформацій по шарах двохшарової смуги при її обтисканні. Отримані залежності дозволяють визначити поле швидкостей в очагу деформації в двохшарових смугах, виготовлених з будь-яких металів.

Ключові слова: осаджування смуги, двохшарова смуга, варіаційні залежності, поле швидкостей, нерівномірність деформацій.

Layered metal compositions have become part of the practice in a variety of industries, and the proportion of these materials in the total production volume is increasing every year. At the core technologies of their production often are empirical approaches based on diverse experimental material. In the paper, based on variation principles of mechanics of continua, the mathematical relations of distribution of true field of velocities at deformation zone in a case of upsetting of two-layered plates are developed. Cases when there is no friction between layers of two-layered plate and when there is the friction, i. e. when there is a gripping and there is no gripping are considered. Based on developed relations, the relations of distribution of deformations of layer of two-layered plate at its upsetting are determined. The resulting variation depending describing the true velocity field in the deformation in cases of sliding between layers of a two-layer strip, and in his absence, after integration and solutions for the parameter and are according to the distribution of strains in the layers. From the values of yield strength metal layers in a two-layer band, the original thickness of the layers and the absolute compression band can calculate the absolute (and relative) deformation layers. The dependences allow determining field of velocities at the deformation zone in two-layered plates made from any metals.

Keywords: upsetting of plate, two-layer plate, variation relations, field of velocities, irregularity of deformations.

Введение. Слоистые металлические композиции прочно вошли в практику в различных отраслях промышленности, и удельный вес данных материалов в общем объеме выпуска возрастает с каждым годом. В основе технологий их получения зачастую лежат эмпирические подходы, основанные на разномобразном экспериментальном материале.

Для изучения течения слоистых металлических композитов при их пластической деформации успешно применяются методы механики сплошных сред [1]. Параметры поля течения при этом описываются кусочно-непрерывными функциями, которые имеют разрыв (разрывы) на поверхности (поверхностях) раздела разнородных материалов, в связи с, как правило, существенными различиями свойств металлов, составляющих композицию [2].

Анализ последних исследований и литературы. Отметим, что проблема течения металла и неравномерности деформации при свободном формообразовании монометалла освещена достаточно полно как в отечественных публикациях, так и в зарубежных [3,4], в то время как той же проблеме для случая свободного формообразования многослойных композиций, в частности, осаживания, не уделялось достаточного внимания.

Особенности деформации при осадке цветных металлов широко освещены в публикациях последнего времени, в частности, значительный вклад внесен отечественными исследователями [5].

Вопросы анализа процессов совместного пластического течения разнородных материалов при некоторых процессах обработки давлением (в частности, при осадке и прокатке) освещены в работах Г.Э. Аркулиса [6]. Следует отметить, что разработанная Г.Э. Аркулисом теория совместной пластической деформации разных металлов (СПДРМ) не всегда применима на практике, а ее изложение изобилует неточностями.

Цель исследования, постановка проблемы.

Для случая осаживания на параллельных бойках слоистой металлической композиции, используя вариационные принципы механики сплошных сред, выявить закономерности течения металла, определяющие неравномерность деформации слоев композиции.

Материалы исследований. Для анализа влияния различных факторов на распределение деформаций при обработке давлением широкие возможности открывает применение приближенных методов расчета, в частности, прямых методов вариационного исчисления (конечно-разностного метода Эйлера, метода Рунге, метода Канторовича)

[7]. Определить функционал, принимающий в реальном процессе экстремальные значения, позволяет начало Лагранжа (начало возможных изменений деформированного состояния), служащее для постановки вариационной задачи. После нахождения функционала решение вариационной задачи может быть найдено с любой степенью точности.

Мощность всех внешних и внутренних сил на возможных перемещениях около состояния равновесия равна нулю [7]

$$\iiint_V \left(\delta\sigma_x \varepsilon_x + \delta\sigma_y \varepsilon_y + \dots + \delta\tau_{zx} \gamma_{zx} \right) dV - \iint_S \left(\delta X_n v_x + \delta Y_n v_y + \delta Z_n v_z \right) dS = 0 \quad (1)$$

где V – объем тела; S – поверхность, на которой заданы силы X_n, Y_n, Z_n – противоположные по знаку силам сопротивления деформации, возникающим при приложении нагрузки, и направленные противоположно действующим силам; v_x, v_y, v_z – проекции полной скорости точки среды на координатные оси; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – скорости относительных деформаций элементарного объема в направлениях координатных осей x, y и z ; τ_{zx} – касательное напряжение в рассматриваемой плоскости, γ_{zx} – относительный сдвиг в рассматриваемой плоскости.

Рассмотрим два случая [8,9]:

– схватывание между слоями композиции не наступило (или, когда длина очага деформации приблизительно равна его высоте). В этом случае влияние трения на межслойных границах и на поверхностях контакта с инструментом можно не учитывать;

– схватывание между слоями композиции наступило. В этом случае скольжение и трение на межслойных границах отсутствует. Трение на поверхностях контакта с инструментом имеет место.

В первом случае вариационное уравнение, задающее поле скоростей в очаге деформации, с использованием первого приближения метода гидродинамических аналогий (модель линейно-вязкой среды) [10], принимает вид

$$\delta \left[\iiint_V \frac{\eta H^2}{2} dV \right] = 0, \quad (2)$$

где η – коэффициент вязкости, связывающий девиатор скоростей деформаций с девиатором напряжений; H – интенсивность деформаций сдвига.

В втором случае вариационное уравнение, задающее поле скоростей в очаге деформации, также с использованием первого гидродинамического приближения и энергетический метод механики сплошных сред [10], принимает вид

$$\delta \left[\iiint_V \frac{\eta H^2}{2} dV + \iint_S \sqrt{3} \eta \alpha \varepsilon_{\max} v_c ds \right] = 0, \quad (3)$$

где α – экспериментальный коэффициент, зависящий от состояния поверхности контакта металла и инструмента и фактора формы очага деформации;

ε_{\max} – максимальная скорость деформации на контактной поверхности; v_c – скорость скольжения на контактной поверхности.

Отметим здесь же, что энергетический метод положен в основу так называемых экстремальных принципов, составляющих сущность вариационных методов. В его основе лежит энергетическое равенство, согласно которому алгебраическая сумма мощностей внутренних и внешних сил равна нулю.

Для решения уравнений (2) и (3) воспользуемся прямым методом вариационного исчисления – методом Ритца, который состоит в том, что отыскание экстремума функционала $J[y(x)]$ предполагает анализ не всего пространства допустимых функций, а только линейных комбинаций допустимых функций вида

$$y_n(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \varphi_i(x), \quad (4)$$

где α_i – постоянные, $\varphi_i(x)$ – система координатных функций, которые линейно независимы и образуют в рассматриваемом пространстве полную систему функций [11].

На рис. 1 приведена схема осадки двухслойной полосы толщиной h_0 (толщина плакирующего слоя h_{01} , основного слоя – h_{02}) параллельными плоскими бойками [8]. Скорость перемещения инструмента – v_0 .

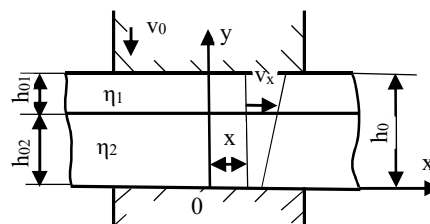


Рис. 1 – Схема осадки двухслойной полосы [8]

Коэффициенты вязкости плакирующего слоя η_1 , основного слоя – η_2 . При этом предполагаем, что $\eta_2 > \eta_1$. Верхний, плакирующий слой – мягкий металл, нижний, основной слой – твердый металл.

Для первого случая граничные условия: при $x = 0$ $v_x = 0$, при $y=0$ $v_y = 0$, при $y = h_0$ $v_y = -v_0$; условие несжимаемости: $\varepsilon_x + \varepsilon_y = 0$, где ε_x и ε_y – скорости деформации в направлениях x и y .

Поле скоростей для очага деформации в плакирующем слое:

$$v_x = ax, \quad (5)$$

$$v_y = -[a(y - h_0) + v_0], \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}_x = -\dot{\varepsilon}_y = a, \quad (7)$$

Поле скоростей для очага деформации в основном слое:

$$v_x = -\left[a - \left(a - \dot{\varepsilon} \right) \frac{h_0}{h_{02}} \right] x, \quad (8)$$

$$v_y = -\left[a - \left(a - \dot{\varepsilon} \right) \frac{h_0}{h_{02}} \right] y, \quad (9)$$

$$\dot{\varepsilon}_x = \dot{\varepsilon}_y = a - \left(a - \dot{\varepsilon} \right) \frac{h_0}{h_{02}}, \quad (10)$$

где v_x и v_y – скорости перемещения в направлениях x и y ; $\dot{\varepsilon} = \frac{v_0}{h_0}$ – скорость деформации по очагу деформации; a – варьируемый параметр, определяемый из вариационного уравнения.

Для второго случая граничные условия аналогичны: при $x = 0$ $v_x = 0$, при $y = h_0$ $v_y = -v_0$, при $y = 0$ $v_y = 0$; аналогично и условие несжимаемости.

Поле скоростей запишется следующим образом:

$$v_x = \left[a + \frac{2y(\dot{\varepsilon} - a)}{h_0} \right] x, \quad (11)$$

$$v_y = -\left[a + \frac{2y(\dot{\varepsilon} - a)}{h_0} \right] y, \quad (12)$$

$$\dot{\varepsilon}_x = -\dot{\varepsilon}_y = a + \frac{2x(\dot{\varepsilon} - a)}{h_0}, \quad (13)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2x(\dot{\varepsilon} - a)}{h_0} \quad (14)$$

Для первого случая интенсивность скоростей деформации (при равномерной деформации) [12]:

$$H = 2\dot{\varepsilon}_x \quad (15)$$

Для второго случая интенсивность скоростей деформации (для плоского деформированного состояния) [12]:

$$H = 2\sqrt{\dot{\varepsilon}_x^2 + 0,25\gamma_{xy}^2} \quad (16)$$

Так как значения коэффициентов вязкости и скоростей деформации в направлении x будут различны для основного и плакирующего слоев, то выражение (2) для первого случая будет представлено в виде

$$\delta \left[\int_{h_{02}}^{h_0} \int_0^L \left(2\dot{\varepsilon}_{x1} \right)^2 \frac{\eta_1}{2} dx dy + \int_0^{h_{02}} \int_0^L \left(2\dot{\varepsilon}_{x2} \right)^2 \frac{\eta_2}{2} dx dy \right] = 0 \quad (17)$$

где L – полуширина бойка (расстояние от оси y до края бойка), а индексы 1 и 2 относятся к плакирующему и основному слою соответственно. Для второго случая выражение (2) преобразуется в (17) с добавлением еще двух слагаемых:

$$\delta \left[2 \left(\int_{h_{02}}^{h_0} \int_0^L \left(\dot{\varepsilon}_{x2} \right)^2 \frac{\eta_2}{2} dx dy + \int_0^{h_{02}} \int_0^L \left(\dot{\varepsilon}_{x1} \right)^2 \frac{\eta_1}{2} dx dy \right) + \sqrt{3}\alpha \left(\int_0^L \eta_1 \dot{\varepsilon} v_{x(y=h_0)} dx + \int_0^L \eta_2 \dot{\varepsilon} v_{x(y=0)} dx \right) \right] = 0 \quad (18)$$

Подставляя в зависимость (17) выражения для $\dot{\varepsilon}_x$ (7) и (10), интегрируя (17) и варьируя, получаем

$$a \left(\frac{h_{02}}{h_0} - \left(\frac{h_{02}}{h_0} \right)^2 + \frac{\eta_2}{\eta_1} \cdot \left(\frac{h_{02}}{h_0} \right)^2 - 2 \frac{\eta_2}{\eta_1} \cdot \frac{h_{02}}{h_0} + \frac{\eta_2}{\eta_1} \right) + \frac{v_0}{h_0} \cdot \frac{\eta_2}{\eta_1} \left(\frac{h_{02}}{h_0} - 1 \right) \quad (19)$$

После преобразования получим

$$a = \frac{\frac{v_0}{h_0} \cdot \frac{\eta_2}{\eta_1}}{\frac{h_{02}}{h_0} - \frac{\eta_2}{\eta_1} \left(\frac{h_{02}}{h_0} - 1 \right)} \quad (20)$$

Известно [12], что

$$v_y = \frac{dy}{dt} \quad (21)$$

Подставляя вместо координаты y толщины слоев и подставляя выражение (6), получаем

$$\frac{dh_0}{v_0} = \frac{dh_{02}}{a[h_{02} - h_0] + v_0} \quad (22)$$

Используя зависимость (20), получаем

$$\frac{dh_0}{v_0} = \frac{dh_{02}}{\frac{\eta_2}{\eta_1} \cdot \frac{v_0}{h_0} \cdot \frac{h_{02} - h_0}{h_0} + 1} \quad (23)$$

Сокращая v_0 в знаменателях, получим выражение для dh_{02}

$$dh_{02} = \frac{dh_0 \left(\frac{h_{02}}{h_0} \right)}{\frac{\eta_2}{\eta_1} + \frac{h_{02}}{h_0} \left(1 - \frac{\eta_2}{\eta_1} \right)} \quad (24)$$

Полагая, что отношения толщин и вязкостей – постоянные величины, после интегрирования зависимости (24) получим выражение для абсолютного обжатия основного (твердого) слоя

$$\Delta h_{02} = \frac{\Delta h_0 \left(\frac{h_{02}}{h_0} \right)}{\frac{\eta_2}{\eta_1} + \frac{h_{02}}{h_0} \left(1 - \frac{\eta_2}{\eta_1} \right)} \quad (25)$$

Для практического применения выражение (25) применимо, когда задано общее обжатие Δh_0 . Обжатие плакирующего (мягкого) слоя определится по зависимости

$$\Delta h_{01} = \Delta h_0 - \Delta h_{02} \quad (26)$$

Отношение вязкостей η_2/η_1 для практического применения неудобно, поэтому предлагается [9] использовать вместо него отношение пределов текучести металлов слоев при аналогичных условиях деформации. Аналогично решение может быть получено и для второго случая.

Выводы. Разработанные вариационные зависимости, описывающие истинное поле скоростей в очаге деформации для случаев скольжения между слоями двухслойной полосы и при его отсутствии, после интегрирования и решения относительно параметра a представляют собой зависимости для распределения деформаций по слоям. С практической точки зрения это позволяет, зная пределы текучести металлов слоев в двухслойной полосе, исходные толщины слоев и абсолютное обжатие полосы, рассчитать абсолютные (и относительные) деформации слоев.

Список литературы

1. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – Екатеринбург: УПИ, 2001. – 592 с.
2. Ковалев С. И. Напряжения и деформации при плоской прокатке / С. И. Ковалев, Н. И. Корягин, И. В. Ширко; Под ред. А. Ф. Белова. – М.: Металлургия, 1982. – 256 с.
3. Young M., Cartwright B., Paton R., Yu X., Zhang L. and Mai Y-W. Material characterisation tests for finite element simulation of the diaphragm forming process // Proc. 4th Int. ESAFORM Conference on Material Forming, University of Liege, April 2001.
4. Dixit P. M., Dixit U. S. Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods. – London: Springer, 2008. – 590 p.
5. Кухарь В. В. Напряженно-деформированное состояние и степень использования запаса пластичности на боковой поверхности осажённых заготовок при различных условиях на контакте / В. В. Кухарь, К. К. Диамантопуло, В. А. Бурко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: Зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – С. 157–162.

6. Аркулис Г. Э. Совместная пластическая деформация разных металлов / Г. Э. Аркулис. – М.: Металлургия, 1964. – 272 с.
7. Тарновский И. Я. Деформация металлов при прокатке / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, В. Б. Ляшков. – Свердловск, Metallurgizdat, 1956. – 287 с.
8. Меандров Л. В. Применение вариационных принципов для исследования деформаций и усилий при прокатке биметаллических листов / Меандров Л. В., В. А. Устименко, А. А. Быков // Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением: Межвузовская научно-техническая конференция: докл. конф. – Свердловск: АН СССР, 1963. – С. 308–314.
9. Меандров Л. В. Исследование деформации слоев биметалла при обработке давлением / Л. В. Меандров, В. А. Устименко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1963. – № 11. – С. 109–112.
10. Тарновский И. Я. Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением / И. Я. Тарновский. – М.: Металлургия, 1973. – 252 с.
11. Пантелеев А. В. Вариационное исчисление в примерах и задачах / А. В. Пантелеев. – И.: Изд-во МАИ, 2006. – 228 с.
12. Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов / А. А. Богатов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с.

References (transliterated)

1. Kolmogorov V. L. *Mehanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of pressure treatment of metals]. Ekaterinburg, UPI, 2001. 592 p.
2. Kovalev S. I., Koryagin, N. I. and Shirko, I. V. *Napryazheniya i deformatsii pri ploskoy prokatke* [Stresses and deformations at the flat rolling]. Moscow, Metallurgiya, 1982. 256 p.
3. Young M. et al. Material characterisation tests for finite element simulation of the diaphragm forming process. *Proc. 4th Int. ESAFORM Conference on Material Forming*, University of Liege, 2001.
4. Dixit P. M. and Dixit U. S. Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods. London: Springer, 2008. 590 p.
5. Kukhar V. V., Diamantopulo K. K. and Burko V. A. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye i stepen' ispol'zovaniya zapasa plastichnosti na bokovoy poverhnosti osazhennykh zagotovok pri razlichnykh usloviyakh na kontakte* [Stressed-deformationed state and the degree of utilization of plasticity margin on the side of jumped blanks under different conditions on contact] *Udoskonalennyya protsessiv i obladnannyya obrabotki tyskom v mashinobudovanni ta metallurgii: Zb. nauk. pr. Kramators'k, DDMA, 2007. pp. 157–162.*
6. Arkulis G. E. *Sovmestnaya plasticheskaya deformatsiya raznykh metallov* [The joint plastic deformation of different metals]. Moscow, Metallurgiya, 1964. 272 p.
7. Tarnovskij I. Ya., Pozdeev A. A. and Lyashkov V. B. *Deformatsiya metallov pri prokatke* [Deformation of metals at rolling]. Sverdlovks, Metallurgizdat, 1956. 287 p.
8. Meandrov L. V., Ustimenko, V. A. and Bykov A. A. *Prinenenie varatsionnykh printsipov dlya issledovaniya deformatsij i usilij pri prokatke bimetallicheskikh listov* [Application of variational principles for the study of the deformation and forces during rolling of bimetallic sheets]. *Inzhenernye metody rascheta tehnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem: Mezhhuzovskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya: dokl. konf. Sverdlovsk, AN SSSR, 1963. pp. 308–314.*
9. Meandrov, L. V. and Ustimenko, V. A. *Issledovanie deformatsii sloev bimetalla pri obrabotke davleniem* [Research of deformation of the bimetal layers by pressure treatment]. *Izvesiya vuzov. Chernaya metallurgiya, 1963, no 11. Pp. 109–112.*
10. Tarnovskij I. Ya. *Inzhenernye metody rascheta tehnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem* [Engineering methods of calculation of technological processes of pressure treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya, 1973. 252 p.
11. Panteleev A. V. *Variatsionnoe ischislenie v primerah i zadachah* [The calculus of variations in examples and problems]. Moscow, Izd-vo MAI, 2006. 228 p.
12. Bogatov A. A. *Mehanicheskie svoystva i modeli razrusheniya metallov* [Mechanical properties and models of cracking of metals]. Ekaterinburg, GOU VPO UGTU-UPI, 2002. 329 p.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделювання сумісної течії різнорідних металів та їх деформації на основі варіаційних принципів / О. В. Загорянський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 31–35. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2671

Моделирование совместного течения разнородных металлов и их деформации на основе вариационных принципов / О. В. Загорянский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 31–35. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2671.

Modeling the joint flow of dissimilar metals and deformation based on variational principles / O. V. Zagoryanskiy // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 31–35. – Bibliogr.: 12 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Загорянський Олег Володимирович – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, аспірант; тел.: (050) 702-39-10; e-mail: olehzahor@gmail.com.

Загорянский Олег Владимирович – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, аспирант; тел.: (050) 702-39-10; e-mail: olehzahor@gmail.com.

Zagoryanskiy Oleg Vladimirovich – Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, aspirant; tel.: (050) 702-39-10; e-mail: olehzahor@gmail.com.

УДК 621.7

В. Л. КАЛОЖНЫЙ, Я. С. ОЛЕКСАНДРЕНКО, И. П. КУЛИКОВ

ХОЛОДНАЯ ГИБКА СТАЛЬНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРУБ В ТРУБОГИБЕ С ПРОТОЧКОЙ СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ НА ФАСОННОМ ВАЛКЕ

С использованием метода конечных элементов изучен известный способ холодной гибки на определенном радиус стальных прямоугольных труб в трубогибе с проточкой специального профиля на фасонном валке, на которой по середине расположен выступ. Для сравнения результатов было проведено моделирование формообразования для трех значений величины диаметра указанного выступа. Деформированию подвергались прямоугольные трубы из стали 10. Определены зависимости момента гибки стальных прямоугольных труб от угла поворота фасонного валка. Установлены конечные формы и размеры полученных холодной гибкой изделий, а также определено напряженно-деформированное состояние и степень использования ресурса пластичности сформированного металла. Наблюдается отсутствие гофр, складок на изделиях и контакта боковой поверхности изделия с стенками фасонного валка, что гарантирует простоту извлечения изделия из рабочей зоны трубогиба. Установлено увеличение эффективности процесса гибки стальных прямоугольных труб в трубогибе с уменьшением величины диаметра выступа на рабочей поверхности фасонного валка.

Ключевые слова: холодная гибка, трубогиб, фасонный валок, проточка специального профиля, прямоугольная труба, метод конечных элементов, момент гибки, конечные форма и размеры, напряженно-деформированное состояние.

З використанням методу скінченних елементів вивчений відомий спосіб холодного гнуття на певний радіус сталевих прямокутних труб в трубогині з проточкою спеціального профілю на фасонному валку, на якій по середині розташований виступ. Для порівняння результатів було проведено моделювання формоутворення для трьох значень величини діаметра зазначеного виступу. Деформування називали прямокутні труби зі сталі 10. Визначено залежності моменту гнуття сталевих прямокутних труб від кута повороту фасонного валка. Встановлено кінцеві форма та розміри отриманих холодним гнуттям виробів, а також визначено напружено-деформований стан і ступінь використання ресурсу пластичності здеформованого металу. Спостерігається відсутність гофр, складок на виробах і контакту бічної поверхні виробу з стенками фасонного валка, що гарантує простоту вилучення виробу з робочої зони трубогину. Встановлено зростання ефективності процесу гнуття сталевих прямокутних труб в трубогині зі зменшенням величини діаметра виступу на робочій поверхні фасонного валка.

Ключові слова: холодне гнуття, трубогин, фасонний валок, проточка спеціального профілю, прямокутна труба, метод скінченних елементів, момент гнуття, кінцеві форма і розміри, напружено-деформований стан.

Interest in large-scale industrial enterprises to technology bending of steel rectangular pipes is steadily increasing. The greatest distribution they received in the shipbuilding, power engineering, automotive and aircraft industry – for the manufacture of the frame elements of various steel structures, ships, airplanes, cars. Using the finite element method investigated the known method of cold bending for a certain range of steel rectangular pipes on pipe bender with special profile groove on the shaped roller, the ledge is located in the middle of special profile groove. For comparison of the results, simulation of forming was conducted for three values of ledge's diameter. Subjected to deformation the rectangular pipes of steel 10. There're identified dependence of the rectangular steel pipe bending's moment of the angle of rotation of the shaped roller. Identified the final shape and size of the products obtained by cold bending, as well as stress-strain state and the degree of using of the resource of plasticity in deformed metal. There is a lack of corrugations, folds on the products and contact the side surface of the product with walls shaped roller, which ensures ease removal of product from the working zone of the pipe bender. Established increase efficiency of the process of cold bending of steel rectangular pipes on pipe bender with decreasing of value of ledge's diameter on the working surface of the shaped roller.

Keywords: cold bending, pipe bender, shaped roller, with special profile groove, rectangular pipe, finite element method, bending's moment, the final shape and size, stress-strain state.

Введение. Интерес крупных промышленных предприятий к технологиям гибки стальных прямоугольных труб неизменно растет. Наибольшего распространения они получили в судостроении, энергетическом машиностроении, автомобилестроении и авиастроении – для изготовления элементов каркаса различных металлоконструкций, судов, самолетов, автомобилей. Также растут требования к качеству получаемых гибкой изделий, которое заключается в исключении искажения формы и гофрообразования, и уменьшении утонения стенки.

Существуют способы гибки круглых труб и заготовок со сложным профилем поперечного сечения [1]. При гйбе таких заготовок возникают нежелательные побочные деформации элементов профиля – оваллизация сечения круглой трубной заготовки, а также потеря устойчивости (складкообразование) на отдельных элементах сгибаемой заготовки. Возникновение побочных деформаций является следствием

неравномерности напряженно-деформированного состояния элементов заготовки по ее ширине и длине. Одним из способов устранения побочных деформаций элементов профиля является применение гибки с дорном методом наматывания [2, 3]. Однако при таком способе наблюдается ряд дефектов, которые возникают под действием сжимающих напряжений на внутренней части гйба и образуют гофры, а в ряде случаев – складки, искажается проходное сечение трубы – овальность и сплющивание, приводит к потере устойчивости трубы. При использовании составных шаровых дорнов в зоне гйба из-за потери устойчивости стенки трубы образуются складки – гофры, при этом часть металла заполняет пространство между шарами, и образуются задиры, неровности и другие дефекты трубы. Для решения вышеуказанных проблем при гйбе с дорном существует технология гйбки труб методом продольного раскатывания [4, 5].

С увеличением количества предприятий мелкосерийного и серийного производства,

возрастает интерес к формообразованию изделий из стальных прямоугольных труб в универсальных гибочных машинах малого размера, например, трубогибочные станки, что накладывает определенные ограничения на процесс гибки. При горячей гибке возникают трудности с предварительным нагревом заготовок и при извлечении изделия из фасонного валака.

Интенсификация процессов холодной гибки стальных прямоугольных труб. Существует способ холодной гибки стальных прямоугольных труб с проточкой специального профиля на фасонном валке, который позволяет получать изделия, отвечающие вышеупомянутым требованиям к качеству. Схема формообразования в трубогибочном станке ВМ-65А представлена на рис. 1. Трубная заготовка 1 прямоугольного профиля устанавливается в фасонный валок 2. Конец заготовки 1 фиксируется к фасонному валку 2 при помощи зажимного кольца 3, выполненного по внешним размерам трубной заготовки. Также заготовка фиксируется двумя прижимными валками 4. На поверхности прижимных валков выполняют проточку диаметрами $d_1 = 63$ мм и $d_2 = 82$ мм, шириной $B = 42$ мм. Размеры зажимного кольца принимали равными размерам трубной заготовки, шириной $X = 40$ мм. Для предотвращения образования гофр и складок в зонегиба, что является

следствием напряженного состояния при изгибе прямоугольных труб, когда нормальные тангенциальные напряжения вызывают сжимающие радиальные напряжения, на поверхности фасонного валка выполняют проточку специального профиля диаметрами $D_1 = 150$ мм и $D_2 = 175$ мм с выступом, диаметром d и высотой h , вдавливание которого компенсирует сжимающие напряжения, шириной $B = 42$ мм. Деформированию подвергали прямоугольные трубные заготовки длиной $L = 300$ мм, с размерами профиля: $a = 400$ мм, $b = 25$ мм, $r = 4$ мм, толщиной стенки $S = 2$ мм (рис. 2, а). Гибку осуществляют поворотом фасонного валка на определенный угол. Общий вид фасонного валка с проточкой специального профиля представлен на рис. 2, б.

Цель работы. Целью работы является определение рациональных размеров проточки специального профиля на рабочей поверхности фасонного валка при холодной гибке прямоугольных труб в трубогибе, предотвращающие образования гофр и складок, а также расширение заготовки в зонегиба, что приводит к осложнению изъятия деформированной заготовки из фасонного валка.

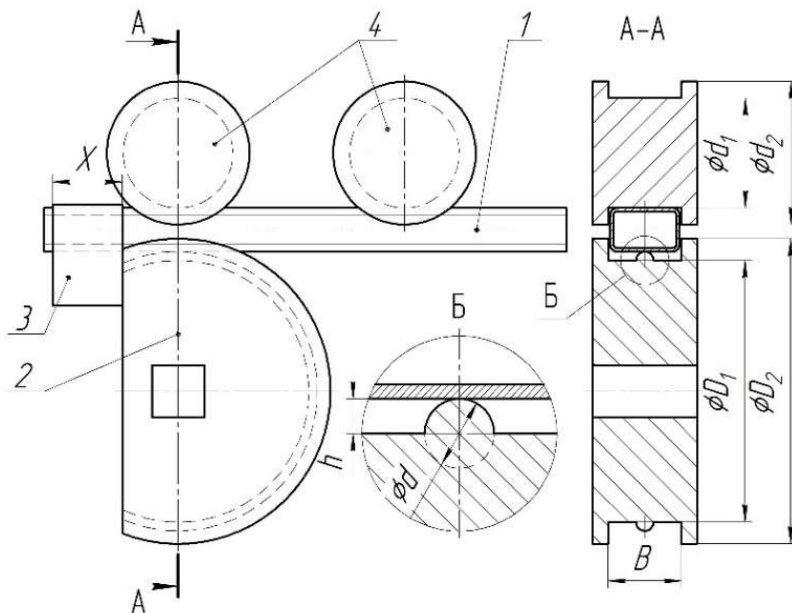


Рис. 1 – Схема способа гибки стальных прямоугольных труб в трубогибе с проточкой специального профиля на фасонном валке

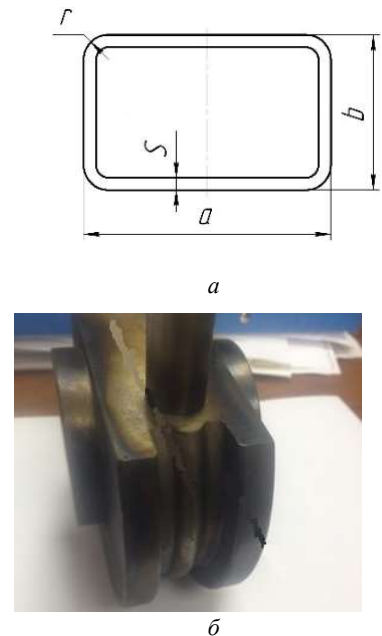


Рис. 2 – Размеры профиля заготовки и общий вид фасонного валка:
а – размеры профиля заготовки,
б – общий вид фасонного валка

Постановка задачи моделирования процесса холодной гибки стальных прямоугольных труб. Для установления

параметров гибки стальных прямоугольных труб в трубогибе с проточкой специального профиля на фасонном валке проведен расчетный анализ

методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе DEFORM Integrated 2D3D™. Холодной гибке подвергались прямоугольные трубчатые заготовки из Стали 10 (AISI-1010). Частота вращения приводного вала $\nu=3$ об/мин. Величина коэффициента трения на контактирующих поверхностях заготовки с деформирующим инструментом была принята $\mu=0,08$. Задачи формоизменения решали в упругопластической постановке с упрочнением. Диаметр формообразующей выступ специального профиля на рабочей поверхности фасонного вала окружности d задавали в значениях $d=10$ мм, $d=15$ мм и $d=20$ мм, высоту h принимали равной половине диаметра d .

Энерго-силовые затраты процесса, форма, размеры и качество изделий при холодной гибке стальных прямоугольных труб. Зависимость момента гибки от угла поворота фасонного вала для троих значений диаметра d приведена на рис. 3. Как видно с рисунка, графики подобны для троих значений диаметров d , наблюдается уменьшение величин момента в характерных точках графиков с уменьшением величины диаметра d . Максимального значения момента гибки достигает в конце процесса гибки и составляет 1350 кН·мм при величине диаметра $d=20$ мм.

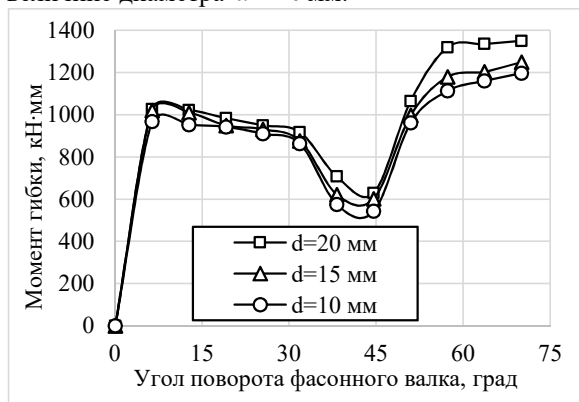


Рис. 3 – Зависимость момента гибки от угла поворота фасонного вала

Общий вид полученного изделия представлен на рис. 4 в разрезе с характеризующими размерами полученного изделия, в зоне наибольшего деформирования: величины высоты вдавливаемой впадины на контактной поверхности заготовки с выпуклостью вала h_2 и толщины стенки S_2 , высотой утяжины изделия на противоположной поверхности h_1 , толщиной стенки S_1 и шириной заготовки H . Наблюдается отсутствие гофр, складок и контакта боковой поверхности изделий с стенками фасонного вала, что гарантирует простоту изъятия изделия из трубогиба. Угол изгиба достигает значения $\varphi = 70^\circ$.

Величины размеров h_1 , h_2 , S_1 , S_2 и H для трех значений диаметра d занесены в табл. 1. С увеличением величины диаметра окружности формообразующей профиль выступа на рабочей поверхности фасонного вала d наблюдается увеличение высоты впадины h_2 и утяжины h_1 , снижение степени незначительного утолщения стенки изделия в зоне впадины S_2 и степени утонения стенки в зоне утяжины S_1 , а также увеличение значения ширины полученных изделий H .

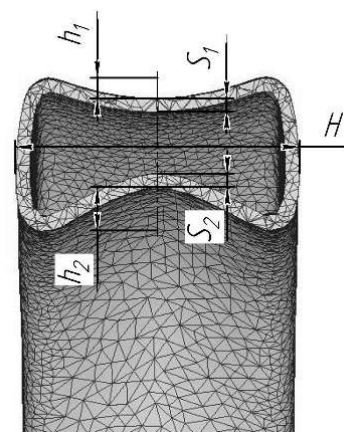


Рис. 4 – Общий вид полученного изделия в разрезе

Таблица 1 – Величины размеров, полученных холодной гибкой изделий, мм

d	h_1	h_2	S_1	S_2	H
10	3,06	5,96	1,95	2,11	40,86
15	3,24	7,91	1,94	2,09	41,12
20	3,38	8,67	1,93	2,07	41,44

Напряженно-деформированное состояние в объеме металла полученных изделий холодной гибкой стальных прямоугольных труб. Моделированием МКЭ установлено напряженно-деформированное состояние в полученных изделиях, что позволило выявить степень

использования ресурса пластичности Ψ в объеме сдеформированного металла. Проработку структуры металла холодной пластической деформацией и упрочнение сдеформированного

металла можна оцінити по розподіленню інтенсивності деформацій ε_i .

Розподілення інтенсивності деформацій ε_i в об'ємі сформованого металу изделий, отриманих при гнбці с різними величинами діаметра, формоутворюючої спеціального профілю проточки на робочій поверхності фасонного валка, окружности d в зоні найбільшого деформування наведено на рис. 5. Характер розподілення величин інтенсивності деформацій ε_i для трьох величин діаметра, формоутворюючої выступ спеціального профілю на робочій поверхності фасонного валка, d подобен, с уменьшением діаметра d наблюдается не значительное снижение величин інтенсивності деформування ε_i . Наибольшие значения

величины ε_i сконцентрированы в зонах радиуса скругления перпендикулярных друг-другу поверхностей изделия возле вдавленной впадины и утяжины и составили $\varepsilon_i = 0,14$ для гнбки с величиной діаметра, формоутворюючої спеціального профілю проточки на робочій поверхності фасонного валка, окружности $d = 10$ мм, $\varepsilon_i = 0,17$ для величин $d = 15$ мм и $d = 20$ мм.

Розподілення напружень по осі Х (ось Х была принята по направлению длины заготовки) σ_x в об'ємі сформованого металу изделий, отриманих при гнбці с різними величинами діаметра, формоутворюючої спеціального профілю проточки на робочій поверхності фасонного валка, окружности d в зоні найбільшого деформування наведено на рис. 6.

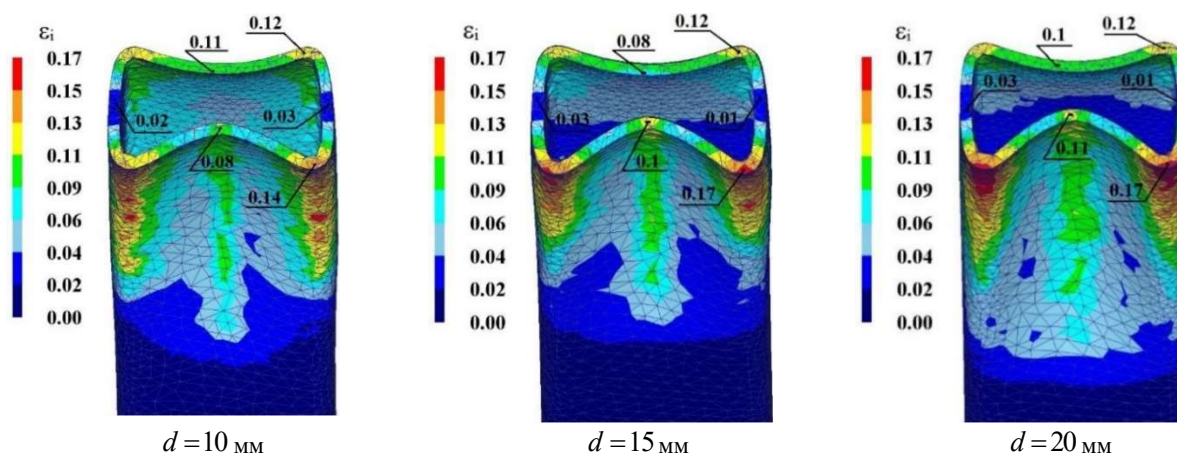


Рис. 5 – Розподілення інтенсивності деформування ε_i в об'ємі сформованого металу изделий, отриманих при гнбці с різними величинами діаметра формоутворюючої выступ спеціального профілю на робочій поверхності фасонного валка окружности d

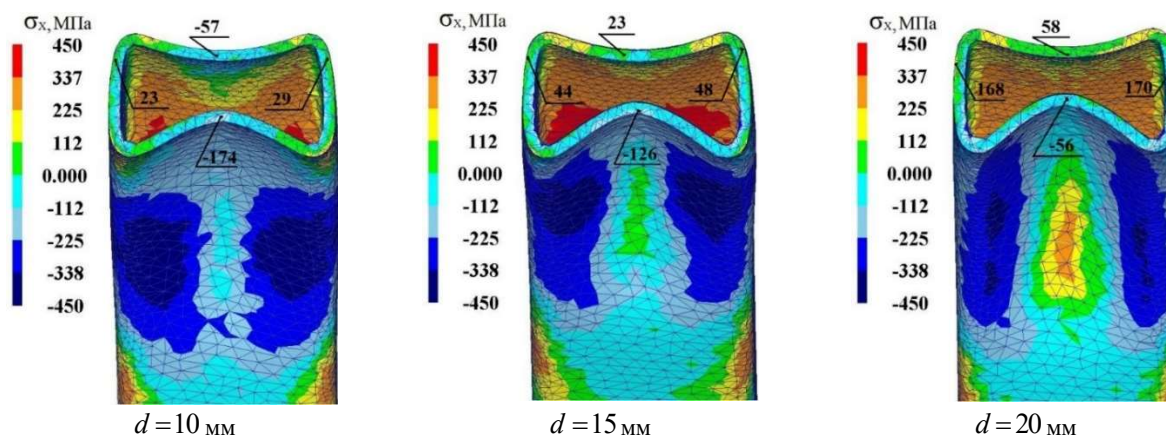


Рис. 6 – Розподілення напружень σ_x в об'ємі сформованого металу изделий, отриманих при гнбці с різними величинами діаметра формоутворюючої выступ спеціального профілю на робочій поверхності фасонного валка окружности d

Как видно из рисунка, величины напряжений σ_X при холодной гибке стальных прямоугольных труб в зоне вдавливания выступа специального профиля и зоне утяжины разные по направлению, а значит внедрение выступа проточки специального профиля на рабочей поверхности фасонного вала в тело заготовки компенсирует возникающие при гибке сжимающие напряжения и предотвращает образование гофр и складок в зонегиба. Величины напряжений по оси X в зоне вдавливания выступа специального профиля и зоне утяжины составили $\sigma_X = -174$ МПа и $\sigma_X = -57$ МПа соответственно для гибки с величиной диаметра, формообразующей специальный профиль проточки на рабочей поверхности фасонного вала, окружности $d = 10$ мм, $\sigma_X = -126$ МПа и $\sigma_X = 23$ МПа соответственно

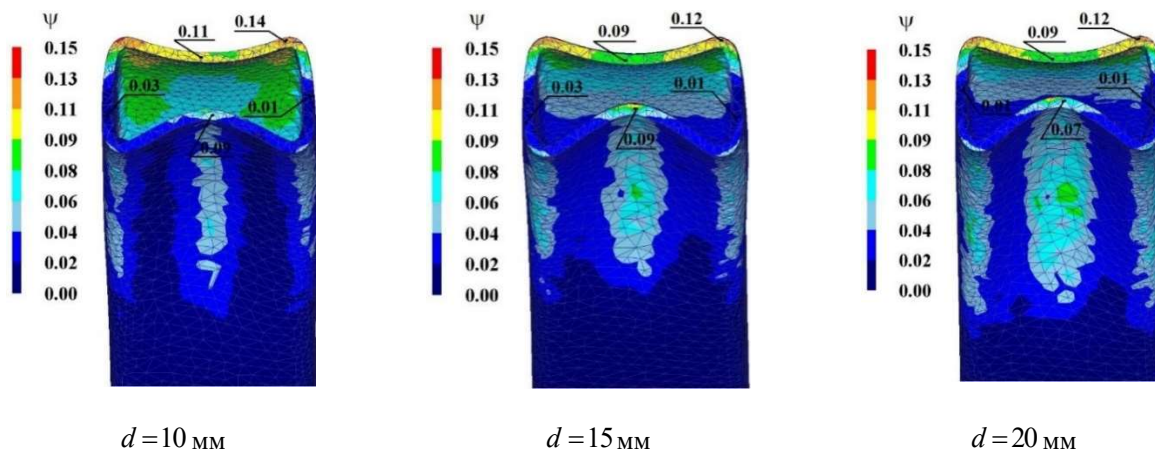


Рис. 7 – Распределение степени использования ресурса пластичности ψ в объеме сформированного металла изделий, полученных при гибке с разными величинами диаметра формообразующей выступ специального профиля на рабочей поверхности фасонного вала окружности d

С уменьшением диаметра d наблюдается незначительное увеличение величин степени использования ресурса пластичности ψ . Максимального значения степень использования ресурса пластичности достигает величины $\psi = 0,14$, что является меньше допустимого для деформирования без разрушений.

На основе полученных данных выбираем рациональный размер проточки специального профиля на фасонном валке с величиной формообразующей выступ окружности $d = 10$ мм.

Выводы:

1. Методом конечных элементов разработана математическая модель и проведен расчетный анализ процесса гибки стальных прямоугольных труб в трубогибе с проточкой специального профиля на фасонном валке.

2. Расчетом установлены энергосиловые затраты процесса гибки стальных прямоугольных труб, конечная форма и размеры полученных изделий, а также напряженно-деформированное

для $d = 15$ мм, а также $\sigma_X = -56$ МПа и $\sigma_X = 58$ МПа соответственно для $d = 20$ мм. С уменьшением диаметра d наблюдается снижение величин напряжений σ_X .

Определение степени использования ресурса пластичности в объеме сформированного металла. Распределение степени использования ресурса пластичности ψ в объеме сформированного металла изделий, полученных при гибке с разными величинами диаметра, формообразующей специальный профиль проточки на рабочей поверхности фасонного вала, окружности d в зоне наибольшего деформирования приведен на рис. 7.

состояние и степень использования ресурса пластичности в них для трех величин диаметра окружности формообразующей профиль выступа на рабочей поверхности фасонного вала.

3. Установлено отсутствие контакта боковой поверхности полученных гибкой изделий с стенками фасонного вала, что гарантирует простоту изъятия изделия из рабочей зоны трубогиба.

4. В проведенном сравнительном анализе показано увеличение эффективности процесса гибки стальных прямоугольных труб в трубогибе с уменьшением величины диаметра окружности формообразующей профиль выступа на рабочей поверхности фасонного вала.

5. Выбрана наиболее рациональная величина диаметра окружности формообразующей профиль выступа проточки специального профиля на фасонном валке $d = 10$ мм.

Список литературы

1. Мошин Е.Н. Гибка и правка на ротационных машинах. Технология и оборудование. – 2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1967. – 129 с.

2. [Электронный ресурс] URL: <http://technomash.megasklad.ru>.
 3. [Электронный ресурс] URL: <http://www.tubend.ru/theory/132>.
 4. Козлов А.В. Определение предельных натягов и усилий при гибке труб методом раскатывания / А.В. Козлов, Я.М. Хилькевич // Известия Челябинского научного центра. – 2004 г. – С. 101–106.
 5. Патент 2 397 835 РФ, МПК B21D 9/14, Способ холодной гибки труб./ Глазков А.В. №2008145769/02; заявление 18.11.2008; опубл. 27.08.2010. Бюл. №24.
- References (transliterated)**
1. Moshnin E.N. *Gibka i pravka na rotatsionnykh mashinakh. Tehnologiya i oborudovanie*. [Bending and straightening on rotary machines. Technology and equipment]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967. – 129 p.
 2. [Elektronnyiy resurs] URL: <http://technomash.megasklad.ru>.
 3. [Elektronnyiy resurs] URL: <http://www.tubend.ru/theory/132>.
 4. Kozlov A.V. *Opreделение predelnykh natyagov i usilii pri gibke trub metodom raskatyvaniya* [Determination of tightness and extreme force when bending tubes by rolling] // Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra. 2004 – P. 101–106.
 5. Patent 2 397 835 RF, MPK B21D 9/14, Sposob holodnoy gibki trub./ Glazkov A.V. №2008145769/02; zayavlenie 18.11.2008; opubl. 27.08.2010. Byul. No 24

Поступила (received) 10.11.2016.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Холодная гибка стальных прямоугольных труб в трубогибе с проточкой специального профиля на фасонном валке / В. Л. Калужный, Я. С. Олександренко, И. П. Куликов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 36–41. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671

Холодне гнуття сталевих прямокутних труб в трубогині з проточкою спеціального профілю на фасонному валку / В. Л. Калужний, Я. С. Олександренко, І. П. Куліков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 36–41. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671

Cold bending of steel rectangular pipes on pipe bender with special profile groove on the shaped roller / V.L. Kaluzhny, Ya. S. Oleksandrenko, I. P. Kulikov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 36–41. – Bibliogr.: 5 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Калужный Владимир Леонидович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», профессор кафедры Механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (098)273-44-19; e-mail: kw1_2011@ukr.net.

Калужний Володимир Леонідович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», професор кафедри Механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (098)273-44-19; e-mail: kw1_2011@ukr.net.

Kaluzhny Vladimir Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", Professor of the Department of Mechanics of the Materials Plasticity and Resource Processes; tel.: (098)273-44-19; e-mail: kw1_2011@ukr.net.

Олександренко Ярослав Сергеевич – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», аспирант кафедры Механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (050)199-61-29; e-mail: oleksandrenkoyaroslav@gmail.com.

Олександренко Ярослав Сергійович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», аспирант кафедри Механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (050)199-61-29; e-mail: oleksandrenkoyaroslav@gmail.com.

Oleksandrenko Yaroslav Sergeevich – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", aspirant of the Department of Mechanics of the Materials Plasticity and Resource Processes; tel.: (050)199-61-29; e-mail: oleksandrenkoyaroslav@gmail.com.

Куликов Иван Петрович – инженер государственного предприятия «Авиант», г. Киев; тел.: (063)658-97-81; e-mail: iv8h@mail.ru.

Куліков Іван Петрович – інженер державного підприємства «Авіант», м. Київ; тел.: (063)658-97-81; e-mail: iv8h@mail.ru.

Kulikov Ivan Petrovich – Engineer of State Enterprise "Aviant", Kyiv; tel.: (063)658-97-81; e-mail: iv8h@mail.ru.

УДК 621.983

О. В. КАЛЮЖНЫЙ, І. П. КУЛКОВ

ВПЛИВ РАДІУСА ЗАОКРУГЛЕННЯ КОНУСНОЇ МАТРИЦІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРОФІЛЯ НА ФОРМОУТВОРЕННЯ ТА РОЗМІРИ ВИРОБІВ З ГОРЛОВИНОЮ ПРИ ЗАКРИТОМУ ОБТИСКУ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВОК

З використанням метода скінченних елементів встановлений вплив радіуса заокруглення матриці на формування обтиском в конусній матриці виробів з циліндричною горловиною із трубчастих заготовок з нержавіючої сталі. Закритий обтиск проводили в традиційній конусній матриці та в матриці спеціального профіля, деформуюча поверхня якої утворена перетином торів однакового діаметра, що розташовані з відповідним кроком. Розрахунком виявлена величина кроку, яка забезпечує деформування по виступах деформуючої поверхні матриці без згинання стінок заготовки між виступами. Встановлені величини зусилля обтиску та зусилля видалення виробів із матриці. Визначені напружено-деформований стан, ступінь використання ресурсу пластичності, температура здеформованого металу та кінцеві форми та розміри виробів. Використання матриці спеціального профіля приводить до зниження зусилля обтиску і зусилля виїмання виробів із матриці. Зі збільшення величини радіуса заокруглення матриці зусилля обтиску також зменшується та підвищується точність форми і розмірів виробів. При холодному формуванні обтиском підвищується температура здеформованого металу. Встановлені величини температур дозволяють уточнити вимоги до змащення для обтиску.

Ключові слова: обтиск, виріб з горловиною, матриця спеціального профіля, радіус матриці, метод скінченних елементів, зусилля обтиску, напружено-деформований стан, форми та розміри виробів

С использованием метода конечных элементов установлено влияние радиуса скругления матрицы на формообразование обжимом в конусной матрице изделий с цилиндрической горловиной из трубчатых заготовок из нержавеющей стали. Закрытый обжим проводили в традиционной конусной матрице и в матрице специального профиля, деформирующая поверхность которой образована пересечением торов одинакового диаметра, расположенных с соответствующим шагом. Расчетом определена величина шага, которая обеспечивает деформирования по выступам деформирующей поверхности матрицы без сгибания стенок заготовки между выступами. Установлены величины усилия обжима и усилия удаления изделий из матрицы. Определены напряженно-деформированное состояние, степень использования ресурса пластичности, температура сформированного металла и конечные формы и размеры изделий. Использование матрицы специального профиля приводит к снижению усилия обжима и усилия удаления изделий из матрицы. С увеличением величины радиуса закругления матрицы усилия обжима уменьшаются и повышается точность формы и размеров изделий. При холодном формообразовании обжимом повышается температура сформированного металла. Установленные величины температуры позволяют уточнить требования к смазке для обжима.

Ключевые слова: обжим, изделие с горловиной, матрица специального профиля, радиус матрицы, метод конечных элементов, усилие обжима, напряженно-деформированное состояние, формы и размеры изделий.

There are identified influence of the radius of rounding of the matrix on forming by reducing in the conical matrix of products with cylindrical neck of tubular workpieces of stainless steel by finite element method. Closed reducing is performed in a traditional conical matrix and special profiled matrix, deforming surface is formed by the intersection of the same diameter torus located with a corresponding step. There are determined the step size, which provides a deformation on performances of the matrix's deforming surface without bending the workpiece's walls between performances. There're determined the reducing's forces, forces of removing the products from the matrix. There're identified the stress-strain state, the degree of using of the resource of plasticity, temperature of the deformed metal and the final shape and sizes of products. Using special profiled matrix reduces reducing's forces and forces of removing the products from the matrix. reducing's forces decreases and increases the accuracy of forms and sizes of products with increase of value of the radius of rounding of matrix. During cold forming by reducing increases the temperature of the deformed metal. The established values of temperatures allow to clarify the requirements for the lubricant for reducing.

Keywords: reducing, product with neck, special profiled matrix, radius of the matrix, finite element method, reducing's forces, stress-strain state, shape and sizes of the products.

Вступ. Вісесиметричні порожнисті вироби з горловиною – широко розповсюджений тип деталей, які виготовляють традиційним відкритим або закритим обтиском із трубчастих заготовок. Рекомендації по визначенню параметрів для проектування технології традиційного обтиску, які викладені в джерелах [1-4], вже не відповідають вимогам сучасного виробництва по продуктивності формування та по точності форми і розмірів виробів. В роботі [5] показано, що використання комп'ютерного моделювання за допомогою метода скінченних елементів (МСЕ) для розроблення технології традиційного обтиску в конусній матриці дозволяє встановлювати кінцеві форми та розміри виробів. Застосування закритого обтиску з прикладанням диференційованого протитиску за допомогою рідини на внутрішню поверхню трубчастої заготовки дозволяє збільшити ступінь деформації за один перехід завдяки суттєвому

зменшенню вірогідності утворення поперечних гофр на циліндричній частині заготовки та поздовжніх гофр на здеформованій частині заготовки [6,7]. В джерелах [8,9] показана ефективність використання диференційованого протитиску при формуванні виробів з горловиною. Однак, використання технології обтиску з протитиском на внутрішню поверхню заготовки потребує застосування штампового оснащення, яке складне по конструкції та має низьку продуктивність. В останній час для інтенсифікації процесів обтиску використовують конусні матриці спеціального профіля [10,11]. В таких матрицях циліндрична і конусна деформуючі поверхні утворені перетином торів з перерізом однакового діаметра. Діаметр перерізу залежить від відносної товщини S_o / D_o вихідної трубчастої заготовки (тут S_o - товщина стінки, D_o - зовнішній діаметр). В таких матрицях зменшується площа

контакту між заготовкою і матрицею та знижується вплив сил тертя при формоутворенні обтиском, що приводить до збільшення ступеня деформації за один перехід. Тому актуальними залишаються задачі вивчення формоутворенні порожнистих виробів з горловиною із трубчастих заготовок в матриці спеціального профіля, зокрема виявлення кінцевих форм та розмірів виробів. Також для проектування технології обтиску і штампового оснащення необхідно доповнити дані по зусиллю виштовхування виробів із матриці після обтиску.

Мета роботи. Метою роботи є встановлення впливу радіуса заокруглення конусної матриці спеціального профіля на формоутворення та розміри виробів з горловиною при закритому

обтиску трубчастих заготовок в матриці спеціального профіля.

DEFORM. Використана пружно-пластична зі зміцненням модель металу, що деформується. Тертя враховували по Кулону з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,08$. Швидкість деформування складала 2 мм/сек. Формоутворенню обтиском підлягали трубчасті заготовки із сталі AISI-10 (COLD) з умовною межею текучості $\sigma_{0,2} = 300$ МПа. Висота заготовок $H_0 = 80$ мм, діаметр $D_0 = 80$ мм із товщиною $S_0 = 1$ мм. Відносна товщина заготовки (S_0 / D_0) складає 0,03.

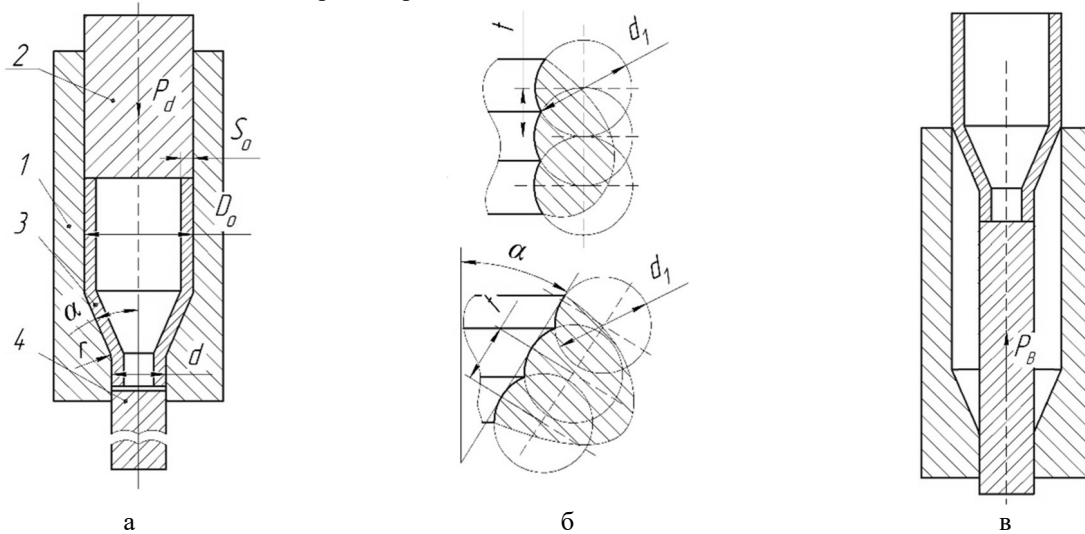


Рис. 1 – Схеми формоутворення виробу з горловиною закритим обтиском трубчастих заготовок в конусній матриці: а – схема закритого обтиску, б – форма циліндричної та конусної деформуючої поверхні матриці спеціального профіля, в – схема виштовхування виробу із матриці

Схеми отримання виробу з горловиною закритим обтиском трубчастих заготовок показані на рис. 1. На рис. 1а наведена схема закритого обтиску традиційній конусній матриці. Вихідну трубчасту заготовку встановлюють в матриці 1, яка має кут конуса α та радіус заокруглення r конусної поверхні в циліндричну поверхню. Зусилля деформування P_d прикладають за допомогою пуансона 2 та отримують виріб з горловиною 3. Видалення виробу 3 з матриці 2 виконують виштовхувачем 3. Для зниження зусилля деформування при обтиску замість традиційної конусної матриці (ТКМ) використовують матрицю спеціального профіля (МСП). В МСП циліндрична та конусна деформуючі поверхні утворені перетином торів з діаметром перерізу d_1 , що розташовані з кроком t (рис. 1б). Величини діаметра d_1 та крока t залежать від товщини заготовки S_0 [11]. На рис. 1в зображена схема видалення виробу з матриці. При цьому зусилля P_v

прикладається до торця виробу за допомогою виштовхувача.

Постановка задачі. Визначення впливу радіуса заокруглення r на формоутворення та розміри виробів з горловиною закритим обтиском трубчастих заготовок в ТКМ та МСП проведено шляхом математичного моделювання за допомогою метода скінченних елементів (МСЕ) в середовищі DEFORM. Деформуюча поверхня МСП утворена перетином торів діаметром $d_1 = 2$ мм, що розташовані з кроком $t = 2$ мм. Розміри радіусів заокруглення матриці були $r = 4, 8, 12$ та 16 мм. Кут конуса матриці $\alpha = 25^\circ$, діаметр $d = 26$ мм. Деформуюча поверхня МСП утворена перетином торів діаметром $d_1 = 2$ мм, що розташовані з кроком $t = 2$ мм.

На рис. 2 приведені розрахункові схеми в розрізі на початку обтиску, в кінці обтиску та після видалення виробу із МСП. Схема на початку обтиску зображена на рис. 2а. Формоутворення завершували при переміщенні пуансона 32 мм

(рис. 2б). Переміщення виштовхувача при видаленні виробу складає 79 мм (рис. 2в). Обтиск в матрицях з радіусами $r=4, 8$ та 12 мм приводив до викривлення циліндричних частин горловин виробів та відставання їх від поверхні матриці. На рис. 3 зображені загальні вигляди виробів в розрізі, які отримані в матрицях із радіусами $r=4$ та 16 мм.

Моделюванням встановлені залежності зусилля обтиску від переміщення пуансона,

залежності зусилля видалення заготовок із матриці від переміщення виштовхувача, кінцеві форми та розміри виробів, а також розподіли інтенсивності деформацій, ступеня використання ресурсу пластичності та температури у здеформованих частинах заготовок.

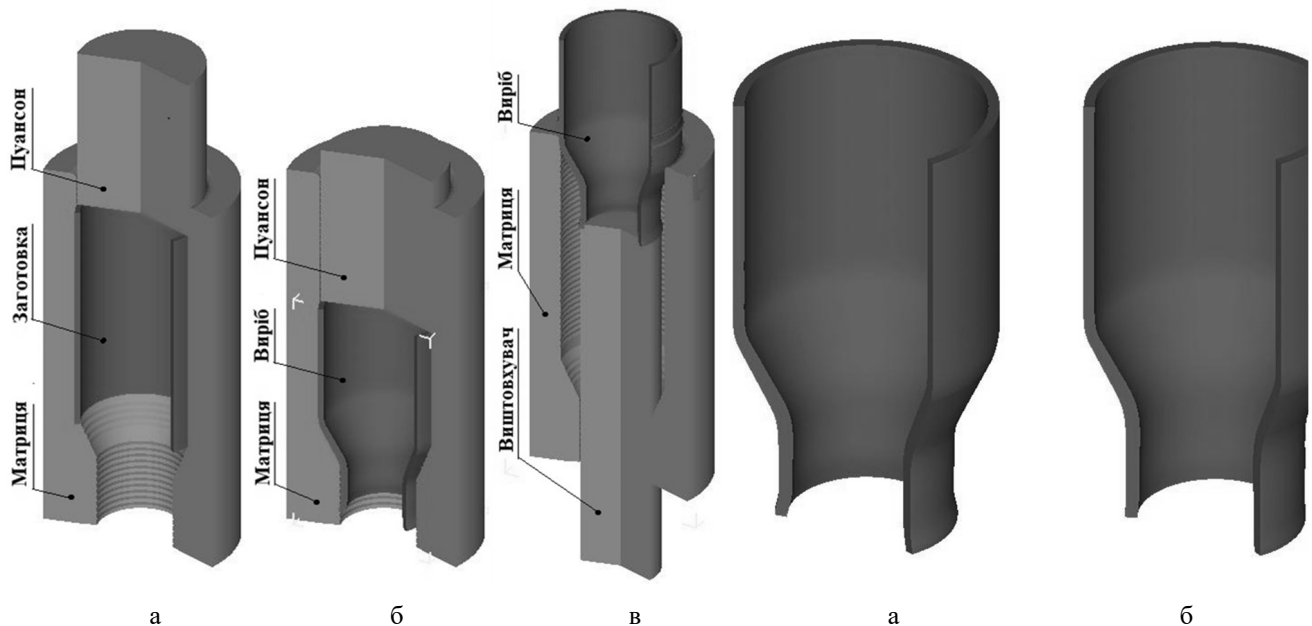


Рис. 2 – Розрахункові схеми в розрізі: а – на початку обтиску трубчастої заготовки, б – в кінці обтиску, в – в кінці видалення виробу з матриці

Рис. 3 – Загальні вигляди виробів в розрізі: а – після обтиску в матриці із $r=4$ мм, б – після обтиску в матриці із $r=16$ мм

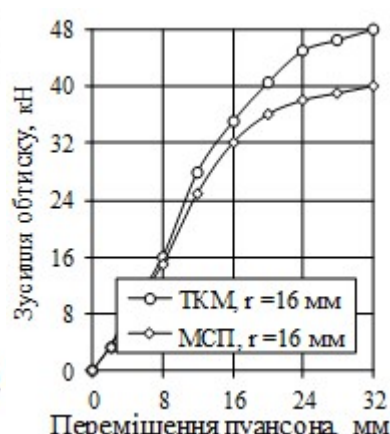
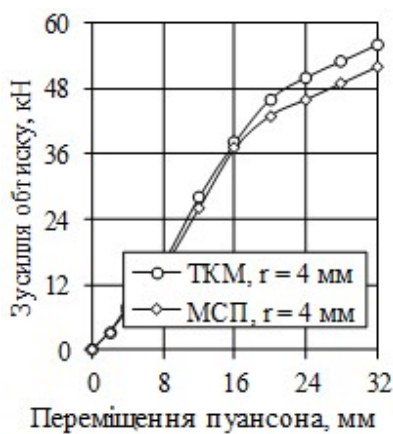


Рис. 4 – Залежності зусилля обтиску від переміщення пуансона: а – при обтиску в ТКМ і МСП із $r=4$ мм, б – при обтиску в ТКМ і МСП із $r=16$ мм

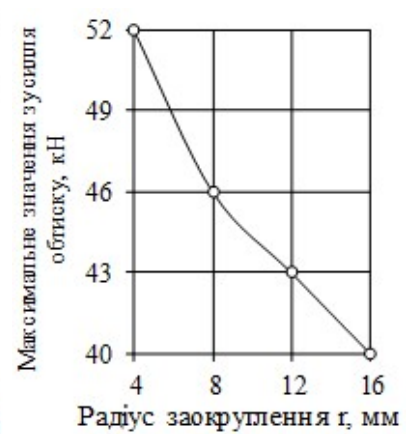


Рис. 5 – Залежність максимального значення зусилля обтиску від радіуса заокруглення матриці для обтиску в МСП

Силкові режими обтиску. Залежності зусиль обтиску від переміщення пуансонів приведені на рис. 4. На рис. 4а зображена такі залежності при обтиску в ТКМ і МСП із $r=4$ мм. В обох випадках зусилля постійно зростає і досягає максимального значення в кінці обтиску. Для обтиску в ТКМ це

значення складає 56 кН, для обтиску в МСП – 5,1 кН. Використання МСП приводить до зниження зусилля обтиску до 9 %. Збільшення величини радіуса r забезпечує більш інтенсивне зменшення зусилля обтиску при використанні МСП. Формоутворення горловин в ТКМ і МСП із

радіусом $r=16$ мм завершується при зусиллях 4,8 та 4,0 кН відповідно (рис. 4б). Зниження зусилля досягає 16,6 %. Більш інтенсивне зменшення зусилля деформування пояснюється тим, що зменшуються сили тертя на циліндричній частині при використанні МСП. Вплив радіуса заокруглення матриці на максимальне значення зусилля обтиску в МСП показаний на рис. 5. Збільшення величини радіуса r приводить до зменшення зусилля обтиску.

Для проектування штампового оснащення та призначення пресового обладнання, крім зусилля обтиску, необхідно знати зусилля видалення виробу з матриці. На рис. 6 зображені залежності зусилля видалення P_e від переміщення виштовхувача після обтиску в ТКМ та МСП із радіусом заокруглення $r = 16$ мм. Використання МСП також приводить до зменшення зусилля видалення виробу із матриці. Найбільші величини такого зусилля для ТКМ та МСП складають відповідно 2,6 та 2,2 кН. Тоді зусилля видалення P_e можна визначити по зусиллю обтиску P_d наступним чином: $P_e \approx 0,06P_d$.

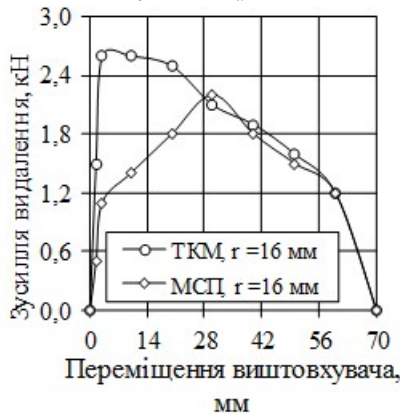


Рис. 6 – Залежність зусилля видалення виробу від переміщення виштовхувача після обтиску в ТКМ та МСП із $r=16$ мм

Форма та розміри виробів. Кінцеві форми і розміри здеформованих частин трубчастих заготовок після обтиску в матрицях з різним радіусом заокруглення r приведені на рис. 7. Тут і на наступних рисунках тонкими лініями зображена матриця. На рис. 7а показані форма і розміри після обтиску в ТКМ із $r=4$ мм. Має місце потовщення стінки конусної та циліндричної частини горловини. На радіусі заокруглення матриці товщина стінки складає 1,4 мм з подальшим зменшенням до 1,37 мм на середині циліндричної

частини і до 1,2 мм на торці виробу. При цьому циліндрична частина здеформованої заготовки відстає від матриці на 0,39 мм у верхній частині та збільшується до 0,45 мм в напрямку торця виробу, який торкається матриці. Використання МСП із $r=4$ мм приводить до практично однакових розмірів конусної частини та зменшення зазору між стінкою виробу із матрицею до 0,4 мм (рис. 7б). Обтиск в МСП із $r=8$ мм приводить до зменшення потовщення конусної та циліндричної частин здеформованої заготовки. Також зменшується відставання циліндричної частини від матриці до 0,18 мм, яке практично однакове по всій висоті (рис. 7в). Подальше збільшення радіуса до $r=12$ мм ще знижує величини потовщення стінок та відставання заготовки від матриці до величини 0,1 мм (рис. 7г). Радіус заокруглення матриці $r=16$ мм забезпечує повне прилягання циліндричної частини здеформованої заготовки до поверхні матриці, що зображено на (рис. 7д).

Напружено-деформований стан, ресурс пластичності та температура здеформованого металу. Розподіли інтенсивності деформацій ε у здеформованих частинах заготовок після обтиску в матрицях з різним радіусом заокруглення приведені на рис. 8. Розподіли та величини ε після обтиску в ТКМ і МСП із $r=4$ мм дещо відрізняються. Найбільші величини інтенсивності деформацій у стінках зосереджені на радіусах заокруглення матриць. В першому випадку (рис. 8а) у цьому місці отримано $\varepsilon = 0,59$, а в другому (рис. 8б) – $\varepsilon = 0,56$ у внутрішніх шарах металу стінки та $\varepsilon = 0,65$ у зовнішніх шарах, що пов'язано з додатковим деформуванням по виступах профільної поверхні матриці. Збільшення радіуса заокруглення МСП приводить до зміщення зони з найбільшими значеннями ε в сторону циліндричної частини заготовки, а також до зменшення величин ε у цих зонах. Після обтиску в МСП із $r=8$ мм у вказаному місці отримано $\varepsilon = 0,61$ (рис. 8в). Обтиск в у такій матриці із $r=12$ мм та $r=16$ мм забезпечує $\varepsilon = 0,52$ (рис. 8г і рис. 8д). При цьому ці величини ε розповсюджуються на всю ширину стінки та більш інтенсивніше пропрацювання структури металу пластичною деформацією спостерігається у зовнішніх шарах металу стінки циліндричної частини здеформованої заготовки (рис. 8г та 8д).

Визначений напружено-деформований стан дозволив встановити ступінь використання ресурсу

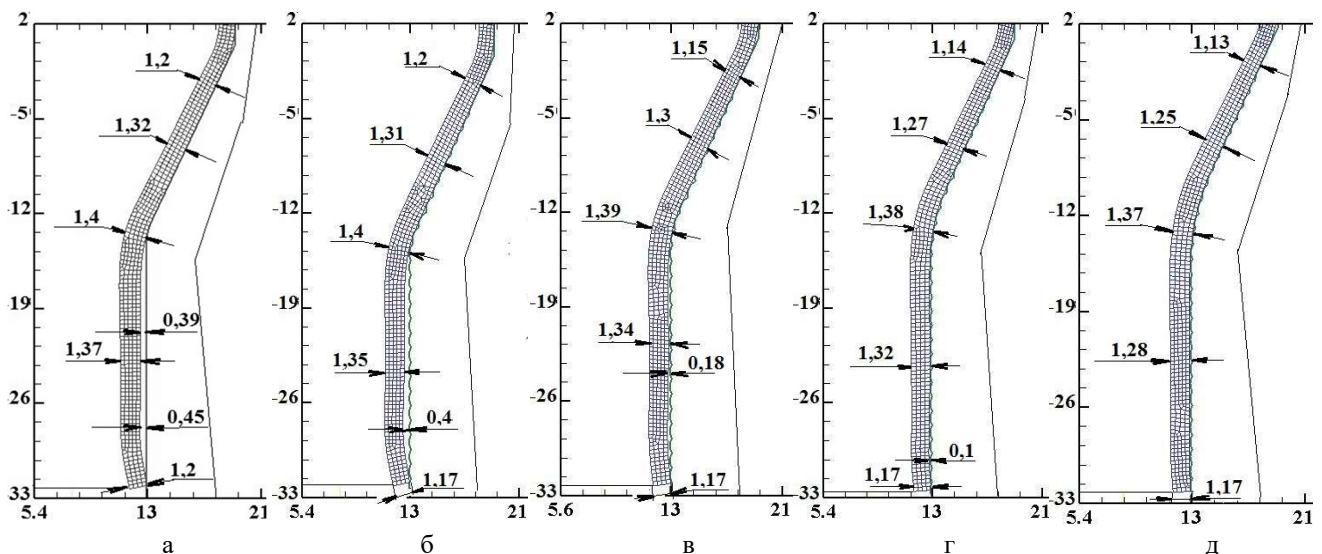


Рис. 7 – Форма та розміри в міліметрах здеформованих частин трубчастих заготовок в матрицях з різним радіусом r : а – ТКМ із $r=4$ мм, б – МСП із $r=4$ мм; в – МСП із $r=8$ мм, г – МСП із $r=12$ мм, д – МСП із $r=16$ мм

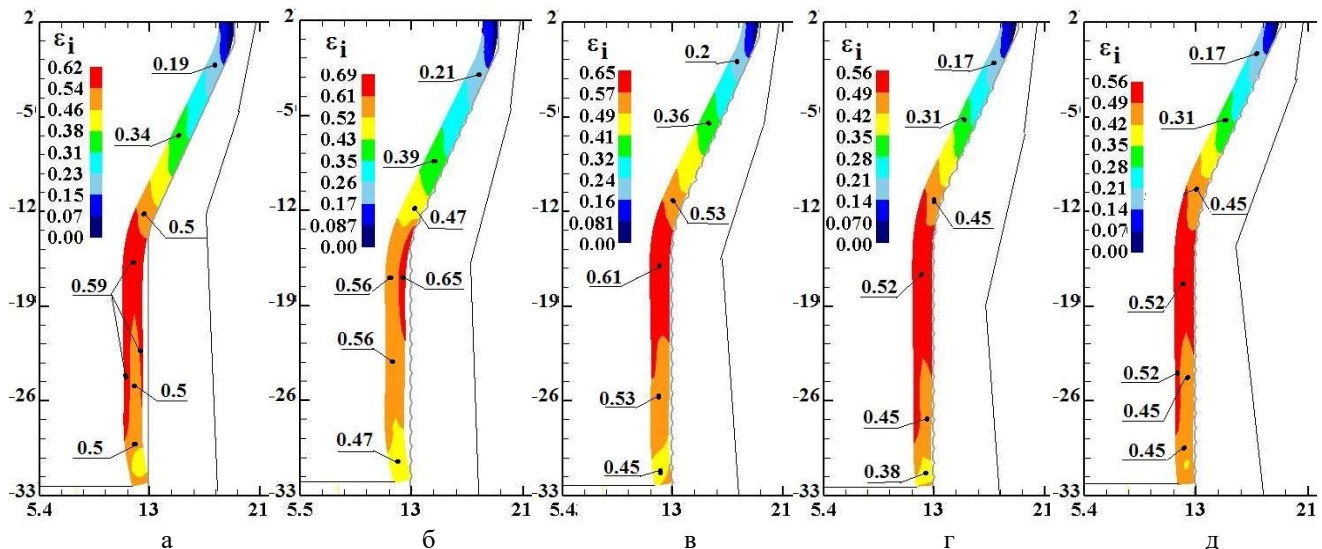


Рис. 8 – Розподіли інтенсивності деформацій ε_i у здеформованих частинах заготовок після обтиску в матрицях з різним радіусом заокруглення r : а – ТКМ із $r=4$ мм, б – МСП із $r=4$ мм; в – МСП із $r=8$ мм, г – МСП із $r=12$ мм, д – МСП із $r=16$ мм. Розміри по всіх в міліметрах

пластичності ψ здеформованого металу. Розподіли вичерпаного ресурсу у здеформованих частинах заготовок, які отримані в матрицях з різним радіусом заокруглення, зображені на рис. 9. Найбільші значення ψ зосереджені у циліндричних частинах здеформованих заготовок. Зі збільшенням величини радіуса r зменшується величина вичерпаного ресурсу, що обумовлено більш рівномірним пропрацюванням структури металу пластичною деформацією. Після обтиску в ТКМ із радіусом $r=4$ мм (рис. 9а) у зовнішніх шарах металу стінки циліндричної частини вичерпаний ресурс знаходиться в межах $\psi=0,77\div 0,78$. По середині товщини стінки отримано $\psi=0,6$. У внутрішніх шарах металу стінки цієї частини вичерпаний

ресурс досягає величини $\psi=0,44\div 0,48$, а на торці стінки – $\psi=0,67$. Використання МСП з таким радіусом r приводить до незначного зменшення величин ψ в наведених місцях циліндричної частини. Збільшення величини r приводить до подальшого зменшення значень ψ при формоутворенні в МСП (рис. 9в-д). Таким чином при даних розмірах заготовки та деформуючого інструменту ресурс пластичності здеформованого металу вичерпується на 70–78%.

При холодному формоутворенні обтиском підвищується температура здеформованого металу. На рис. 10 приведені розподіли температури у здеформованих частинах заготовок на кінцевих стадіях обтиску в ТКМ та МСП із різним радіусом

заокруглення r . На рис. 10а зображений такий розподіл при обтиску в ТКМ. У конусній області температура деформованого металу знаходиться в межах $T=31\div 41^\circ\text{C}$. У стінці на радіусі заокруглення матриці отримано $T=45\div 46^\circ\text{C}$. У циліндричній області за рахунок охолодження деформованого металу температура знижується від $T=45^\circ\text{C}$ в місці переходу циліндричної області в радіус заокруглення до $T=38^\circ\text{C}$ в зоні торця стінки. Обтиск в МСП з таким же радіусом r (рис. 10б) приводить

до виникнення дещо більшої температури деформованого металу, максимальні значення якої знаходяться в межах $T=51\div 53^\circ\text{C}$. Це підвищення пов'язано з більшими питомими зусиллями на виступах деформуючої поверхні такої матриці. Збільшення радіуса заокруглення МСП приводить до зниження температури деформованого металу завдяки зменшенню зусилля обтиску (рис. 10в-д). Встановлені величини температури дозволяють уточнити вимоги до змащення для обтиску.

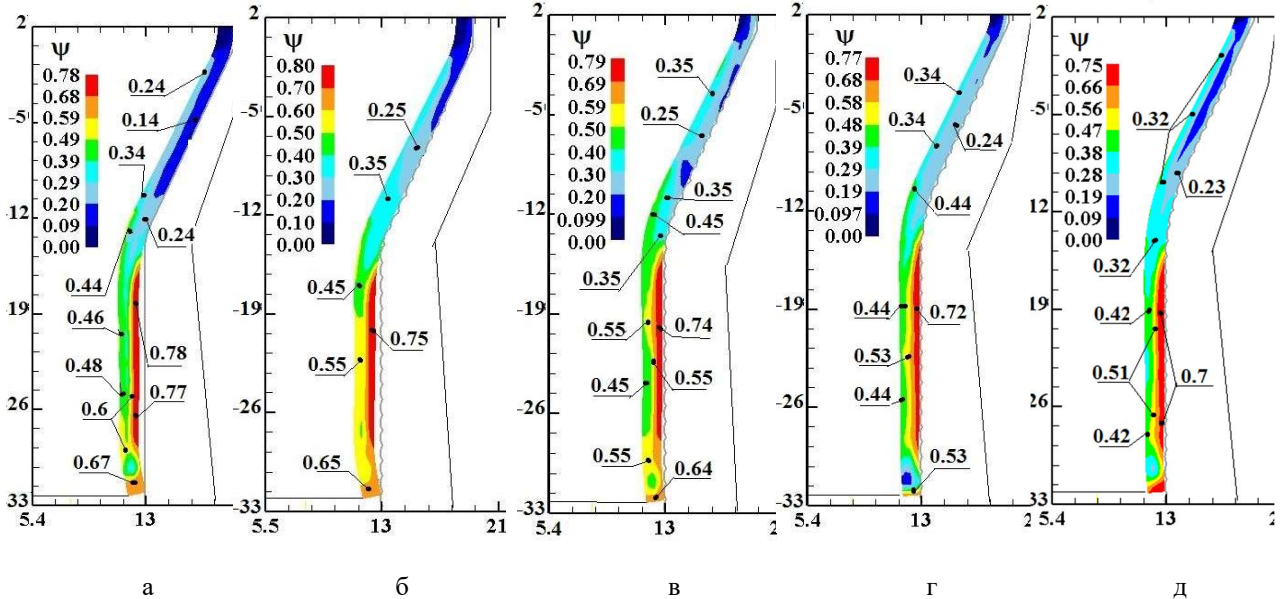


Рис. 9. Розподіли ступеня використання ресурсу пластичності Ψ у деформованих частинах заготовок після обтиску в матрицях із різним радіусом заокруглення r : а – ТКМ із $r=4$ мм, б – МСП із $r=4$ мм; в – МСП із $r=8$ мм, г – МСП із $r=12$ мм, д – МСП із $r=16$ мм. Розміри по вісях в міліметрах

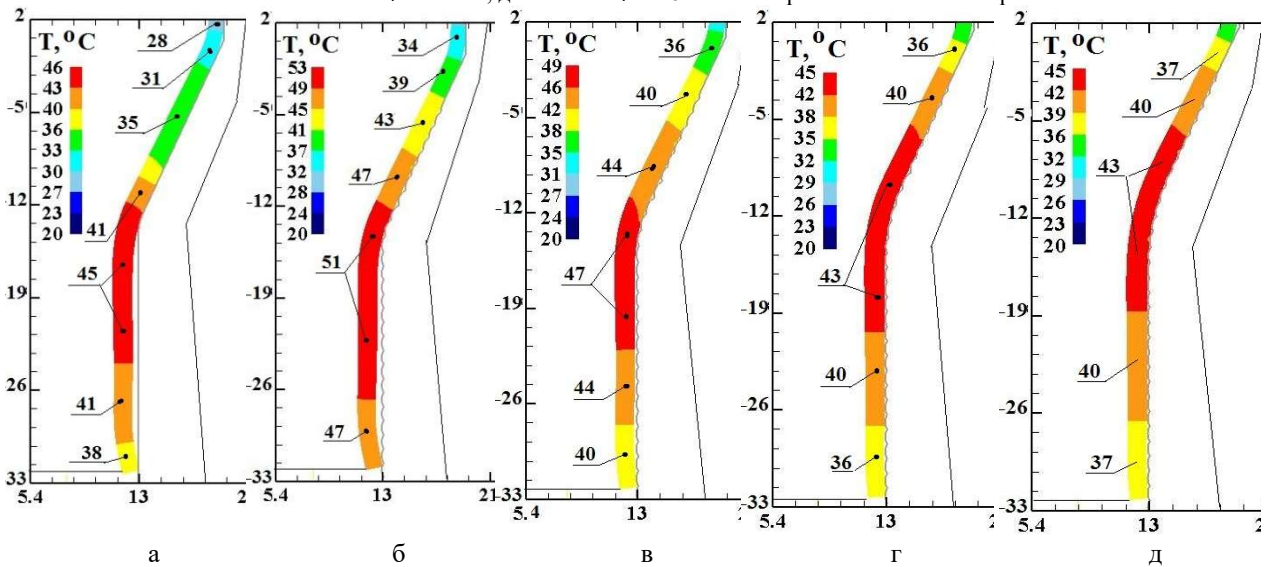


Рис. 10 – Розподіли температури T у деформованих частинах заготовок після обтиску в матрицях з різним радіусом r : а – ТКМ із $r=4$ мм, б – МСП із $r=4$ мм; в – МСП із $r=8$ мм, г – МСП із $r=12$ мм, д – МСП із $r=16$ мм. Розміри по вісях в міліметрах

Висновки:

1. З використанням метода скінченних елементів вивчено вплив радіуса заокруглення матриці на формування обтиском виробів з горловиною в конусній матриці спеціального профіля. Деформуюча поверхня таких матриць утворена перетином торів з однаковим діаметром перерізу, центри яких розташовані з однаковим кроком. Проведене порівняння результатів із обтиском в традиційній конусній матриці.

2. Встановлені залежності зусилля обтиску та зусилля виштовхування виробів із матриці. Використання матриці спеціального профіля приводить до зменшення зусилля обтиску в порівнянні із обтиском в традиційній матриці. Зростання радіуса заокруглення матриці забезпечує зменшення зусилля обтиску.

3. Визначені кінцеві форми та розміри виробів. При малих радіусах заокруглення матриці має місце викривлення циліндричної частини горловини та відставання від циліндричної поверхні матриці. Обтиск в матриці спеціального профіля підвищує точність форми виробів.

4. Встановлений напружено-деформований стан, ресурс пластичності та температура здеформованого металу.

5. Розрахунковим шляхом виявлені всі необхідні параметри для проектування технології обтиску та штампового оснащення.

Список літератури

1. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. / В. П. Романовский. — Ленингр. отд-ние: Машиностроение. 1979. — 520 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. 4. Листовая штамповка / Под ред. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. — М.: Машиностроение, 1985-1987. — 544 с.
3. Аверкиев Ю. А. Холодная штамповка / Ю. А. Аверкиев. Издательство Ростовского университета, 1984. — 288 с.
4. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев, А. Ю. Аверкиев. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
5. Калюжний О.В. Аналіз силових режимів та якості виробів при обтиску трубчатих заготовок в конусній матриці // Вісник НТУУ «КПІ», серія Машинобудування, 2011, вип. 62. — С. 63-67.
6. Калюжний О.В. Порівняльний аналіз традиційного обтиску та обтиску з диференційованим протитиском // Вісник НТУ «ХПІ», Нові рішення в сучасних технологіях, №46. 2011. — С. 27-34.
7. Калюжний В.Л. Вплив відносної товщини на формування виробів при традиційному обтиску та обтиску з диференційованим протитиском в сферичній матриці / В.Л. Калюжний, О.В. Калюжний, В.І. Стеблюк // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов, Краматорск, ДГМА, №3 (3), 2012. — С. 136-141.
8. Калюжний О.В. Аналіз обтиску горловин в сферичній матриці на трубчатих заготовках з диференційованим протитиском // Вісник НТУУ КПІ, Машинобудування, № 66, 2013, — С. 133-138.
9. Калюжний В.Л. Вплив радіуса заокруглення матриці на формування обтиском з протитиском виробів з горловиною / В.Л. Калюжний, І.В. Вихованець // Вісник НТУ «ХПІ», Нові рішення в сучасних технологіях, №47, 2012. — С. 34-39.
10. Калюжний В.Л. Інтенсифікація обтиску трубчатих заготовок в конусній матриці // В.Л. Калюжний, І.В. Вихованець, С.Ю. Чувільов // Збірник наукових праць. Серія галузеве машинобудування, будівництво. Вип. 2(41). — Полтава: НТУ, 2014. -С. 113-121.
11. Калюжний О.В. Відкритий та закритий обтиск трубчатих заготовок з різною висотою в матриці спеціального профілю / О.В. Калюжний // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов, Краматорск, ДГМА, №2 (39), 2014. — С. 144-150.

References (transliterated)

1. Romanovskiy V. P. *Spravochnik po holodnoy shtampovke*. 6-e izd., pererab. i dop. [Handbook of cold stamping]. — Leningr. otd-nie: Mashinostroenie. 1979. — 520 p.
2. *Kovka i shtampovka: Spravochnik*. Vol. 4. Listovaya shtampovka [Forging and Stamping]. — Moscow: Mashinostroenie, 1985-1987. — 544 p.
3. Averk'iev Yu. A. *Holodnaya shtampovka* [Cold pressing]. Izdatel'stvo Rostovskogo universiteta, 1984. — 288 p.
4. Averk'iev Yu. A. *Tekhnologiya holodnoy shtampovki* [The technology of cold forming]. — Moscow: Mashinostroenie, 1989. — 304 p.
5. Kalyuzhniy O.V. *Analiz silovih rezhimiv ta yakosti virobiv pri obtisku trubchatih zagotovok v konusniy matritsi* // Visnik NTUU «KPI», seriya Mashinobuduvannya, 2011, vip. 62. P. 63-67.
6. Kalyuzhniy O.V. *Porivnyalnyi analiz traditsynogo obtisku ta obtisku z diferentsiyovanim protitiskom* // Visnik NTU «HPI»: Novi rishennya v suchasniy tehnologiyah, No 46, 2011. — P. 27-34.
7. Kalyuzhniy V.L. *Vplyv vidnosnoyi tovschini na formoutvorennya virobiv pri traditsynomu obtisku ta obtisku z diferentsiyovanim protitiskom v sferichniy matritsi* / V. L. Kalyuzhniy, O. V. Kalyuzhniy, V.I. Steblyuk // Obrabotka materialov davleniem. Sbornik nauchnyih trudov, Kramatorsk, DGMA, No 3 (3), 2012. — P. 136-141.
8. Kalyuzhniy O.V. *Analiz obtisku gorlovin v sferichniy matritsi na trubchatih zagotovkah z diferentsiyovanim protitiskom* // Visnik NTUU KPI, Mashinobuduvannya, No 66, 2013. — P. 133-138.
9. Kalyuzhniy V.L. *Vplyv radiusu zaokruglennya matritsi na formoutvorennya obtiskom z protitiskom virobiv z gorlovinoyu* / V.L. Kalyuzhniy, I.V. Vihovanets // Visnik NTU «HPI»: Novi rishennya v suchasniy tehnologiyah, No 47, 2012. — P. 34-39.
10. Kalyuzhniy V.L. *Intensifikatsiya obtisku trubchatih zagotovok v konusny matritsi* // V.L. Kalyuzhniy, I.V. Vihovanets, E.Yu. Chuvilov // Zbirnik naukovih prats. Seriya galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo. Vip. 2(41). — Poltava: NTU, 2014. — P. 113-121.
11. Kalyuzhniy O.V. *Vidkriyiy ta zakriyiy obtisk trubchatih zagotovok z rlnoyu visotoyu v matritsi spetsialnogo profilyu* / O.V. Kalyuzhniy // Obrabotka materialov davleniem. Sbornik nauchnyih trudov, Kramatorsk, DGMA, No 2 (39), 2014. — P. 144-150.

Поступила (received) 03.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив радіуса заокруглення конусної матриці спеціального профіля на формоутворення та розміри виробів з горловиною при закритому обтиску трубчастих заготовок / О. В. Калюжний, І. П. Куліков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 42–49. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2519-2671

Влияние радиуса скругления конической матрицы специального профиля на формообразование и размеры изделий с горловиной при закрытом обжиме / А. В. Калюжный, И. П. Куликов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 42–49. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2519-2671

Influence of the radius of rounding of the conical special profiled matrix on the forming and size of products with the neck by the closed reducing of tubular workpieces / O. V. Kaluzhny, I. P. Kulikov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 42–49. – Bibliogr.: 11 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Калюжний Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри Динаміки та міцності машин та опору матеріалів; тел.: (067)771-88-629; e-mail: Av-k@ukr.net.

Калюжний Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», доцент кафедры Динамики и прочности машин и сопротивления материалов; тел.: (067)771-88-629; e-mail: Av-k@ukr.net.

Kaluzhny Alexandr Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Docent, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", Associate Professor of the Department of Dynamics and Strength of Machines and Resistance of Materials; tel.: (067)771-88-629; e-mail: Av-k@ukr.net.

Куліков Іван Петрович – інженер державного підприємства «Авіант», м. Київ; тел.: (063)658-97-81; e-mail: iv8h@mail.ru.

Куликов Иван Петрович – инженер государственного предприятия «Авиант», г. Киев; тел.: (063)658-97-81; e-mail: iv8h@mail.ru.

Kulikov Ivan Petrovich – Engineer of State Enterprise "Aviant", Kyiv; tel.: (063)658-97-81; e-mail: iv8h@mail.ru.

УДК 621.7.016.3.002

Е. А. КУЗЬМЕНКО, В. И. КУЗЬМЕНКО, Т. А. ХРИСТОФОРОВА

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СТОЙКОСТЬ ШТАМПОВ ХОЛОДНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Рассмотрены факторы, влияющие на эффективность внедрения процессов холодного выдавливания стальных заготовок, которая, в первую очередь, зависит от стойкости штампового инструмента. Приведены результаты исследований повышения стойкости инструмента для холодного выдавливания, выполненных в четырёх разных направлениях: совершенствование конструкции и технологии изготовления штампов; подготовка поверхности заготовок к выдавливанию; повышение комплекса свойств материала штампового инструмента термической обработкой; улучшение штампуемости материала заготовок. Результаты исследований опробованы и внедрены в производство при изготовлении тормозной втулки велосипеда.

Ключевые слова: холодное выдавливание, стойкость, штамповый инструмент, конструкция, термическая обработка, штампуемость, зернистый перлит, быстрорежущая сталь, отпуск.

Розглянуті фактори, що впливають на ефективність впровадження процесів холодного видавлювання сталевих заготовок, яка, в першу чергу, залежить від стійкості штампового інструменту. Приведені результати досліджень шляхів підвищення стійкості інструменту для холодного видавлювання, що виконані в чотирьох різних напрямках: удосконалення конструкції та технології виготовлення штампів; підготовка поверхні заготовок до видавлювання; підвищення комплексу властивостей матеріалу штампового інструменту термічною обробкою; поліпшення штампуємості матеріалу заготовок. Результати досліджень випробувані і впроваджені у виробництво при виготовленні гальмівної втулки велосипеда.

Ключові слова: холодне видавлювання, стійкість, штамповий інструмент, конструкція, термічна обробка, штампуємість, зернистий перліт, швидкорізальна сталь, відпуск.

Cold extrusion – one of the most effective low-waste manufacturing processes of steel products, the introduction of which in return for machining and hot stamping provides a significant productivity growth, increases the coefficient of metal use and the quality of the surface. There are considered the factors, which influence on the effectiveness of the introduction processes of cold extrusion of steel billets. Economic feasibility and effectiveness of the introduction primarily depends upon the resistance of stamping tool. There are the results of researches of the ways to increase durability of tools for cold extrusion, which performed in four different directions: to improve the structure and fabrication technology of stamps; surface preparation of billets for extrusion; improving complex of properties material of stamping tool using heat treatment; improvement of deformability of material of billets. There are proposed the procedure of heat treatment which increases the service life of stamping tools from high-speed steel M2. Moreover there are proposed the conditions of heat treatment for receipt of uniform structure of globular pearlite in hot – rolled and stamping with different degree steel for improvement of deformability. The results of the research tested and introduced in the manufacture on example of brake sleeve of bicycle.

Keywords: cold extrusion, resistance, stamping tools, structure, heat treatment, deformability, globular pearlite, high-speed steel, tempering.

Введение. Холодное выдавливание (ХВ) – один из наиболее эффективных малоотходных процессов изготовления стальных изделий, внедрение которого взамен обработки резанием и горячей штамповки обеспечивает существенный рост производительности труда, повышает коэффициент использования металла и качество поверхности. По сравнению с литьем и горячей штамповкой экономится до 50 % металла, по сравнению с обработкой резанием отходы в стружку уменьшаются в 2–3 раза. При ХОШ коэффициент использования материала может достигать 0,9–0,95. Точность исполнительных размеров деталей, получаемых ХВ, соответствует 8 качеству, а шероховатость поверхности не превышает 16–32 мкм.

Недостаток ХВ – высокое сопротивление деформированию из-за пониженной пластичности стали при комнатной температуре, что требует применения оборудования повышенной мощности и технологических смазок, приводит к увеличению числа штамповых переходов и снижению стойкости штамповой оснастки. Чтобы не допустить разрушения формообразующего инструмента, степени деформации за один переход рекомендуют ограничивать 40–55%.

Стойкость штампов холодного выдавливания является одним из основных показателей, влияющих на целесообразность и экономическую эффективность внедрения в производство разрабатываемых

технологий. Стойкость – это способность инструмента не разрушаться, а также сохранять первоначальные размеры и свойства, и зависит она от долговечности и износостойкости штампов. Но если долговечность определяется количеством циклов нагружения инструмента до его разрушения в случае поломки или под воздействием усталости, то износостойкость – количеством выдавленных деталей, обусловивших изменение размеров формообразующих элементов в пределах заданного допуска [1].

Постановка задачи и цель работы. Проблема повышения стойкости штампового инструмента для холодного выдавливания – задача комплексная, решение которой необходимо вести в следующих четырёх основных направлениях:

1. разработка технологии ХВ, совершенствование конструкции штампов;
2. подготовка поверхности заготовок к выдавливанию;
3. улучшение штампуемости материала заготовок;
4. повышение комплекса свойств материала инструмента термической обработкой.

Примером такого комплексного подхода могут служить результаты исследований специалистов в областях обработки металлов давлением и металловедения, работавших под руководством

проф. Евстратова В.А. (НТУ «ХПИ»), и проф. Дьяченко С.С. (ХНАДУ) над совершенствованием конструкции штампов и технологий ХВ тормозной втулки велосипедной из стали 15Х на Харьковском велосипедном заводе. Материал изложен в последовательности, отражающей историю разработок на заводе.

Цель данной работы – показать эффективность всестороннего подхода к решению проблемы повышения стойкости штампов.

1. Разработка технологии ХВ, совершенствование конструкции штампов. Основными операциями ХВ являются прямое, обратное, поперечное выдавливание и высадка или их рациональное сочетание. Рассмотрение целесообразности холодного выдавливания любой детали начинается с анализа её конструктивно-технологических параметров: формы, размеров, материала, технических требований, годовой программы выпуска. Тормозная втулка велосипеда представляет собой осесимметричную деталь с центральным ступенчатым сквозным отверстием. Годовая программа выпуска – свыше одного миллиона деталей. Все эти параметры отвечают техническим и экономическим возможностям использования холодного выдавливания.

Технология выдавливания втулки включает отрезку заготовки из калиброванного прутка и её осадку на холодновысадочном автомате, смягчающую термообработку деформированного металла, два перехода обратного выдавливания, прошивку перемычки и минимальную доработку резанием. Если при прямом выдавливании в наиболее тяжелых условиях находится матрица, то при обратном выдавливании – пуансон, и именно его стойкость определяет стойкость штампа в целом и эффективность процесса изготовления втулки [1].

При холодном выдавливании применяют штампы разных конструкций: с направляющими колонками и без них, с направлением пуансона по матрице или по съемнику, а также плунжерного исполнения. Выбор конструкции штампа во многом зависит от характеристики прессы и величины его закрытой высоты, которая обуславливает размеры плит, колонок и других деталей штампа [1–3].

Чтобы обеспечить стабильность процесса холодного выдавливания и снизить удельные рабочие нагрузки на инструмент, необходимо выбирать рациональную компоновку составляющих деталей и узлов штампа, обеспечивающую необходимую прочность и жесткость при центрировании пуансона и матрицы, а также строгую соосность и параллельность сопрягаемых элементов [1]. Это достигается точностью изготовления изделий. При нарушении соосности возникают эксцентричные нагрузки на пуансон (особенно при обратном выдавливании), что резко снижает его стойкость, а также ухудшает

качество изготавливаемых деталей, приводя к разностенности. Чем выше износостойкость инструмента, тем более точными получаются выдавленные детали.

Центрирование пуансона относительно матрицы надежнее и точнее осуществлять за счет нерабочих элементов матрицы и пуансона, что предотвращает преждевременные поломки пуансонов из-за завышенных изгибающих моментов, возникающих при эксцентричной нагрузке. Известно, что штампы с направляющими колонками обеспечивают получение деталей с разностенностью, которая не превышает 0,3 мм, в то время как при непосредственном центрировании пуансона по матрице получают детали с разностенностью не более 0,03 мм. Однако направление пуансона по матрице имеет свои недостатки, ограничивающие применение штампов. Увеличение длины пуансонов и матриц отрицательно сказывается на стойкости инструмента. Кроме того, диаметр направляющей части пуансона при эксплуатации изменяется за счет его разогрева и упругих деформаций при выдавливании, что заметно нарушает условия центровки и может привести к поломке [1].

Конструктивные параметры пуансона и матрицы должны создать наиболее благоприятную схему напряженного состояния этих тяжело нагруженных деталей. Снизить нагрузки на пуансон можно рациональным выбором формы его головки [4]. Большое влияние оказывают также величины радиусов и угла конуса зон перехода от цилиндрической части пуансона к калибрующему пояску и от калибрующего пояска к его торцевой части. Долговечность рабочих деталей штампа будет выше, а вероятность их разрушения от усталости меньше при снижении растягивающих напряжений, которые возникают при обратном ходе. Штампы необходимо конструировать таким образом, чтобы усилия извлечения пуансонов были незначительны, вставки матриц установлены с достаточным натягом, опоры пуансона и выталкивателя работали при минимальных напряжениях изгиба [3].

Операции выдавливания тормозной втулки осуществляли на прессе для холодного выдавливания К0032 в специально разработанных штампах с учетом рекомендаций [1–3]. Применили штампы жесткой конструкции с массивными нижними и верхними плитами, прочными монтажными узлами, с направляющими колонками. Это потребовало последующей механической доделки втулки.

2. Подготовка поверхности заготовок к выдавливанию. Стойкость штампов во многом зависит от качества подготовки поверхности заготовок и смазки деформирующих и деформируемых поверхностей [5, 6], которые влияют на износ инструмента, увеличивая его в несколько раз при неудовлетворительной технологии. Правильный

выбор смазочного покриття будет способствовать снижению удельной силы выдавливания. Нарушение сплошности смазочного покрытия может приводить к схватыванию материала пуансона и заготовки, вызывая поломку пуансона.

В отличие от операций горячей объёмной и листовой штамповки при ХВ стальных деталей контактные напряжения достигают предельных для материала инструмента значений 2000–2500 МПа, поэтому к их смазке предъявляются очень высокие требования. Процесс нанесения покрытия осуществляют на механизированных гальванических линиях, и он включает свыше 10 операций: очистки от окалина, обезжиривания, травления, промывок холодной и горячей водой, нанесения подсмазочного пористого слоя толщиной 10–40 мкм на основе фосфатов цинка, последующую пропитку стеаратом цинка (концентрат НБ–5) или хозяйственным мылом.

На велозаводе использовали фосфатирование и омыливание с присадкой дисульфида молибдена. В настоящее время в качестве смазки при ХВ рекомендуют использовать фосфатное покрытие на базе концентратов КФ–1 и КФ–2 [5, 6].

3. Улучшение штампуемости материала заготовок. Преимущества процесса ХОШ наиболее полно реализуются при использовании низкоуглеродистых сталей, твёрдость которых не превышает 125 НВ. В этом случае за один переход допускаются деформации до 70–85%, а нагрузки на инструмент значительно ниже 2ГПа.

При многопереходном процессе для улучшения последующей штампуемости заготовок между разными переходами проводят смягчающую термическую обработку деформированной стали. Как правило, при назначении режимов отжига не учитывают неоднородность деформированного состояния заготовок, получаемых холодной объёмной штамповкой, и наличия участков с сильно отличающимися степенями деформации. Например, в заготовке тормозной втулки велосипеда, полученной высадкой на холодновысадочных автоматах, при средней степени деформации 45% есть области, в которых локальная деформация близка к критической (около 20%), и области, в которых локальная деформация превышает 80%.

Принято считать, что оптимальной штампуемостью обладают низкоуглеродистые стали с однородной структурой зернистого перлита, когда карбиды равномерно распределены в ферритной матрице. Пластичность стали с однородной структурой зернистого перлита выше, чем у той же стали с дифференцированной структурой феррита и зёрнами зернистого перлита [7]. Нагрузки на штамповый инструмент зависят от состояния карбидной фазы даже при небольшом количестве перлита в структуре. Например, при одинаковой твердости 125 НВ кривые упрочнения стали 15Х с

однородной структурой зернистого перлита лежат ниже, чем кривые упрочнения этой стали с пластинчатыми карбидами [8].

Большинство исследований по сфероидизации карбидов выполнено на эвтектоидных и заэвтектоидных сталях со структурой пластинчатого перлита с целью улучшения их обрабатываемости резанием. В ходе низкого отжига при температурах субкритического интервала, то есть ниже точки A_{C1} , в таких сталях формируется довольно однородная структура зернистого перлита, однако выдержки при этом достигают десятков часов. С целью ускорения процессов сфероидизации карбидов для высокоуглеродистой стали применяют отжиг при температурах так называемого «интервала отжигаемости» на зернистый перлит (на 15–20 °С выше точки A_{C1}). В соответствии с диаграммой состояния Fe–C карбидная фаза в этих сталях термодинамически устойчива в межкритическом интервале температур. Благодаря сохранению в химически неоднородном аустените большого количества нерастворившихся карбидов. В ходе охлаждения из «интервала отжигаемости» с малыми скоростями или выдержке при субкритических температурах углерод выделяется на сохранившихся центрах кристаллизации и формируется структура однородного зернистого перлита.

В доэвтектоидных сталях рекристаллизационный отжиг при 700–720 °С с выдержкой до 6 часов, рекомендуемый для получения структуры зернистого перлита, не обеспечивают снижения твёрдости до требуемых значений 125 НВ по всему сечению неоднородно-деформированных заготовок, особенно в областях, деформированных со степенями менее 40 % [9]. В низкоуглеродистой стали с повышением температуры отжига до т. A_{C1} в соответствии с диаграммой Fe–C начинается растворение карбидов в аустените и «интервал отжигаемости» на зернистый перлит практически отсутствует. Поэтому на заводах применяли полный отжиг при 900 °С, что не только удлиняло продолжительность нагрева и увеличивало энергозатраты при термической обработке, усиливало окисление и обезуглероживание металла, но и приводило к формированию структуры пластинчатого перлита с сильно выраженной разнотвёрдостью ферритных зёрен.

Как показали проведенные исследования [9, 10], при определённых температурно-временных условиях нагрева можно добиться и в малоуглеродистых сталях появления своеобразного «интервала отжигаемости» на зернистый перлит. Так, в ходе медленного нагрева стали 15Х, из которой изготавливают тормозную втулку велосипеда, до температуры т. A_{C1} , равной 740 °С, со средними скоростями, не превышающими 1–2 °С/мин (нагрев садки с печи), аустенит, как правило, зарождается на границах ферритных зёрен вдали от перлитных участков, что затрудняет растворение в нем карбидов. Для того чтобы карбиды растворялись в γ -фазе, они

предварительно должны перейти из карбидов перлита в α -фазу. Благодаря повышенному количеству дефектов кристаллического строения, возникающих в ходе α - γ превращения, углерод задерживается в феррите, скапливаясь вокруг дислокаций, возникших из-за фазового наклёпа. Согласно Кану, дислокации, окруженные атмосферой атомов углерода, могут при охлаждении играть роль готовых центров кристаллизации вторичного и третичного цементита. Очевидно, этим можно объяснить появление на фоне ферритных зерен мелких карбидов, которых не было здесь до нагрева, что следует рассматривать как начало перераспределения карбидов в матрице. Малоуглеродистый аустенит даже при последующем охлаждении на воздухе распадается в верхнем интервале субкритических температур с выделением структурно-свободного феррита. После полуторачасовой выдержки при температуре t_{Ac1} можно наблюдать заметное перераспределение карбидов в ферритной матрице, причем однородность структуры зернистого перлита выше, чем после девяти часового отжига при 720°C .

Естественно, что степень однородности структур зернистого перлита в сталях с разным содержанием углерода трудно сравнимы. Говоря об однородности структуры зернистого перлита, а высокоуглеродистых сталях, в большей степени имеют в виду однородность размеров карбидов и их равномерное распределение внутри перлитных колоний, а не перераспределение карбидной фазы в объёме ферритных зерен, как в случае низкоуглеродистых сталей. Это объясняется разными путями диффузии углерода до центров кристаллизации цементита. В высокоуглеродистых сталях они соизмеримы с межпластинчатым расстоянием в исходном перлите, в низкоуглеродистых – с размером ферритных зерен, который, как правило, в десятки раз больше [10].

В ходе исследований [9] были получены неожиданные результаты о влиянии скорости нагрева до температур t_{Ac1} на продукты распада аустенита при последующем охлаждении с печью или на воздухе. При ускорении нагрева до $100^\circ\text{C}/\text{мин}$ участки аустенита зарождаются преимущественно на границах феррито-перлитных зёрен, что способствует растворению карбидов в γ -фазе и насыщению её углеродом. Это повышает устойчивость аустенита к распаду при последующем охлаждении, так как сдвигает C-образные кривые вправо. В результате фазовое превращение развивается при пониженных температурах субкритического интервала, когда атомы углерода теряют свою диффузионную подвижность и аустенит, охлаждённый на воздухе или даже с печью, распадается с образованием участков пластинчатого перлита или сорбита повышенной твёрдости (свыше 138 HB) [10].

Холодная пластическая деформация, как известно, способствует сфероидизации карбидов при

нагреве, что объясняют влиянием повышенного количества «рекристаллизационных вакансий», ускоряющих диффузию углерода. В случае деформаций на 5–10 %, приводящих к развитию при нагреве стабилизирующей полигонизации, подавляющей первичную рекристаллизацию феррита, интенсивность процессов сфероидизации практически такая же, как в горячекатаной стали.

Нагрев сильнодеформированной стали до температур субкритического интервала вызывает рекристаллизацию, интенсивную сфероидизацию и заметное перераспределение карбидов в феррите. Очевидно, дислокации, окруженные атмосферами примесных атомов углерода, перемещаясь при нагреве в места своего стока, как бы разносят углерод по матрице. После аннигиляции дефектов кристаллического строения эти участки оказываются пересыщенными углеродом, что приводит к выделению в этих местах карбидов. Кроме того, как было установлено авторами работы [11], скорость диффузии углерода намного меньше скорости перемещения рекристаллизованных границ, поэтому в местах расположения исчезнувших исходных границ сохраняется повышенная концентрация углерода, что может приводить к выделению здесь цементита. Всё это способствует перераспределению карбидов в рекристаллизованной матрице и получению после нагрева однородной структуры зернистого перлита.

Благодаря большей степени сфероидизации карбидов в деформированной стали при нагреве в субкритическом интервале температур, выше температуры t_{Ac1} их устойчивость относительно растворения в аустените больше, чем в горячекатаном металле. Так, в сталях, деформированных на 20 % и более, карбиды при медленном нагреве практически не растворяются в γ -фазе в температурном интервале $t_{Ac1}-t_{Ac1}+20^\circ\text{C}$. Это позволяет рекомендовать такой режим для производственных условий. Довольно однородная структура зернистого перлита в неоднородно деформированных заготовках, изготавливаемых методами холодной объемной штамповки, получается после трёхчасового отжига при температурах «интервала отжигаемости» [9, 10].

Режим, включающий нагрев высаженных заготовок из стали 15X с печью до температур $740-760^\circ\text{C}$ был внедрён на велозаводе и позволил вдвое сократить продолжительность отжига, повысить срок службы реторт и корзин, изготовленных из жаростойких сталей, а, главное, получить довольно однородную структуру зернистого перлита, улучшить штампуемость материала заготовок и тем самым снизить расход матриц и пуансонов холодного выдавливания на 15–25 %.

4. Совершенствование режима термической обработки материала штампа. К материалу штампов, помимо требований высокой твердости и теплостойкости, которые необходимы для режущего инструмента, предъявляется целый ряд

дополнительных требований, которые определяются конкретными условиями работы инструмента. Чтобы определить критерии качества материала штампового инструмента необходимо знать условия его эксплуатации, характер разрушающих напряжений и причину выхода инструмента из строя. Большинство пуансонов, как правило, изнашивается, однако в случае пуансонов для обратного выдавливания глубоких полостей возможно разрушение от циклических сжимающе-растягивающих напряжений или изгибающих нагрузок [12, 13]. Как известно, при прямом ходе пуансон испытывает значительные сжимающие напряжения, а при обратном – растягивающие. Некоторые рабочие детали штампов холодного деформирования (матрица, выталкиватели, опоры) выходят из строя вследствие появления усталостных трещин. То есть в каждом конкретном случае конструкционная прочность материала будет определяться либо уровнем твердости, либо пределом текучести при изгибе или растяжении, либо каким-то другим критерием.

Фрактографические исследования изломов и средней стойкости пуансонов первого и второго переходов из стали Р6М5 при двухпереходном выдавливании тормозной втулки, проводимое в течение ряда лет на Харьковском велосипедном заводе, показали следующее [12]. Долговечность пуансонов первого перехода определяется уровнем изгибающих напряжений и, в среднем, составляет 7 тыс. циклов нагружения, а пуансоны второго перехода подвергаются циклическим сжимающе-растягивающим нагрузкам и выдавливают до разрушения 20 тыс. деталей. Таким образом, для пуансонов первого перехода необходимо повышать прочность на изгиб, для пуансонов второго перехода – предел прочности на сжатие и растяжение и твердость.

Логично было предположить, что один и тот же режим стандартной термической обработки быстрорежущей стали Р6М5, который проводится в соответствии с требованиями ГОСТ 19265-73 (закалка и двукратный отпуск при 560 °С по 1 часу), не может удовлетворять различным требованиям, предъявляемым к режущему и разным видам штампового инструмента. Системные исследования влияния режимов первого отпуска на структуру и свойства стали после стандартного второго отпуска позволили выделить три стадии первого отпуска – «первичного разупрочнения», «максимального упрочнения» и «вторичного разупрочнения» и разработать следующие рекомендации для назначения режима термической обработки штампового инструмента из стали Р6М5 [13]:

1) если материал инструмента должен иметь высокие значения твердости, предела текучести при сжатии, сопротивления хрупкому разрушению и теплоустойчивости, первый отпуск закаленной

быстрорежущей стали необходимо прерывать на стадии «первичного разупрочнения»;

2) если от материала инструмента требуется высокое сопротивление изгибающим нагрузкам, то первый отпуск следует завершать на стадии «вторичного разупрочнения».

При стандартном режиме первый отпуск завершается на стадии «максимального разупрочнения», что приводит после второго отпуска к снижению прочностных свойств [13], поэтому общепринятый режим термической обработки не следует рекомендовать для штампового инструмента из стали Р6М5.

Согласно разработанному принципу выбора температурно-временных параметров первого отпуска, для пуансонов первого перехода первый отпуск необходимо завершать на стадии «вторичного разупрочнения», что повышает предел прочности при изгибе с 3000 до 3250 МПа, хотя незначительно снижает твердость и предел текучести при сжатии.

Для пуансонов второго перехода первый отпуск надо завершать на стадии «первичного разупрочнения». Это повышает твердость и предел прочности при сжатии на 1–1,5 HRC и 150 МПа соответственно по сравнению с показателями, полученными после стандартной термической обработки. Объясняется эффект упрочнения почти двукратным измельчением карбидов отпуска и их более равномерным распределением в матрице [13].

Опытные промышленные испытания показали, что после термической обработки по предложенным технологиям средняя стойкость пуансонов первого перехода составила 11 тысяч циклов нагружения, а пуансонов второго перехода – 40 тысяч циклов, что соответственно в 1,6 и 2,0 раза выше стойкости пуансонов, отпущенных по стандартной технологии. Таким образом, изменение режима первого отпуска позволило значительно повысить стойкость штампового инструмента, изготовленного из стали Р6М5.

Выводы. Рассмотрены факторы, определяющие стойкость штампового инструмента при холодном выдавливании, которые были использованы при проектировании оснастки и разработке технологий холодного выдавливания и подготовки поверхности заготовок. Приведены результаты научных исследований, опытно-промышленных испытаний и промышленного внедрения многопереходного процесса холодного выдавливания тормозной втулки велосипеда из стали 15Х на Харьковском велосипедном заводе.

Показано, что пуансоны разных переходов одного технологического процесса выдавливания, выполненные из быстрорежущей стали Р6М5, могут разрушаться от различных напряжений, поэтому необходим дифференцированный подход к выбору режимов их термической обработки. Предложен

принцип выбора температурно-временных параметров первого отпуска в зависимости от условий работы штампового инструмента из стали Р6М5. Для пуансонов, который должны иметь высокие значения твердости и предела текучести при сжатии, первый отпуск закаленной быстрорежущей стали необходимо прерывать на стадии «первичного разупрочнения». Для пуансонов, от которых требуется высокое сопротивление изгибающим нагрузкам, первый отпуск следует завершать на стадии «вторичного разупрочнения».

Разработан режим смягчающей термической обработки неоднородно-деформированных заготовок из стали 15 X, которая позволяет получить наиболее однородную структуру зернистого перлита, обладающую наилучшей штампуемостью, и включает медленный нагрев с печью до температур $t_{Ac1-t_{Ac1}} + 20^\circ C$.

В результате внедрения выполненных разработок средняя стойкость пуансонов первого перехода составила 11 тысяч циклов нагружения, а пуансонов второго перехода – 40 тысяч циклов.

Список литературы

1. Евстратов В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. / В. А. Евстратов. – Х.: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 144 с.
2. Евстратов В. А. Пути повышения стойкости пуансонов для холодного выдавливания / В. А. Евстратов, В. И. Ерёмин // Автомобильная промышленность. – 1981. – №11. – С. 30–31.
3. Холодная и полугорячая объёмная штамповка на прессах: методические рекомендации / [В. А. Головин, В. А. Евстратов, Л. И. Рудман и др.]. – М.: НИИМАШ, 1981. – 73 с.
4. Афанасьева Г. И. О видах и причинах выхода из строя пуансонов для холодного выдавливания стальных деталей / Г. И. Афанасьева, В. А. Евстратов // Кузнечно-штамповое производство. – 1974. – №4. – С. 7–10.
5. Евстратов В. А. Исследование трения при пластической деформации / В. А. Евстратов, В. И. Кузьменко // Трибология и надёжность: сб. науч. трудов 8-й междунар. конф. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2008. – С. 264–269.
6. Даниленко В. Я. Исследование трения при холодном выдавливании / В. Я. Даниленко, В. А. Евстратов, В. И. Кузьменко // Кузнечно-штамповое производство. – 2010. – №5. – С. 11–18.
7. Jonck R. Gluhen auf Best Umfor Barkeit bei der Kaltformgebung // R. Jonck // Zwf. – 1974. – bd 6, № 11. – P. 525–532.
8. Дьяченко С. С. Пути повышения качества деталей и совершенствование технологии холодной объёмной штамповкой / С. С. Дьяченко, Е. А. Кузьменко, В. И. Кузьменко // Кузнечно-штамповое производство. – 1997. – № 6. – С. 12–15.
9. Дьяченко С. С. Разработка режима смягчающего отжига неоднородно деформированных заготовок / С. С. Дьяченко, Е. А. Кузьменко, А. И. Поляничка // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1989. – № 6. – С. 6–9.
10. Кузьменко Е. А. Улучшение штампуемости доэвтектидных сталей в процессах холодного деформирования / Е. А. Кузьменко, В. И. Кузьменко // Обработка металлов давлением. – 2008. – № 1 (19). – С. 163–167.
11. Бокштейн С. З. Влияние углерода на перемещение границ зерен при рекристаллизации железа / С. З. Бокштейн, С. Т. Кишкин, Л. М. Мороз // Митом. – 1962. – № 3. – С. 8–13.
12. Разрушающие напряжения и термическая обработка пуансонов обратного выдавливания / [В. А. Евстратов, Т. А. Оприщенко, А. И. Христофоров, С. С. Дьяченко]. // Кузнечно-штамповое производство. – 1995. – № 8. – С. 21–22.
13. Роль параметров первого отпуска в повышении стойкости инструмента из стали Р6М5 / [Т. А. Оприщенко, С. С. Дьяченко, Е. А. Кузьменко и др.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – № 2. – С. 34–37.

References (transliterated)

1. Evstratov V. A. Osnovy tehnologii vyidavlivaniya i konstruirovaniya shtampov. [Extrusion technology basics and design stamps]. – Kharkov: Vischa shk. Izd-vo pri Khark. un-te, 1987. – 144 p.
2. Evstratov V. A. Puti povyisheniya stoykosti puansonov dlya holodnogo vyidavlivaniya [Ways to improve the resistance of the punches for the cold extrusion]. // Avtomobilnaya promyshlennost. – 1981. P. 30–31.
3. Holodnaya i polugoryachaya ob'Yomnaya shtampovka na pressah: metodicheskie rekomendatsii / [Cold and half-hot volume stamping on the presses]. Moscow: NIIMASH, 1981. 73 p.
4. Afanaseva G. I. O vidah i prichinah vyihoda iz stroya puansonov dlya holodnogo vyidavlivaniya stalnykh detaley / [About the types and causes of going out order of punches for the cold extrusion of steel parts] // Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. 1974. No 4. P. 7–10.
5. Evstratov V. A. Issledovanie treniya pri plasticheskoy deformatsii [Research of friction during plastic deformation] // Tribologiya i nad'Yozhnost: sb. nauch. trudov 8-y mezhdunar. konf. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gos. un-t putey soobscheniya, 2008. P. 264–269.
6. Danilenko V. Ya. Issledovanie treniya pri holodnom vyidavlivanii [Research of friction during cold extrusion]. // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. 2010. No 11. P. 11–18.
7. Jonck R. Gluhen auf Best Umfor Barkeit bei der Kaltformgebung // Zwf. – 1974. – bd 6, № 11. – S. 525–532.
8. Dyachenko S. S. Puti povyisheniya kachestva detaley i sovershenstvovanie tehnologii holodnoy ob'Yomnoy shtampovkoy / [Ways to improve the quality of parts and improving technology of cold volumetric stamping. // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1997. No 6. P. 12–15.
9. Dyachenko S. S. Razrabotka rezhima smyagchayuschego ozhiga neodnorodno deformirovannykh zagotovok [Develop regime for softening annealing of inhomogeneous deformed workpieces]. // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. – 1989. No 6. P. 6–9.
10. Kuzmenko E. A. Uluchshenie shtampuemosti doevtektoidnykh staley v protsessah holodnogo deformirovaniya [Improvement of ability to stamping of hypoeutectoid steel in processes of cold deformation] // Obrabotka metallov davleniem. 2008. No 1(19). P. 163–167.
11. Bokshteyn S. Z. Vliyanie ugleroda na peremeschenie granits zeren pri rekristallizatsii zheleza [Influence of carbon on the movement of grain boundaries in recrystallization of iron] // Mitom. – 1962. No 3. P. 8–13.
12. Razrushayushchie napryazheniya i termicheskaya obrabotka puansonov obratnogo vyidavlivaniya / [Destructive stress and heat treatment of punches for reverse extrusion]. // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. – 1995. No 8. P. 21–22.
13. Rol parametrov pervogo otpuska v povyishenii stoykosti instrumenta iz stali R6M5 / [First tempering parameter role in increasing resistance of tools from steel M2] // Novl materlali I tehnologiyi v metalurgiyi ta mashinobuduvanni. – 2011. No 2. P. 34–37.

Надійшла (received) 03.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Факторы, определяющие стойкость штампов холодного выдавливания / Е. А. Кузьменко, В. И. Кузьменко, Т. А. Христофорова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 50–56. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2519-2671

Факторы, що визначають стійкість штампов холодного видавлювання / Е. А. Кузьменко, В. І. Кузьменко, Т. А. Христофорова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 50–56. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2519-2671/

Influence of the radius of rounding of the conical special profiled matrix on the forming and size of products with the neck by the closed reducing of tubular workpieces / O. V. Kaluzhny, I. P. Kulikov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 50–56. – Bibliogr.: 13 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кузьменко Елена Алексеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Охрана труда и окружающей среды»; телефон (050)0665141; e-mail: vileta@list.ru.

Кузьменко Елена Олексіївна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Охорона праці та навколишнього середовища»; телефон (050) 0665141; e mail: vileta@list.ru.

Kuzmenko Olena – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Safety and Environment; tel.: (050)0665141; e-mail: vileta@list.ru.

Кузьменко Виктор Иванович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Обработка металлов давлением», телефон (050)541-16-22; e-mail: vileta@list.ru.

Кузьменко Віктор Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Обробка металів тиском», телефон (050) 541-16-22; e mail: vileta@list.ru

Kuzmenko Viktor – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Processing of Metals by Pressing; tel.: (050)541-16-22; e-mail: vileta@list.ru.

Христофорова Татьяна Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Общая и неорганическая химия», телефон (067)572-06-18; e-mail: t_xristoforova@mail.ru.

Христофорова Татьяна Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Загальна і неорганічна хімія», телефон (067) 572-06-18; e mail: t_xristoforova@mail.ru.

Khristoforova Tatiana – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of General and Inorganic Chemistry; tel.: (067)572-06-18; e-mail: t_xristoforova@mail.ru

УДК 621.771.01

О. П. МАКСИМЕНКО, Е. В. КУЗЬМИН**АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ В ПРОВОЛОЧНОМ БЛОКЕ СТАНА 400/200 С УЧЕТОМ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОСЫ В ВАЛКАХ**

Описаны результаты теоретического исследования для уточнения режимов обжатий и натяжений полосы, калибровки валков, кинематических и силовых параметров за счет применения методики оценки продольной устойчивости металла в валках при прокатке на непрерывных сортовых станах, в частности для высокосортного десятиклетевого проволочного блока стана 400/200 ПАО «Днепропетровский меткомбинат». Описана методика расчета продольной устойчивости металла. Приведены результаты расчетов разных случаев деформации металла. Проанализированы данные теоретического расчета режимов деформаций, геометрических, кинематических, силовых параметров и дана оценка продольной устойчивости процесса.

Ключевые слова: прокатка, анализ, деформация, катанка, продольная устойчивость, режим деформации, проволочный блок.

Описані результати теоретичного дослідження для уточнення режимів обтиснень і натягів смуги, калібровки валків, кінематичних і силових параметрів за рахунок використання методики оцінки повздовжньої стійкості металу у валках при прокатуванні на неперервних сортових станах, зокрема для високосортного десятиклетового дротового блоку стана 400/200 ПАТ «Дніпровський меткомбінат». Описана методика розрахунку повздовжньої стійкості металу. Приведені результати розрахунків різних випадків деформації металу. Проаналізовано дані теоретичного розрахунку режимів деформації, геометричних, кінематичних, силових параметрів і дано оцінку повздовжньої стійкості процесу.

Ключові слова: прокатування, аналіз, деформація, катанка, повздовжня стійкість, режим деформації, дротовий блок.

The aim of the work was to clarify raschetovrezhimov compression and tension bands kalibrovkivalkov, kinematic and power parameters in rolling on continuous section mills, particularly in the wire mill 400/200 block, set for the application of methodology for assessing the sustainability of the longitudinal metal rolls. The results of the theoretical study to clarify modes of reductions and tensions of the band, rolls calibration, kinematic and power parameters through the application of methods of assessing longitudinal stability of the metal in rolls when rolling in a continuous section mills, in the high-speed wire rod ten-stand block of 400/200 rolling mill PSJC «Dneprovsky Integrated Iron&Steel Works». The described method of calculating the longitudinal stability of the metal. The results of calculations of different cases of metal deformation. Analyzed the data of theoretical calculation of modes of deformation, geometric, kinematic, force parameters and the estimation of the longitudinal stability of the process. The performed strain analysis of metal in a wire mill 400/200 block shows that specific tension on the crate can not be significant, because stock retractors metal rolls forces is limited. The rear tension bands more significant effect on the longitudinal process stability. capture angle should be close to the coefficient of friction, especially in the first pass. With the increase in friction coefficient in rolling metal wire unit becomes more stable.

Keywords: rolling, analysis, deformation, wire rod, longitudinal stability, mode of deformation, wire block

Введение. В работах [1–3], на основе вычисления текущих внутренних продольных сил в очаге деформации и определения их

среднеинтегрального значения $Q_{cp.np}^*$, предложена методика расчета предельных условий прокатки, захватывающей способности валков и оценки продольной устойчивости полосы в контакте с рабочим инструментом. Из анализа приведенной выше литературы следует, что в условиях

прокатки, когда вектор силы $Q_{cp.np}^*$ направлен противоположно движению полосы, процесс прокатки совершается устойчиво без частичных

пробуксовок. При $Q_{cp.np}^* = 0$ прокатка ведется в предельном режиме, а в случае, когда эта сила становится положительной процесс невозможен. Согласно разработанной исследователями [2,3] методики возможен случай потери равновесия полосы в валках с последующей пробуксовкой при наличии зоны опережения. Этот взвод подтверждается экспериментально [4].

Следовательно, условие $\gamma = 0$ (γ -угол нейтрального сечения) не всегда характеризует предельные условия прокатки. Учет средней результирующей силы пластически

деформируемого металла крайне необходим при расчете геометрических, кинематических и силовых параметров при непрерывной прокатке особенно в случае, когда заднее натяжение полосы больше переднего.

Цель работы. В связи с изложенным, цель настоящей работы заключалась в уточнении расчетоврежимов обжатий и натяжений полосы, калибровкивалков, кинематических и силовых параметров при прокатке на непрерывных сортовых станах, в частности в проволочном блоке стана 400/200 ПАО «ДМКД», за сет применения методики оценки продольной устойчивости металла в валках.

Заметим, что при расчете геометрических и кинематических параметров реальной полосы сходили из закона постоянства секундных объемов металла. При определении режимов натяжения и силовых параметров использовали метод соответственной полосы [5]. Среднеинтегральное значение продольной результирующей силы определяли на основе численного решения уравнения Т. Кармана при кулоновской модели трения с применением метода последовательных приближений.

Результаты работы. Рассмотрим результаты расчета режима обжатий и других параметров при прокатке проволоки диаметром 5,5 мм из круга

© О.П. Максименко, Е.В. Кузьмин, 2016

17,3 мм, представлених в табл. 1. В ній також приведені виробничі дані по швидкості прокатки V_0 , ширини B_k і глибини вріза $h_{вр}$ калибров. Розміри реальної полоси в кожному проході ($h_0; h_1$) показані для вершин калибров.

Поясним деякі елементи процедури розрахунку на прикладі прокатки в першій клітині проволочного блоку. Впочатку задаємося обжаттям реальної полоси $\Delta h = 6,4$ мм. При цьому $h_1 = 10,9$ мм.

Таблиця 1 – Параметри деформації і продольна стійкість процесу при прокатці катанки Ø5,5 мм з коефіцієнтом трия $f_y = 0,26$

Реальні геометричні розміри металу і інші параметри															
№	h_0 , мм	h_1 , мм	Δh , мм	b_0 , мм	b_1 , мм	V_0 , м/с	V_b , м/с	V_1 , м/с	S_n	F_0 , мм ²	F_1 , мм ²	R_k , мм	B_k , мм	$h_{вр}$, мм	Зазор, мм
1	17,30	10,90	6,40	17,30	21,09	10,42	12,93	13,56	0,049	234,9	180,4	102,7	23,65	4,6	1,70
2	21,09	13,74	7,36	10,90	13,74	13,56	16,01	16,52	0,032	180,4	148,1	100,6	13,83	6,14	1,46
3	13,74	9,30	4,44	13,74	16,17	16,52	19,86	20,73	0,044	148,1	118,0	103,3	18,89	3,5	2,30
4	16,17	10,99	5,19	9,30	10,99	20,73	25,06	25,83	0,031	118,0	94,7	101,7	11,45	4,95	1,09
5	10,99	6,60	4,39	10,99	14,09	25,83	31,63	33,53	0,060	94,7	72,9	104,0	16,85	2,7	1,20
6	14,09	8,58	5,51	6,60	8,58	33,53	39,98	42,37	0,060	72,9	57,7	102,6	8,97	3,7	1,18
7	8,58	6,60	1,98	8,58	9,14	42,37	49,78	51,67	0,038	57,7	47,3	104,2	13,56	2,1	2,40
8	9,14	6,88	2,27	6,60	6,88	51,67	63,21	65,92	0,043	47,3	37,1	103,3	7,27	2,92	1,04
9	6,88	4,20	2,68	6,88	8,76	65,92	79,60	84,78	0,065	37,1	28,8	104,8	10,24	1,6	1,00
10	8,76	5,50	3,26	4,20	5,50	84,78	98,00	103,20	0,053	28,8	23,7	103,8	5,76	2,18	1,14
Геометричні розміри металу, приведені до відповідної полоси і інші параметри															
№	h_0 , мм	h_1 , мм	Δh , мм	b_0 , мм	b_1 , мм	α_y , рад	$Q_{ср.пр}^*$	$p_{ср}/2k$	γ	$R\gamma^2/h_1$	q_0	q_1			
1	15,33	9,66	5,67	15,33	18,69	0,235	-0,0156	1,1509	0,0660	0,0463	0	0,03			
2	18,69	12,17	6,52	9,66	12,17	0,255	-0,0095	1,0754	0,0626	0,0324	0,03	0,035			
3	12,17	8,24	3,93	12,17	14,33	0,195	-0,0130	1,1518	0,0589	0,0435	0,035	0,055			
4	14,33	9,73	4,60	8,24	9,73	0,213	-0,0098	1,0984	0,0572	0,0342	0,055	0,03			
5	9,73	5,85	3,89	9,73	12,48	0,193	-0,0152	1,2434	0,0585	0,0609	0,03	0,03			
6	12,48	7,60	4,88	5,85	7,60	0,218	-0,0125	1,1493	0,0650	0,0571	0,03	0,085			
7	7,60	5,85	1,75	7,60	8,10	0,130	-0,0085	1,1397	0,0467	0,0388	0,085	0,08			
8	8,10	6,09	2,01	5,85	6,09	0,139	-0,0086	1,1313	0,0504	0,0430	0,08	0,1			
9	6,09	3,72	2,37	6,09	7,76	0,150	-0,0118	1,3038	0,0488	0,0670	0,1	0,06			
10	7,76	4,87	2,89	3,72	4,87	0,167	-0,0141	1,2765	0,0513	0,0560	0,06	0			

Далі по формулі* визначаємо, знаходимо площу виходячого з валків раската: b_1

$$F_1 = \frac{\pi}{4} h_1 b_1 \quad (1)$$

і розміри $h_0; h_1; b_0; b_1; \Delta h; \alpha_y$ відповідної полоси.

Звернемо увагу, що кут α_y повинен бути близько до коефіцієнту трия f_y . Це необхідно для забезпечення більш стійкого процесу прокатки, т.к. в цих умовах сила $Q_{ср.пр}^*$ буде наближатися до максимального по абсолютній величині значенню, що випливає з графіка (рис. 1).

Але при цьому повинні виконуватися і умови захопту полоси валками в початковий момент. Розрахувавши R_k і знаючи $h_1; \alpha_y; f_y$ відповідної полоси, переходимо до чисельного розв'язку рівняння Т. Кармана і отримуємо розподіл

контактних напружень, струми сили $Q_{х пр}^*$ і її середнього значення $Q_{ср.пр}^*$, а також величину умовного опереження:

$$S' = \frac{R\gamma^2}{h_1} = 0,0463 \quad (2)$$

середнього безрозмірного трия: $\frac{p_{ср}}{2k_{ср}}$ ($2k_{ср}$ - середнє опротивлення по очагу деформації).

Ураховуючи, що в першій клітині процес відбувається з переднім натягненням полоси, яка збільшує опереження. Тому приймаємо його остаточне значення рівне $S = 0,049$, розраховуємо швидкість полоси на вході з валків V_1 і вході в очаг деформації V_0 .

После этого используем выражение:

$$S = \frac{R\gamma^2}{h_1} + \frac{\frac{q_1}{2k_{cp}} \frac{h_1}{R_k} \frac{b_1}{b_{cp}} - \frac{q_0}{2k_{cp}} \frac{h_0}{R_k} \frac{b_0}{b_{cp}}}{4 \frac{p_{cp}}{2k} f_y} \quad (3)$$

где, $\frac{q_1}{2k_{cp}}$ и $\frac{q_0}{2k_{cp}}$ - безразмерное переднее и заднее удельные натяжения.

Определяем $\frac{q_1}{2k_{cp}}$, принимая метод последовательных приближений.

$$Q_{cp,пр}^* : \frac{p_{cp}}{2k_{cp}} \gamma : \frac{q_1}{2k_{cp}}$$

Окончательные значения приведены в табл. 1 и на рис. 2.

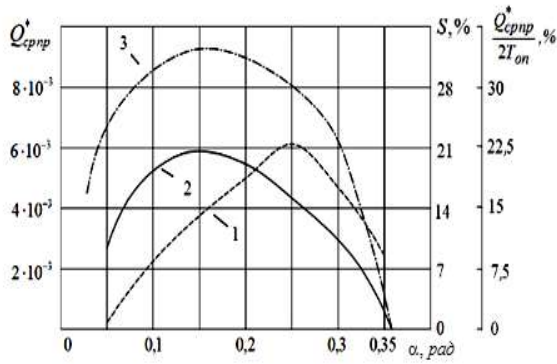


Рис. 1 – Влияние угла захвата на результирующую продольных сил

При прокатке во второй клетки начальные размеры реальной и соответственной полосы известны и скорость полосы на входе во вторую клетку:

$$V_{02} = V_{11} \quad (4)$$

Справедливость последнего выражения вытекает из закона Гука. Ввиду малых величин удельного натяжения, упругая деформация полосы в межклетевом промежутке меньше 1 мм и оказать существенное влияние на V_{02} не может.

Проанализируем данные приведенные в табл. 1. Во всех проходах среднеинтегральная

результующая $Q_{cp,пр}^*$ принимает отрицательное значение, что соответствует устойчивому процессу прокатки. Наиболее низкая продольная устойчивость полосы при прокатке в 7-й и 8-й клетях. Удельные натяжения несколько возрастают от клетки к клетке. Максимальное

значение $\frac{q_0}{2k_{cp}}$ и $\frac{q_1}{2k_{cp}}$ не превышает одной десятой. Среднее давление металла на валки колеблется в достаточно в узких пределах.

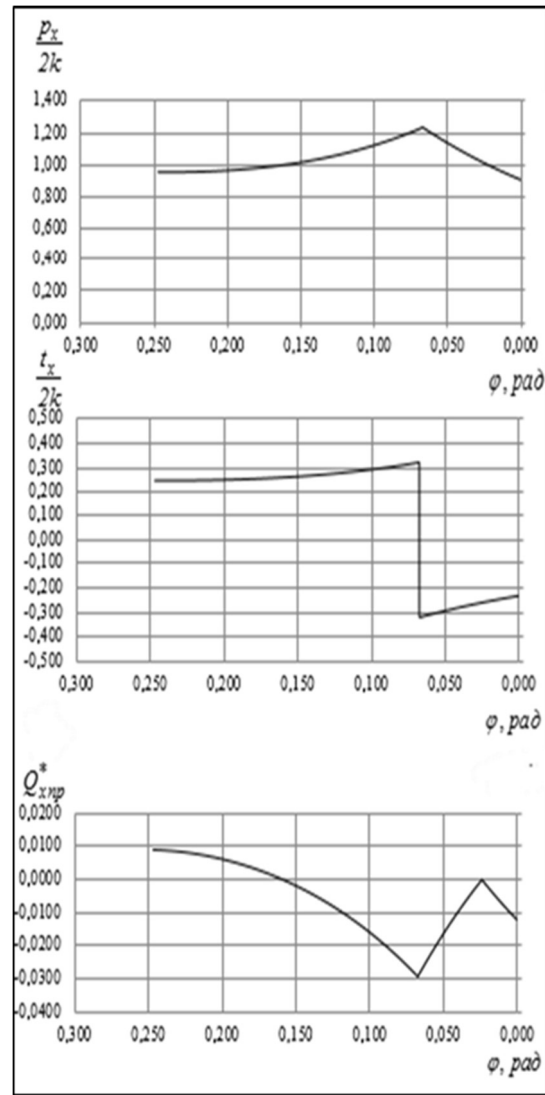


Рис. 2 – Контактные напряжения и текущая продольная сила в очаге деформации при прокатке в первой клетки проволочного блока

Несколько изменяя режим обжатий и соответственно опережение можно повысить продольную устойчивости в валках (табл. 2). Такой режим деформации является более предпочтительным по сравнению с первым. И он близок к производственным данным.

При существенном увеличении опережения в первой клетки резко увеличивается режим натяжения полосы по всем проходам (табл. 3), так заднее удельное натяжение при прокатке в 6-й

клетки составляет $\frac{q_0}{2k_{cp}} = 0,15$. Учитывая, что угол захвата в этом проходе значителен $\alpha_y = 0,238$ рад. по сравнению с предыдущим и последующими проходами, отмеченное приводит к резкому уменьшению втягивающих металл в валки сил, вызывая изменения направления действия

результующей $Q_{cp,пр}^*$, а, следовательно, к

потери равновесия полосы в очаге деформации
(при прокатке в 6-й клетке $Q_{ср.пр.}^* = +0,002$).

В случае деформации металла при
увеличенном коэффициенте трения ($f_y = 0,3$)
существенно во всех проходах увеличивается

результующая сила $Q_{ср.пр.}^*$, что подчеркивает
повышение продольной устойчивости процесса
прокатки в проволочном блоке (табл. 4). При
этом, более мягким становится режим
натяжений.

Таблица 2 – Оптимальные условия прокатки катанки при повышенной продольной устойчивости полосы в очаге деформации

Реальные геометрические размеры металла и другие параметры															
№	h_0 , мм	h_1 , мм	Δh , мм	b_0 , мм	b_1 , мм	V_0 , м/с	$V_{в.}$, м/с	V_1 , м/с	S_n	F_0 , мм ²	F_1 , мм ²	R_k , мм	B_k , мм	$h_{пр.}$, мм	Зазор, мм
1	17,30	11,00	6,30	17,30	21,05	10,47	12,93	13,53	0,047	234,9	181,8	102,6	23,65	4,6	1,80
2	21,05	13,78	7,27	11,00	13,78	13,53	16,01	16,50	0,031	181,8	149,1	100,6	13,83	6,14	1,50
3	13,78	9,10	4,68	13,78	16,60	16,50	19,86	20,75	0,045	149,1	118,6	103,3	18,89	3,5	2,10
4	16,60	10,96	5,64	9,10	10,96	20,75	25,08	26,08	0,040	118,6	94,32	101,7	11,45	4,95	1,06
5	10,96	6,52	4,44	10,96	14,32	26,08	31,63	33,56	0,061	94,32	73,30	104,0	16,85	2,7	1,12
6	14,32	8,62	5,70	6,52	8,62	33,56	40,02	42,14	0,053	73,30	58,39	102,6	8,97	3,7	1,22
7	8,62	5,50	3,12	8,62	10,77	42,14	49,87	52,91	0,061	58,39	46,49	104,4	13,56	2,1	1,30
8	10,77	6,85	3,92	5,50	6,85	52,91	63,21	66,75	0,056	46,49	36,86	103,3	7,27	2,92	1,01
9	6,85	4,36	2,49	6,85	8,49	66,75	79,60	84,62	0,063	36,86	29,07	104,7	10,24	1,6	1,16
10	8,49	5,50	3,00	4,36	5,50	84,62	98,00	103,79	0,059	29,07	23,70	103,8	5,76	2,18	1,14
Геометрические размеры металла, приведенные к соответственной полосе и другие параметры															
№	h_0 , мм	h_1 , мм	Δh , мм	b_0 , мм	b_1 , мм	α_y , рад	$Q_{ср.пр.}^*$	$p_{ср}/2k$	γ	$R\gamma^2/h_1$	q_0	q_1			
1	15,33	9,75	5,58	15,33	18,65	0,233	-0,0158	1,1517	0,0655	0,0452	0	0,025			
2	18,65	12,21	6,44	9,75	12,21	0,253	-0,0107	1,0838	0,0623	0,0320	0,025	0,025			
3	12,21	8,06	4,15	12,21	14,71	0,200	-0,0143	1,1696	0,0597	0,0457	0,025	0,025			
4	14,71	9,71	4,99	8,06	9,71	0,222	-0,0130	1,1270	0,0620	0,0402	0,025	0,03			
5	9,71	5,78	3,94	9,71	12,69	0,195	-0,0152	1,2470	0,0586	0,0618	0,03	0,03			
6	12,69	7,64	5,05	5,78	7,64	0,222	-0,0131	1,1597	0,0625	0,0525	0,03	0,05			
7	7,64	4,87	2,77	7,64	9,54	0,163	-0,0137	1,2662	0,0537	0,0619	0,05	0,05			
8	9,54	6,07	3,47	4,87	6,07	0,183	-0,0127	1,1969	0,0574	0,0561	0,05	0,06			
9	6,07	3,86	2,21	6,07	7,53	0,145	-0,0141	1,3487	0,0486	0,0642	0,06	0,02			
10	7,53	4,87	2,66	3,86	4,87	0,160	-0,0164	1,3181	0,0530	0,0598	0,02	0			

Таблица 3 – Оптимальные условия прокатки катанки при повышенной продольной устойчивости полосы в очаге деформации

Реальные геометрические размеры металла и другие параметры															
№	h_0 , мм	h_1 , мм	Δh , мм	b_0 , мм	b_1 , мм	V_0 , м/с	$V_{в.}$, м/с	V_1 , м/с	S_n	F_0 , мм ²	F_1 , мм ²	R_k , мм	B_k , мм	$h_{пр.}$, мм	Зазор, мм
1	17,30	10,80	6,50	17,30	21,13	10,42	12,93	13,67	0,057	234,9	179,2	102,7	23,65	4,6	1,60
2	21,13	13,74	7,39	10,80	13,74	13,67	16,01	16,52	0,032	179,2	148,2	100,6	13,83	6,14	1,46
3	13,74	8,60	5,14	13,74	17,45	16,52	19,87	20,79	0,046	148,2	117,8	103,4	18,89	3,5	1,60
4	17,45	10,94	6,51	8,60	10,94	20,79	25,06	26,08	0,041	117,8	93,9	101,7	11,45	4,95	1,04
5	10,94	6,32	4,62	10,94	14,76	26,08	31,63	33,44	0,057	93,9	73,2	104,0	16,85	2,7	0,92
6	14,76	8,67	6,09	6,32	8,67	33,44	39,98	41,54	0,039	73,2	58,9	102,6	8,97	3,7	1,27
7	8,67	5,10	3,57	8,67	11,60	41,54	49,92	52,71	0,056	58,9	46,4	104,5	13,56	2,1	0,90
8	11,60	6,83	4,77	5,10	6,83	52,71	63,21	66,81	0,057	46,4	36,6	103,3	7,27	2,92	0,99
9	6,83	4,19	2,64	6,83	8,87	66,81	79,60	83,90	0,054	36,6	29,2	104,8	10,24	1,6	0,99
10	8,87	5,51	3,37	4,19	5,51	83,90	98,00	102,90	0,050	29,2	23,8	103,8	5,76	2,18	1,15
Геометрические размеры металла, приведенные к соответственной полосе и другие параметры															
№	h_0 , мм	h_1 , мм	Δh , мм	b_0 , мм	b_1 , мм	α_y , рад	$Q_{ср.пр.}^*$	$p_{ср}/2k$	γ	$R\gamma^2/h_1$	q_0	q_1			
1	15,33	9,57	5,76	15,33	18,73	17,03	-0,0147	0,0693	0,0516	0,0516	0	0,065			
2	18,73	12,18	6,55	9,57	12,18	10,87	-0,0031	0,0616	0,0313	0,0313	0,065	0,08			
3	12,18	7,62	4,56	12,18	15,46	13,82	-0,0079	0,0583	0,0461	0,0461	0,08	0,1			
4	15,46	9,69	5,77	7,62	9,69	8,65	-0,0011	0,0615	0,0397	0,0397	0,1	0,135			
5	9,69	5,60	4,09	9,69	13,08	11,38	-0,0048	0,0559	0,0582	0,0582	0,135	0,15			
6	13,08	7,68	5,40	5,60	7,68	6,64	0,0020	0,0557	0,0414	0,0414	0,15	0,16			
7	7,68	4,52	3,16	7,68	10,28	8,98	-0,0059	0,0506	0,0591	0,0591	0,16	0,13			
8	10,28	6,05	4,23	4,52	6,05	5,29	-0,0042	0,0578	0,0571	0,0571	0,13	0,165			
9	6,05	3,71	2,34	6,05	7,86	6,96	0,0454	0,0454	0,0581	0,0581	0,165	0,08			
10	7,86	4,88	2,98	3,71	4,88	4,30	0,0502	0,0502	0,0536	0,0536	0,08	0			

Таблица 4 – Параметры прокатки и продольной устойчивости полосы при деформации с коэффициентом трения $f_y = 0,3$

Реальные геометрические размеры металла и другие параметры															
№	h_0 , мм	h_1 , мм	Δh , мм	b_0 , мм	b_1 , мм	V_0 , м/с	V_b , м/с	V_1 , м/с	S_n	F_0 , мм ²	F_1 , мм ²	R_k , мм	B_k , мм	$h_{вп}$, мм	Зазор, мм
1	17,30	11,00	6,30	17,30	21,05	10,47	12,93	13,53	0,047	234,9	181,8	102,6	23,65	4,6	1,80
2	21,05	13,78	7,27	11,00	13,78	13,53	16,01	16,50	0,031	181,8	149,1	100,6	13,83	6,14	1,50
3	13,78	9,10	4,68	13,78	16,60	16,50	19,86	20,75	0,045	149,1	118,6	103,3	18,89	3,5	2,10
4	16,60	10,96	5,64	9,10	10,96	20,75	25,08	26,08	0,040	118,6	94,32	101,7	11,45	4,95	1,06
5	10,96	6,52	4,44	10,96	14,32	26,08	31,63	33,56	0,061	94,32	73,30	104,0	16,85	2,7	1,12
6	14,32	8,62	5,70	6,52	8,62	33,56	40,02	42,14	0,053	73,30	58,39	102,6	8,97	3,7	1,22
7	8,62	5,50	3,12	8,62	10,77	42,14	49,87	52,91	0,061	58,39	46,49	104,4	13,56	2,1	1,30
8	10,77	6,85	3,92	5,50	6,85	52,91	63,21	66,75	0,056	46,49	36,86	103,3	7,27	2,92	1,01
9	6,85	4,36	2,49	6,85	8,49	66,75	79,60	84,62	0,063	36,86	29,07	104,7	10,24	1,6	1,16
10	8,49	5,50	3,00	4,36	5,50	84,62	98,00	103,79	0,059	29,07	23,70	103,8	5,76	2,18	1,14
Геометрические размеры металла, приведенные к соответственной полосе и другие параметры															
№	h_0 , мм	h_1 , мм	Δh , мм	b_0 , мм	b_1 , мм	α_y , рад	$Q^*_{ср.пр.}$	$p_{ср}/2k$	γ	Ry^2/h_1	q_0	q_1			
1	15,33	9,75	5,58	15,33	18,65	0,233	-0,0158	1,1517	0,0655	0,0452	0	0,025			
2	18,65	12,21	6,44	9,75	12,21	0,253	-0,0107	1,0838	0,0623	0,0320	0,025	0,025			
3	12,21	8,06	4,15	12,21	14,71	0,200	-0,0143	1,1696	0,0597	0,0457	0,025	0,025			
4	14,71	9,71	4,99	8,06	9,71	0,222	-0,0130	1,1270	0,0620	0,0402	0,025	0,03			
5	9,71	5,78	3,94	9,71	12,69	0,195	-0,0152	1,2470	0,0586	0,0618	0,03	0,03			
6	12,69	7,64	5,05	5,78	7,64	0,222	-0,0131	1,1597	0,0625	0,0525	0,03	0,05			
7	7,64	4,87	2,77	7,64	9,54	0,163	-0,0137	1,2662	0,0537	0,0619	0,05	0,05			
8	9,54	6,07	3,47	4,87	6,07	0,183	-0,0127	1,1969	0,0574	0,0561	0,05	0,06			
9	6,07	3,86	2,21	6,07	7,53	0,145	-0,0141	1,3487	0,0486	0,0642	0,06	0,02			
10	7,53	4,87	2,66	3,86	4,87	0,160	-0,0164	1,3181	0,0530	0,0598	0,02	0			

Выводы. Проведенный анализ деформации металла в проволочном блоке стана 400/200 показывает, что удельные натяжения по клетям значительными быть не могут, т.к. запас втягивающих металл в валки сил ограничен. Задние натяжения полосы более существенно влияют на продольную

устойчивость процесса. Угол захвата должен быть близок к коэффициенту трения, особенно в первых проходах. С увеличением коэффициента трения прокатка металла в проволочном блоке становится более устойчивой.

Список литературы:

1. Максименко О.П. Анализ продольной устойчивости процесса прокатки с учетом внутренних сил и режима натяжения полосы / О.П. Максименко, М.К. Измайлова, Д.И. Лобойко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – №1. – с. 59-62.
2. Максименко О.П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О.П. Максименко, Д.И. Лобойко, Р.Я. Романюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – №6. – с. 47-49.
3. Максименко О.П. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий: монография / О.П. Максименко, Д.И. Лобойко, М.К. Измайлова. – Днепропетровск: ДДТУ, 2016 – 213 с.
4. Грудев А.П. Захватывающая способность валков / А.П. Грудев. – М.: СП «Интернет Инжиниринг», 1988. – 283 с.
5. Смирнов В.С. Теория прокатки / В.С. Смирнов. – Изд. «Металлургия», 1967 – 460 с.

References (transliterated):

1. Maksimenko O.P. Analiz prodol'noyustoychivosti protsessa prokatki s uchetom vnutrennikh sil i rezhima natyazheniya polosity / O.P. Maksimenko, M.K. Izmaylova, D.I. Loboyko // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2015. – No1. – P. 59–62.
2. Maksimenko O.P. Analiz silovogo vzaimodeystviya v ochage deformatsii pri prokatke / O.P. Maksimenko, D.I. Loboyko, R.Ya. Romanyuk // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2013. – No6. – P. 47–49.
3. Maksimenko O.P. Prodol'naya ustoychivost' polosity v valkakh s analizom kontaktnykh usloviy: monografiya / O.P. Maksimenko, D.I. Loboyko, M.K. Izmaylova. Dneprodzerzhinsk: DDTU, 2016 – 213 p.
4. Grudev A.P. Zakhvatyvayushchaya sposobnost' valkov / A.P. Grudev. – M.: SP «Internet Inzhenering», 1988. – 283 p.
5. Smirnov V.S. Teoriya prokatki / V.S. Smirnov. – Izd. «Metallurgiya», 1967 – 460 p.

Надійшла (received) 17.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз режимів деформації при прокатуванні у дровому блоці стана 400/200 з урахуванням поперечної стійкості смуги у валках / О.П. Максименко, С.В. Кузьмін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 57–62. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671

Анализ режимов деформации при прокатке в проволочном блоке стана 400/200 с учетом продольной устойчивости полосы в валках / О. П. Максименко, Е. В. Кузьмин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 57–62. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2519-2671

Analysis of modes of deformation at rolling wire rod in a medium-wire mill 400/200 taking into account longitudinal stability of stripe in the windrows / O.P. Maksimenko, E.V. Kuz'min // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 57–62. – Bibliogr.: 5 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Максименко Олег Павлович – доктор технічних наук, професор, Дніпровський державний технічний університет, професор кафедри ОМТм. Кам'янське, тел.: +380976776379.

Максименко Олег Павлович – доктор технических наук, профессор, Днепропетровский государственный технический университет, профессор кафедры ОМТ, г. Камянское, тел.: +380976776379.

Maksimenko Oleg Pavlovich – Ph.D., professor, Dniprovskiy State Technical University, professor of the Department of Metal forming, Kam'yanske, tel.: +380976776379

Кузьмін Євгеній Вікторович – Дніпровський державний технічний університет, аспірант кафедри ОМТ, м. Кам'янське, тел.: +380634766711, e-mail: zhenya.kuzmin1993@gmail.com.

Кузьмин Евгений Викторович – Днепропетровский государственный технический университет, аспирант кафедры ОМД, г. Камянское, тел.: +380634766711, e-mail: zhenya.kuzmin1993@gmail.com

Kuz'min Evheniy Viktorovich – Dniprovskiy State Technical University, postgraduate student of the Department of Metal forming, Kam'yanske, tel.: +380634766711, e-mail: zhenya.kuzmin1993@gmail.com

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, И. А. РЯБЕНКОВ**УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОТВЕРСТИЯ
ДЛЯ РАЗНЫХ МЕТОДОВ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

Аналитично обґрунтовано умови зменшення шорсткості поверхні отвору при абразивній обробці, які полягають у забезпеченні одновисотного виступання зерен на робочій поверхні абразивного інструмента та збільшенні їх кількості. Це досягається застосуванням доведення вільним абразивом, а також шліфуванням кругами з приблизно одновисотним виступанням зерен над рівнем зв'язки, зміною осі обертання круга – вона повинна бути спрямована перпендикулярно осі обертання оброблюваної деталі.

Ключові слова: шорсткість поверхні, отвір, абразивна обробка, внутрішнє шліфування, глибинне шліфування, доведення вільним абразивом, різновисотне розташування абразивних зерен, абразивний круг.

Аналитически обоснованы условия уменьшения шероховатости поверхности отверстия при абразивной обработке, которые состоят в обеспечении одновысотного выступания зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и увеличении их количества. Это достигается применением доводки свободным абразивом, а также шлифованием кругами с примерно одновысотным выступанием зерен над уровнем связки, изменением оси вращения круга – она должна быть направлена перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, отверстие, абразивная обработка, внутреннее шлифование, глубинное шлифование, доводка свободным абразивом, разновысотное расположение абразивных зерен, абразивный круг.

Analytically substantiated conditions reduce the roughness of the surface of the holes at different methods of abrasion. It is found that the internal grinding, as a method of finishing high-holes does not provide a surface roughness at $R_a = 0,05$ mm, due to different height location of abrasive grains on the working surface of the wheel and a small amount of participating in the forming surfaces. The conditions for a substantial reduction of surface roughness by the use of deep grinding with a relatively low speed of rotation of the details, as well as through the creation of platforms on the tops of the grain. Calculations revealed that provision of protrusion odnovysotnogo grains on the working surface of the abrasive tool and increase in the number of grains participating in the formation of surface roughness are the basic conditions of surface roughness reduction when abraded. Run these conditions can be using free abrasive polishing and grinding abrasive wheels with approximately odnovysotnym protruding grains above the ligament, which is achieved, for example, a change in the axis of rotation of the grinding wheel – it should be directed perpendicular to the axis of rotation of the workpiece.

Keywords: surface roughness, hole, abrasive machining, internal grinding, creep feed grinding, lapping with a free abrasive, raznovysotnyh location of abrasive grains, abrasive wheel.

Введение. Применяя схему внутреннего шлифования, фактически невозможно обеспечить шероховатость поверхности на уровне $R_a = 0,05$ мкм и ниже при обработке отверстий в высокоточных деталях. Это связано с тем, что шлифовальные круги изготавливаются из достаточно крупного абразива и поэтому количество зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности, небольшое. Кроме того, зерна расположены на рабочей поверхности круга с определенной разновысотностью, что также уменьшает их количество при резании и не позволяет добиться существенного уменьшения шероховатости поверхности. В связи с этим, на практике используются методы доводки свободным абразивом. В этом случае увеличивается количество работающих зерен, что позволяет добиться высоких показателей шероховатости поверхности [1–3]. Однако производительность обработки – относительно низкая. Поэтому представляется актуальным определение условий уменьшения шероховатости поверхности на операциях шлифования.

Для уменьшения шероховатости поверхности эффективно применение также методов обработки металлов давлением (пластическим деформированием) [4]. Поэтому в работе произведен

теоретический анализ условий уменьшения шероховатости поверхностей отверстий до уровня $R_a = 0,05$ мкм и ниже для различных схем и условий абразивной обработки.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам технологического обеспечения заданной шероховатости поверхности при абразивной обработке посвящены многочисленные работы [1–3, 5], в которых приведены практические рекомендации для конкретных случаев обработки. Однако эти работы содержат в основном результаты экспериментальных исследований, которые справедливы для частных условий обработки и ограничивают возможности установления общих закономерностей формирования шероховатости поверхности, которые необходимы для правильного обоснования путей уменьшения шероховатости поверхности. Поэтому для оценки технологических возможностей различных методов абразивной обработки отверстий с точки зрения обеспечения заданной шероховатости поверхности в последние годы используются теоретико-вероятностные подходы к расчету параметров шероховатости поверхности [6, 7], которые позволяют достаточно объективно аналитически описать основные закономерности формирования шероховатости поверхности при абразивной

обработке. В настоящей работе также использован этот подход для обоснования условий уменьшения шероховатости поверхности отверстия при абразивной обработке.

Цель работы – аналитическое определение условий уменьшения шероховатости поверхности отверстия для разных методов абразивной обработки.

Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи следует воспользоваться приведенной в работе [8] зависимостью для определения параметра шероховатости поверхности R_a , справедливой для доводки абразивными зёрнами, имеющими одинаковую высоту выступания, и полученной с учетом вероятностного участия зёрен в резании:

$$R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot n}, \quad (1)$$

где B – ширина обработки, мм;
 2γ – угол при вершине конусообразного зёрна;
 n – общее количество абразивных зёрен, участвующих в процессе формирования шероховатости поверхности.

Принимая $n = k \cdot B \cdot L$, имеем:

$$R_a = \frac{0,367}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot L}, \quad (2)$$

где k – поверхностная концентрация зёрен на рабочей части абразивного инструмента, шт./мм²;

L – длина рабочей части абразивного инструмента, мм.

Используя зависимость (2), произведен расчет значений параметра шероховатости поверхности R_a для исходных данных: $k=50$ шт./мм² и $\gamma=45^\circ$ (табл. 1). Для обеспечения заданного значения параметра $R_a=0,05$ мкм необходимо реализовать значение $L>200$ мм, а это осуществимо, например, при хонинговании отверстия. Наряду с увеличением количества одновременно работающих абразивных зёрен, процесс хонингования позволяет уменьшить энергоёмкость обработки за счет периодического изменения направления движения абразивных зёрен и перерезания ими предыдущих срезов. Это существенно снижает силовую напряженность процесса резания и позволяет повысить качество и точность обрабатываемых поверхностей.

Таблица 1 – Расчетные значения параметра шероховатости поверхности R_a

L , мм	1	10	50	100	200	500
R_a , мкм	7,34	0,734	0,147	0,0734	0,0367	0,0147

При внутреннем шлифовании $n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau$, где $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; $\tau = l / V_{дем}$ – время контакта фиксированного поперечного сечения обрабатываемой поверхности с кругом, с; l – длина дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью, м; $V_{дем}$ – скорость детали, м/с. Тогда

$$n = k \cdot B \cdot l \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дем}}. \quad (3)$$

В результате зависимость (1) описывается:

$$R_a = \frac{0,367}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot l} \cdot \frac{V_{дем}}{V_{кр}}. \quad (4)$$

При внутреннем шлифовании параметр l определяется зависимостью [9]:

$$l = \sqrt{\frac{2 \cdot t}{\left(\frac{1}{R_{кр}} - \frac{1}{R_{дем}}\right)}}, \quad (5)$$

где t – глубина шлифования, м;

$R_{кр}$, $R_{дем}$ – радиусы круга и обрабатываемого отверстия детали, м.

Из табл. 2 следует, что параметр l при внутреннем шлифовании принимает весьма малые значения, например по сравнению с процессом хонингования, где параметр l принимает значения, равные или близкие к длине окружности обрабатываемого отверстия. Параметр l при внутреннем шлифовании также значительно меньше, чем при плоском шлифовании и, в особенности, при шлифовании торцом круга. По данным работы [1] при плоском шлифовании торцом алмазного чашечного круга детали, напыленной сплавом СНГН, параметр шероховатости поверхности R_a принимает небольшие значения, близкие к 0,02 мкм. Очевидно, добиться такой шероховатости поверхности при внутреннем шлифовании весьма сложно. Экспериментально установлено, что чем выше твердость обрабатываемого материала, тем меньше может быть параметр шероховатости поверхности R_a вследствие уменьшения глубины внедрения режущих зёрен в обрабатываемый материал. Этому также способствует увеличение площадок износа на режущих зёрнах, что, собственно, и предопределило достижение небольших значений $R_a=0,02$ мкм при шлифовании торцом алмазного чашечного круга детали, напыленной сплавом СНГН высокой твердости.

Таблиця 2 – Расчетные значения параметра l для $t=0,01$ мм; $R_{дет}=40$ мкм

$R_{кр}$, мм	20	30	36	39
l , мм	0,894	1,552	2,683	5,585

Вместе с тем, параметр шероховатости поверхности R_a при внутреннем шлифовании, исходя из зависимости (4), зависит от отношения скоростей детали $V_{дет}$ и круга $V_{кр}$, которое принимает небольшое значение, например, при $V_{дет}=30$ м/мин и $V_{кр}=30$ м/с равно $V_{дет}/V_{кр}=0,017$. Тогда с учетом значения $l=1,552$ мм (для $R_{кр}=30$ мм), приведенного в табл. 2, и $k=50$ шт./мм²; $\gamma=45^\circ$ параметр шероховатости поверхности $R_a=0,08$ мкм. Для $R_{кр}=36$ мм и соответственно $l=2,683$ мм параметр $R_a=0,047$ мкм, т.е. в этом случае фактически достигается требуемое значение $R_a=0,05$ мкм. Однако, в отличие от процесса доводки абразивными зёрнами, которые имеют примерно одинаковую высоту выступания, при шлифовании на рабочей поверхности круга абразивные зёрна выступают на разную высоту, что приводит к образованию срезов разной толщины и к увеличению шероховатости поверхности в 2 – 3 и более раз.

Очевидно, добиться требуемой шероховатости поверхности $R_a=0,05$ мкм в этих условиях чрезвычайно сложно. Исходя из зависимостей (4) и (5) уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a можно лишь за счет существенного уменьшения скорости детали $V_{дет}$ и увеличения глубины шлифования t . Это достигается в условиях глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали, например равной $V_{дет}=0,5 - 5$ м/мин и глубиной шлифования $t=0,1 - 1$ мм. О возможности достижения такой шероховатости поверхности при глубинном шлифовании сказано в работе [5]. Однако при этом процесс шлифования протекает достаточно нестабильно, с высокой силовой напряженностью, имеет место интенсивное трение круга с обрабатываемым материалом. По сути, этот процесс можно отнести к высокопроизводительному шлифованию, осуществляемому со съемом значительных припусков, что не свойственно для методов финишной абразивной обработки. Поэтому глубинное шлифование нельзя рассматривать эффективным методом финишной обработки, обеспечивающим высокие показатели шероховатости поверхности. Важным условием уменьшения параметра шероховатости поверхности

R_a является создание площадок на вершинах абразивных зёрен. В работе [8] приведена аналитическая зависимость для определения параметра R_a с учетом образования на вершинах зёрен площадок длиной x :

$$R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot n} \cdot e^{-\frac{x \cdot n}{B}}. \quad (6)$$

Зависимость (6) отличается от аналогичной зависимости (1) множителем $e^{-\frac{x \cdot n}{B}} < 1$. Очевидно, чем больше параметры x и n , тем меньше R_a . Причем, с увеличением количества зёрен n на рабочей поверхности инструмента множитель $e^{-\frac{x \cdot n}{B}}$ уменьшается в значительно большее количество раз, чем множитель $\frac{0,367 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot n}$, входящий в зависимость (6). Это указывает на возможность существенного уменьшения параметра R_a .

Подтверждением сказанному являются результаты численных расчетов по преобразованной зависимости (6), полученной с учетом выражения $n = k \cdot B \cdot L$:

$$R_a = \frac{0,367}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot l} \cdot e^{-x \cdot k \cdot l}. \quad (7)$$

Для исходных данных: $k=50$ шт./мм²; $\gamma=45^\circ$; $x=0,01$ мм при $L=1$ мм множитель $e^{-x \cdot k \cdot l}=0,6$, а параметр $R_a=4,4$ мкм. Соответственно при $L=10$ мм множитель $e^{-x \cdot k \cdot l}=0,067$, а параметр $R_a=0,005$ мкм. Этим показано, что за счет создания на вершинах зёрен площадок длиной $x=0,01$ мм можно стабильно обеспечить требуемое значение параметра шероховатости поверхности $R_a=0,05$ мкм.

Между тем, данное условие выполняется, если все зёрна имеют на вершинах одинаковые площадки износа, т.к. при наличии отдельных зёрен, выступающих на большую высоту, на обрабатываемой поверхности появятся отдельные “риски-царапины”, что приведет к увеличению параметра R_a . Поэтому важным условием обеспечения высоких показателей шероховатости поверхности следует рассматривать уменьшение или даже исключение разновысотного выступания абразивных зёрен, что характерно для традиционных абразивных кругов. Процесс обработки свободным абразивом в этом плане в меньшей мере подвержен влиянию разновысотного расположения абразивных зёрен на рабочей поверхности инструмента, что способствует достижению меньших значений параметра шероховатости поверхности R_a и

возможности его эффективного применения на финишных операциях обработки. Исходя из этого, важным решением задачи достижения шероховатости поверхности $R_a=0,05$ мкм при внутреннем шлифовании следует рассматривать создание на рабочей поверхности круга примерно одновысотного расположения абразивных зерен, например путем наклеивания на рабочую поверхность круга абразивного порошка. Это позволит реализовать приведенные выше расчетные значения $R_{кр}=36$ мм; $l=2,683$ мм; $V_{дем}/V_{кр}=0,017$ и соответственно параметр шероховатости поверхности $R_a=0,05$ мкм. Можно также применять шлифовальные круги с наклеенным на рабочую поверхность мелкозернистым абразивным полотном, характеризующимся одновысотным расположением зерен на рабочей поверхности.

Существенным фактором уменьшения шероховатости поверхности при обработке свободным абразивом (в отличие от обработки связанным абразивом) является применение мелкозернистого абразива в связи с отсутствием необходимости жесткого закрепления зерен в связке инструмента. Для того чтобы оценить влияние зернистости алмазного круга на параметр шероховатости поверхности R_a , необходимо выразить поверхностную концентрацию зерен известной зависимостью [3]:

$$k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}, \quad (8)$$

где m – объемная концентрация зерен круга (например, для 100%-й концентрации алмазного круга – $m=100$);

\bar{X} – зернистость круга, м;

$(1 - \varepsilon)$ – безразмерная величина, определяющая степень выступания режущих зерен над уровнем связки круга, изменяется в пределах 0...0,5.

Тогда зависимость (2) примет вид:

$$R_a = \frac{24,47 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}{\text{tg} \gamma \cdot m \cdot (1 - \varepsilon) \cdot L}. \quad (9)$$

Как следует из зависимости (9), с уменьшением зернистости круга \bar{X} параметр шероховатости поверхности R_a уменьшается по квадратичной зависимости, т.е. чрезвычайно интенсивно. Однако, зернистость круга можно уменьшать до определенной величины, например, $\bar{X}=0,02$ мм в связи с ограниченной возможностью жесткого закрепления зерен в связке круга. Поэтому обработку, например зернами размером 1/0, можно производить исключительно лишь методом доводки свободным абразивом, что и предопределяет возможность существенного уменьшения

шероховатости поверхности при обработке свободным абразивом.

Промежуточным решением может быть применение шлифовальных кругов, изготовленных методом электрогальванического нанесения алмазного или абразивного порошка на его рабочую поверхность. В этом случае фактически исключается разновысотное расположение зерен на рабочей поверхности инструмента и появляется возможность использования мелкозернистого абразива, например зернистостью 5/3 и менее. По сути, в этом случае реализуется метод обработки свободным абразивом с обеспечением высоких показателей шероховатости поверхности.

Дополнительным условием обеспечения заданной шероховатости поверхности при внутреннем шлифовании следует также рассматривать расположение оси вращения шлифовального круга перпендикулярно направлению вращения обрабатываемой детали. Это позволит существенно увеличить длину дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью l , которая при обычном внутреннем шлифовании, исходя из табл. 2, принимает весьма небольшие значения, изменяющиеся в пределах 5 мм. Согласно предложенному решению, длина дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью l может достигать половины длины окружности обрабатываемого отверстия, т.е. $l = 0,5 \cdot \pi \cdot R_{дем}$. Очевидно, в этом случае будет гарантированно обеспечиваться требуемое значение параметра шероховатости поверхности $R_a=0,05$ мкм.

Выводы. Аналитически обоснованы условия уменьшения шероховатости поверхности отверстия при различных методах абразивной обработки. Установлено, что внутреннее шлифование, являясь высокопроизводительным методом финишной обработки отверстий, не обеспечивает шероховатость поверхности на уровне $R_a=0,05$ мкм, в связи с разновысотным расположением абразивных зерен на рабочей поверхности круга и их небольшим количеством, участвующим в формообразовании поверхностей. Определены условия существенного уменьшения шероховатости поверхности за счет применения глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью вращения детали, а также за счет создания площадок на вершинах зерен. Расчетами установлено, что обеспечение одновысотного выступания зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и увеличение количества зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности, являются основными условиями уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке. Выполнить эти условия можно применением доводки свободным абразивом, а также шлифованием абразивными кругами с

примерно одновысотным выступанием зерен над уровнем связки, что достигается, например, изменением оси вращения шлифовального круга – она должна быть направлена перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали.

Список литературы:

1. Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э. В. Рыжов. – К.: Наукова думка, 1984. – 272 с.
2. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э. В. Рыжов, А. А. Сагарда, В. Б. Ильицкий, И. Х. Чеповецкий. – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с.
3. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.
4. Линчевский П. А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / П. А. Линчевский, Т. Г. Джугурян, А. А. Оргян. – К.: Техника, 2001. – 300 с.
5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов". – 802 с.
6. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с.
7. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
8. Нежебовский В. В. Технологическое обеспечение качества обработки зубчатых колес приводов шахтных конвейеров на операциях зубошлифования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В. В. Нежебовский. – Одесса: ОНПУ, 2011. – 249 с.
9. Новиков Ф. В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.03.01 "Процессы

механической обработки, станки и инструменты" / Ф. В. Новиков. – Одесса: ОГПИУ, 1995. – 36 с.

References (transliterated)

1. Ryzhov E. V. Tekhnologicheskie metody povysheniya iznosostojkosti detaley mashin [Technological methods of improving the wear resistance of machine parts]. – Kiev: Naukova dumka, 1984. – 272 p.
2. Kathestvo poverkhnosti prialmazno-abrazivnoy obrabotke E [The quality of the surface at the diamond-abrasive machining]. – Kiev.: Nauk. dumka, 1979. – 244 p.
3. Almazno-abrazivnaya obrabotka materialov: [Diamond abrasive processing of materials: a guide]. – Moscow.: Mashinostroenie, 1977. – 390 p.
4. Linchevskiy P. A. Obrabotka detaley na otdelothno-rastochnykh stanakh [Processing of parts on boring machine]. – Kiev: Tekhnika, 2001. – 300 p.
5. Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya [Physical and mathematical theory of processing materials and manufacturing engineering]. – Odessa: ONPU, 2002. – Vol. 4. "Teoriya abrazivnoy ialmazno-abrazivnoy obrabotki materialov". – 802 p.
6. Korolev A. V. Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke [Study of education tool surfaces and components with abrasion]. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. – 212 p.
7. Novoselov Yu. K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke [Trends shaping surfaces when sanding]. – Saratov, 1979. – 232 p.
8. Nezhebovskiy V. V. Tekhnologichne zabezpehennya yakosti obrobky zubhastyykh kolic privodiv shakhtnykh konveeriv na operatsiyakh zuboshlifuvannya: dis. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 / V. V. Nezhebovskiy. – Odesa: ONPU, 2011. – 249 p.
9. Novikov F. V. Fizicheskie i kinematicheskie osnovy vysokoproizvoditelnogoalmaznogo shlifuvannya: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk: spets. 05.03.01 "Protsesty mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty" / F. V. Novikov. – Odessa: OGPIU, 1995. – 36 p.

Поступила (received) 05.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Умови зменшення шорсткості поверхні отвору при різних методах абразивної обробки / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 63–68. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2519-2671

Условия уменьшения шероховатости поверхности отверстия при разных методах абразивной обработки / Ф. В. Новіков, И. А. Рябенков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 63–68. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2519-2671

Terms reduce the roughness of the surface of the holes at different methods of abrasion / F. V. Novikov, I. A. Ryabekov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 63–68. – Bibliogr.: 9 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

Novikov Fedor Vasiliviyth – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel .: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

Рябенков Ігор Олександрович – кандидат технічних наук, старший викладач Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, м. Харків; тел.: +38-0676265765; e-mail: rigor0212@gmail.com .

Рябенков Игорь Александрович – кандидат технических наук, старший преподаватель Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко, г. Харьков; тел.: +38-0676265765; e-mail: rigor0212@gmail.com

Ryabenkov Igor Aleksandrovith – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Lecturer of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Peter Vasilenko, Kharkiv; tel.: +38-0676265765; e-mail: rigor0212@gmail.com

УДК 621.7

В. А. ЧУБЕНКО, А. А. ХІНОЦЬКА, В. ЧУБЕНКО**ЗОВНІШНЯ ПОВЕРХНЯ ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ВАЛКОВІЙ РОЗЛИВЦІ-ПРОКАТЦІ
ТОНКИХ ЛИСТІВ**

Розвиток металургійної промисловості постійно ставить істотні вимоги щодо якості виробів, продуктивності машин і агрегатів, зменшення витрат матеріалів і енергетичних ресурсів. Задовольнити ці потреби можна при використанні процесу валкового лиття-прокатки. Такі способи дозволяють зменшити собівартість прокатного виробництва. Для освоєння технології розливання сталі досліджені зміни відбуваються з металом, який знаходиться в міжвалкового просторі. Проаналізовано процес утворення осередку деформації при валковій розливці-прокатці тонких листів, що впливає на якість виробів, енергосилові параметри та продуктивність процесу. Визначено його коефіцієнти та параметри в умовах лиття-прокатування. Запропоновано методику визначення площі зовнішньої поверхні осередку деформації при м'якому обтисненні в ливарно-прокатних клітках. Досліджено вплив кінцевої товщини смуги та величини обтиснення на розмір площі зовнішньої поверхні осередку деформації.

Ключові слова: осередок деформації, обтиснення, товщина смуги, площа зовнішньої поверхні осередку, валкова розливка-прокатування, довжина дуги захоплення

Развитие металлургической промышленности постоянно ставит существенные требования по качеству изделий, производительности машин и агрегатов, уменьшению расхода материалов и энергетических ресурсов. Удовлетворить эти потребности можно при использовании процесса валкового литья-прокатки. Такие способы позволяют уменьшить себестоимость прокатного производства. Для освоения технологии разлива стали исследованы изменения происходящие с металлом, который находится в межвалкового пространстве. Выполнен анализ процесса образования очага деформации при валковой разливке-прокатке тонких листов, что влияет на качество изделий, энергосиловые параметры и производительность процесса. Определены его коэффициенты и параметры в условиях литья-прокатки. Предложена методика определения площади внешней поверхности очага деформации при мягком обжатии в литейно-прокатных клетях. Исследовано влияние конечной толщины полосы и величины обжатия на размер площади внешней поверхности очага деформации.

Ключевые слова: очаг деформации, обжатие, толщина полосы, площадь внешней поверхности очага, валковая разливка-прокатка, длина дуги захвата.

The development of the steel industry is constantly puts significant demands on product quality, performance, machines and units, a decrease in the consumption of materials and energy resources. To satisfy these needs, you can process using a roll casting-rolling. Such methods can reduce the cost of rolling mills. For the development of casting technologies we have been investigated changes occurring metal, which is in the roll area. The process of formation of Hearth of deformation is analysed at Rolling teem-rolling thin folias, that influences on quality of wares, Expenses of energy and productivity of process. His coefficients and parameters in the conditions of casting-rolling, that appear in By a re ntal roller, are certain. The sizes of Wrining out, corner of fascination, length of arc of contact of stripe, are found with an instrument. A new formula is offered and investigational for determination of area of external surface of cell of deformation at soft Wrining out in casting-renal cages. Influence of eventual thickness of stripe and size of Wrining out is certain on the size of area of external surface of cell of deformation, where it is educed that at the increase of thickness of stripe the area of external surface increases, and at the increase of size of Wrining out – diminishes because обтиснення has less influence on the area of external surface than her.

Keywords: cell of деформации, thickness of stripe, area of external surface of cell, Wrining out, roll casting-rolling, the length of the arc of capture.

Вступ. Розвиток металургійної промисловості постійно ставить суттєві вимоги з якості виробів, продуктивності машин та агрегатів, зменшення витрат матеріалів та енергетичних ресурсів. Задовольнити ці потреби можна при використанні процесу валкового лиття-прокатування. Такі способи дозволяють зменшити собівартість прокатного виробництва. Для освоєння технології валкової розливки сталі потрібно дослідити зміни що відбуваються з металом, який знаходиться у міжвалковому просторі. Тому подальше дослідження процесів, що відбуваються в осередку деформації при "м'якому" обтисненні у ливарно – прокатних клітках з метою їх удосконалення є задача актуальна.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останнім часом розвиток металургійної промисловості відбувається за рахунок впровадження агрегатів прямого розливання рідкої

сталі у тонкі листи. Така технологічна схема дозволяє зменшити собівартість виробництва за рахунок виключення операцій гарячого прокатування і відповідним скороченням устаткування для його здійснення, а також знизити енерго- та трудовитрати та підвищити якість виробів [1, 2, 3, 4, 5].

В цих машинах відбувається суміщення процесів лиття – прокатування сталі. Ливарно-прокатні клітки, які використовують в устаткуваннях прямого розливання, мають кристалізатор, який складається з двох валків, що розташовано безпосередньо під проміжним ковшем і обертаються в протилежних напрямках. Рідка сталь при розливанні надходить у простір між валками і утворює осередок деформації. Метал при контакті з поверхнею валків кристалізується, утворюючи затверділі шари, які рухаються разом з поверхнею і виходять із валків у формі листа, товщина якого

визначається відстанню між валками, а ширина бічними стінками кристалізаторів [1]. При валковому литті-прокатуванні заготовкою служить розплавлений метал, параметри зони пластичної деформації формуються внаслідок складної взаємодії матеріалу з інструментом [6].

На відміну від звичайного безперервного лиття-прокатування сталевих виробів, при валковому розливанні в осередку деформації має місце два суміщених процесу: кристалізація розплаву і пластична деформація спочатку тієї частини, що закристалізувалася, а потім і всієї маси металу [4]. В процесі кристалізації відбувається м'яке обтиснення сталі, при виході з кліті-кристалізатора смуга отримує подальше охолодження і надходить у прокатну кліть для подальшого обтиснення [5]. Для аналізу і оцінки отриманих результатів були використані дані досліджень С.Берковича [7], А. Ю. Гридіна [8], де показано основні процеси, що відбуваються в осередку деформації в ливарно-прокатних клітках.

Технологічна схема отримання тонкого листа із застосуванням двовалкових машин безперервного лиття заготовок дозволяє у 8 – 10 разів зменшити витрати енергетичних ресурсів, у 40 – 50 разів скоротити втрати металу в окалину, у 5 – 10 разів підвищити продуктивність праці, що забезпечує економічну доцільність подальшого розвитку та удосконалення технологічних процесів.

Виконано патентний пошук на предмет удосконалення ливарно-прокатних модулів, що дозволило вивчити динаміку розвитку і впровадження ливарно-прокатних агрегатів в Україні та Росії з 2000 по 2013 року. Даний аналіз дає можливість визначити переваги та недоліки у використанні таких агрегатів та виявити подальший напрямок дослідження зі зменшення перегріву металу при безперервній розливці сталі у валки-кристалізатори, що забезпечує можливість суміщення процесів лиття-прокатування [9].

Виявлено недоліки процесу валкової розливки-прокатки: ширина смуг не регулюється і коливається за довжиною. Для знешкодження цього явища запропоновано нову конструкцію валків кристалізаторів [10].

Развиток технології валкової розливки сталі стримується через великі втрати рідкого металу через низьку швидкість кристалізації. Для прискорення цього явища пропонується рідку сталь розливати безпосередньо в консольні прокатні валки, які є кристалізаторами і швидко зменшувати

перегрів металу перед розливанням використовуючи суспензійне розлиття [11].

Однією з переваг суспензійного розлиття є можливість утилізувати металовідходи (стружки, обрізи, недоливів, вирубки). Дослідженнями доведено, що швидкість кристалізації розплаву зі сталі 25 при введенні залізо містких добавок збільшується на 20 % в порівнянні з литтям без добавок.

Для досягнення максимального теплофізичного ефекту істотно регулювати параметри дисперсного інокулятора таким чином, щоб частинки повністю розплавлялися до миті досягнення температури ліквідус. Тому суттєвим показником технологічного процесу суспензійного лиття сталі є розмір частки дисперсного інокулятора [11]. Визнано оптимальним розміром радіус інокулятора, який дорівнюється близько 1 мм [12].

Важливим параметром при прокатуванні, що визначає якість виробів та витрати енергії, продуктивність процесу та собівартість виробництва є осередок деформації, що не достатньо досліджено в умовах валкової розливки-прокатування. Особливо важливою задачею є визначення коефіцієнтів та параметрів осередку деформації з метою оцінки продуктивності та якості процесу.

Мета роботи – дослідити зміни величини площі зовнішньої поверхні осередку деформації в залежності від параметрів та коефіцієнтів осередку деформації.

Для досягнення мети потрібно вирішити наступні **задачі**:

- виконати аналіз впливу товщини смуги на зміни коефіцієнтів осередку деформації при валковому литті-прокатуванні;

- визначити залежність величини площі зовнішньої поверхні осередку деформації від товщини смуги та розміру обтиснення.

Методика проведення дослідження.

Дослідження параметрів та коефіцієнтів осередку деформації відбувалося за схемою, що наведено на рис. 1. Валки мають радіус 500 мм. В дослідженнях застосовувалася смуга товщиною 2, 3 и 4 мм і шириною 1 м. Використовувалися теоретичні та експериментальні методи дослідження. В розрахунках вважалося, що товщина смуги не змінюється, тобто уширення не відбувається.

Кут захоплення визначався за загальною відомою [13, 14] формулою: $\alpha = \sqrt{\Delta h/R}$; довжина дуги контакту валків зі смугою: $l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h}$.

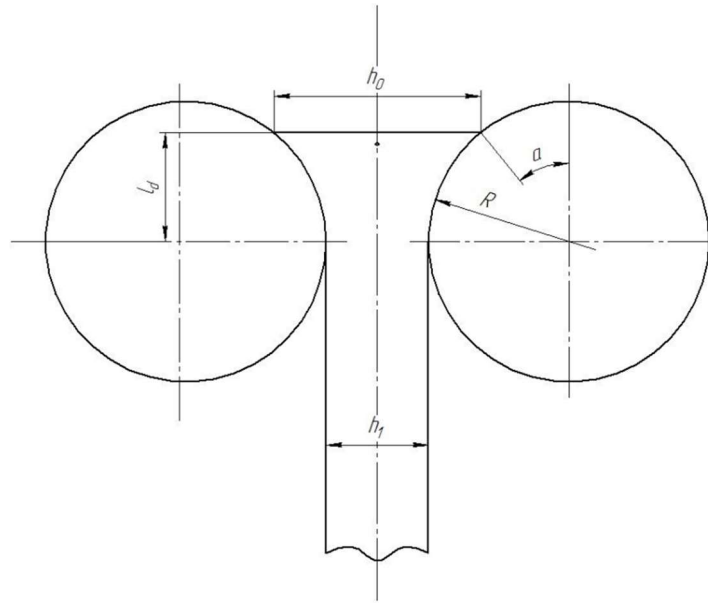


Рис. 1 – Схема осередку деформації при валковій розливці-прокатці для виготовлення тонких смуг: R – радіус валків-кристалізаторів; α – кут захоплення; h_0 – початкова висота смуги; h_1 – кінцева висота смуги; l_d – довжина осередку деформації

Осередок деформації металу має призматичну форми і лічить шість поверхонь – чотири закриті і дві відкриті. Одна умовна поверхня поперечного перерізу розкату, через який він входить в осередок деформації. Дві закриті симетричні поверхні контакту між поверхнями валків і розкату. Ці поверхні мають циліндричну форму радіусом, який дорівнюється радіусу валків і шириною, рівною довжини дуги захвату.

Четверта поверхня представляє собою хвостовий кінець розкату, або площу поперечного перерізу на виході з валків, тобто кінець осередку деформації та процесів, які в ньому відбуваються. П'ята та шоста поверхні – це бокові поверхні смуги, які також симетричні між собою, відстань між цими поверхнями дорівнює ширині смуги. Через великі напруження, що виникають при деформації практично не має шансів у атомів контактної поверхні попасти в уширення. Тому в розрахунках величиною уширення будемо зневажати.

Сумарна продуктивність валків по утворенню зовнішньої поверхні прямокутної призми до площини входу дорівнює:

$$F_{0\text{зов}}=2(b_0+h_0)v_0, \quad (1)$$

а після виходу з валків вона дорівнює:

$$F_{1\text{зов}}=2(b_1+h_1)v_1, \quad (2)$$

де b_0 – ширина осередку деформації на вході у валки; b_1 – ширина осередку деформації на виході з валків; h_0, h_1 – відповідно висота осередку деформації на вході та виході з валків.

Знову утворена поверхня розкату утворюється в осередку деформації.

Зовнішня поверхня осередку деформації дорівнює:

$$F_{\text{од зов}} = 2l_d \frac{b_0+b_1}{2} + 2 \frac{h_1+h_0}{2} R \sin \alpha, \quad (3)$$

де R – радіус валків;

$R \sin \alpha$ – довжина осередку деформації, тобто відстані між площ площинами h_0b_0 і b_1h_1 ;

α – кут захоплення;

Обчислення дорівнює:

$$\Delta h = h_0 - h_1$$

l_d – довжина дуги захоплення, яка дорівнює:

$$l_d = \pi R \alpha / 180 = 0,017 R \alpha. \quad (4)$$

Після відповідних перетворень отримаємо:

$$F_{\text{од зов}} = R[0,017 \alpha (b_0 + b_1) + \sin \alpha (h_1 + h_0)]. \quad (5)$$

Результати дослідження впливу коефіцієнтів та параметрів деформації на площу зовнішньої поверхні осередку деформації. Результати досліджень змін коефіцієнтів та площі зовнішньої поверхні осередку деформації в залежності від кінцевої товщини смуги занесено в таблицю 1.

Таблиця 1. Коефіцієнти та площа зовнішньої поверхні осередку деформації при валковій розливці-прокатці штаби

h_1 , мм	h_0 , мм	Δh , мм	α , °	l_d , мм	$F_{\text{од зов}}$, мм ²
2	22	20	11,5	100	2588,0
3	22	19	11,2	97,4	2618,4
3,5	22	18,5	11,02	96,18	2624,7
4	22	18	10,9	94,8	2643,2

З таблиці 1 видно, що при збільшенні висоти смуги величина обтиснення, кут захоплення, та довжина дуги контакту зменшуються, а площа зовнішньої поверхні осередку деформації збільшується. З формули (5) помітно, що кожен з цих параметрів впливає на величину площі зовнішньої поверхні осередку деформації. Кут захоплення зі зменшенням висоти смуги – збільшується, але

розрахунки виявили, що вплив цього кута несуттєвий. Більш суттєво впливає на площу зовнішньої поверхні величина висоти смуги до та після обтиснення.

Для визначення взаємного впливу коефіцієнтів та параметрів осередку деформації побудовано графік залежності зовнішньої поверхні осередку деформації від величини обтиснення (рис. 2).

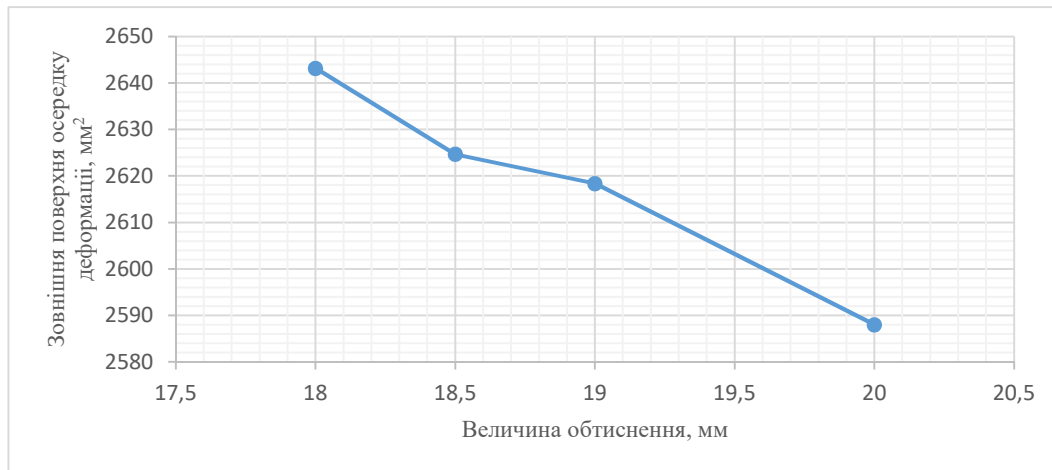


Рис. 2 – Вплив величини обтиснення на величину площі зовнішньої поверхні осередку деформації при валковій розливці для виготовлення тонких смуг

З рисунка 2 видно, що при збільшенні величини обтиснення зменшується площа зовнішньої поверхні осередку деформації. Таке зменшення відбувається тому, що при збільшенні величини обтиснення зменшується висота виробу, яка суттєво впливає на площу зовнішньої поверхні осередку деформації. Величина обтиснення має лінійний вплив на площу зовнішньої поверхні осередку деформації.

Висновки. Проаналізовано вплив товщини смуги на коефіцієнти та параметри осередку деформації при валковій розливці-прокатці сталі для виготовлення тонких смуг, що дозволило запропонувати методику визначення складових та загальної площі зовнішньої поверхні осередку деформації, яка залежить від радіуса валків, величини куту захоплення, початкової та кінцевої висоти та ширини смуги.

Розраховано коефіцієнти та параметри осередку деформації литтє-прокатуванні. Визначено вплив товщини смуги на площу зовнішньої поверхні осередку деформації, де виявлено, що при збільшенні товщини смуги площа зовнішньої поверхні осередку деформації збільшується, а при збільшенні величини обтиснення – зменшується тому, що зменшується товщина смуги.

Список літератури

1. Губін Г. В. Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза / Г.В.Губін, В.О. Півень. – Кривий Ріг: ПП «Видавничий дім», 2010. – 366 с.
2. Данченко В. Н. Прогресивные процессы обработки металлов давлением [Текст] / В. Н. Данченко // Металлургическая и

- горнорудная промышленность. – 2011. – № 7. – С. 1–8.
3. Минаев А. А. Возрождение металлургии на Украине невозможно без приоритетного развития прокатного производства [Текст] / А. А. Минаев, Ю. В. Коновалов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 7. – С. 143–144.
4. Данченко В. М. Теорія процесів обробки металів тиском: Підручник / Данченко В.М., Гриркевич В.О., Головка О.М. – Дніпропетровськ: Пороги, 2008. – 370 с.
5. Минаев А. А. Совмещенные металлургические процессы [Текст]: монография / А. А. Минаев. – Донецк: Технопарк Дон ГТУ УНИТЕХ, 2008. – 522 с.
6. Грідін О. Ю. Развитие научных та технологических основ процесів валової розливки-прокатки з інтенсивною формозміною металу при виробництві тонкий штаб з підвищеним рівнем механічних властивостей: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.03.05 "Процеси та машини обробки тиском" / О. Ю. Грідін. – Дніпропетровськ, 2014. – 40 с.
7. Berkovici S. J. Optimisation of 3C Roll Caster by Automatic Control // Proc. of Conference "Light Metals", TMS. – New York, 1985. – P.1285–1299.
8. Грідін А. Ю. Экспериментальный метод определения длины зоны деформации при непрерывной валковой разливке-прокатке / А.Ю. Грідін // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2010. – Вып. 42. – С. 48–58.
9. Ретроспективный анализ массива опубликованных патентов, характеризующие развитие литейно-прокатных модулей за период 2000-2013 г.г. в Украине и России [Н.Н.Бережной, М.М., Чубенко В.А., А.А.Хіноцька, С.О.Мацишин, А.А.Шепель, В.А.Чубенко]// Технологический аудит и резервы производства. – 2015, №1/1 (21)/ – С. 4–7.
10. Патент України № 100153 МПК В21В1 Ливарно-прокатна кліть / М.М.Бережний, В.А. Чубенко, А.А. Ретроспективный анализ массива опубликованных патентов, характеризующие развитие литейно-прокатных модулей за период 2000-2013 г.г. в Украине и России [Н.Н.Бережной, М.М., Чубенко В.А., А.А.Хіноцька, С.О.Мацишин, А.А.Шепель, В.А.Чубенко]// Технологический аудит и резервы производства. – 2015, №1/1 (21)/ – С. 4–7.

11. Затуловський С. С. Суспензионная разливка [Текст] / С. С. Затуловський. – К: Наукова думка, 1981. – 260 с.
12. The increase in efficiency of strips production process in foundry and rolling mill stand/ Nikolay Berezhnoy, Viktoriya Chubenko, Alla Khinotskaya, Valeriy Chubenko //Metallurgical and Mining Industry. – 2016, № 4. – P. 296–300.
13. Грудев А. П. Теория прокатки. – Уч. для вузов. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с
14. Теория прокатки. – Справочник/А.И.Целиков, А.Д.Томленов, В.И.Зюзин и др. – Под научн.ред. В.И.Зюзина и А.В.Третьякова. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.

Bibliography (transliterated):

1. Gubin G.V. Suchasni promy'slovi sposoby' bezkoksovoyi metallurgiyi zaliza/ [Modern industrial methods cokeless iron metallurgy]. – Kry'vy'j Rig: PP «Vy'davny'chy'j dim», 2010. – 366 p.
2. Danchenko V. N. Prohressyvnne protsessy obrabotky metallov davleniem [Progressive metal forming processes] o // Metallurhycheskaya u hornorudnaya promyshlennost'. – 2011. – No 7. – P. 1–8.
3. Minaev A. A. Vozrozhdenie metallurgii na Ukraine nevozmozhno bez prioritetnogo razvitiya prokatnogo proizvodstva [The revival of industry in Ukraine is impossible without the development of the priority rolling production] // Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'. – 2011. – No 7. – P. 143-144.
4. Teoriya protsesiv obrobky metaliv tyskom: Pidruchyk/ [Theory of processes of metal forming] – Dnipropetrovs'k: Porohy, 2008. – 370 p.
5. Мынаев А. А. Совмешченные металлургические процессы [Combined metallurgical processes]: – Donetsk: Tekhnopark Don HTU UNYTEKh, 2008. – 522 p.
6. Gridin O.Yu. Rozvy'tok naukovy'x ta tehnologichny'x osnov procesiv valovoyi rozly'va-prokatky' z intensy'vnoyu formozminoyu metalu pry' vy'robny'chtvi tonky'j shtab z pidvy'sheny'm rivnem mexanichny'x vlasty'vostej: avtoref.

- dy's. na zbuttya nauk. stupenya dokt. texn. nauk: specz. 05.03.05 "Procesy' ta mashyn'ny' obrobky' ty'skom" / O. Yu. Gridin. – Dnipropetrovs'k, 2014. – 40 p.
7. Berkovici S. J. Optimisation of 3C Roll Caster by Automatic Control // Proc. of Conference "Light Metals", TMS. – New York, 1985. – P. 1285–1299.
8. Gridin A. Ju. Jeksperimental'nyj metod opredelenija dliny zony deformacii pri nepreryvnoj valkovoj razlivke-prokatke [The experimental method of determining the length of the deformation zone in the continuous roll casting-rolling] // Vestnik nacional'nogo tehniceskogo universiteta «HPI». – 2010. – No. 42. – P. 48–58.
9. Retrospektyvnyy analiz massyva opublikovanykh patentov, kharakteryzuyushchye razvytye lyte yno-prokatnykh moduley za peryod 2000-2013 h.h. v Ukraine y Rossyy [Retrospective analysis of an array of published patents, characterizing the development of the casting-rolling units for the period 2000-2013 Ukraine and Russia] // Tekhnologicheskyy audyt y rezervy proyzvodstva. – 2015, /No 1/1 (21)/ – P. 4–7.
10. Patent Ukrainy №100153 MPK V21V1 Lyvamo-prokatna klit' / M.M.Berezhnyy, V.A. Chubenko, A.A.Khinots'ka, S.O.Matsyshyn, A.O.Shepel', V.A.Chubenko, DVNZ «Kryvoriz'kyy natsional'nyy universytet». – zayavl. 05.02.2015, opubl. 10.07.2015, Byul. No 13.
11. Zatulovskyy, S. S. Suspenzyonnaya razlyvka [Suspension casting]. – Kiev: Naukova dumka, 1981. – 260 p.
12. The increase in efficiency of strips production process in foundry and rolling mill stand / Nikolay Berezhnoy, Viktoriya Chubenko, Alla Khinotskaya, Valeriy Chubenko //Metallurgical and Mining Industry. – 2016, No 4. – P. 296–300.
13. Grudev A.P. – Teoriya prokatki. – Uch. dlja vuzov. [The theory of rolling] – Moscow.: Metallurgija, 1988. – 240 p.
14. Teoriya prokatki. . Spravochnik [The theory of rolling]. – Moscow.: Metallurgija, 1982. – 335 p.

Надійшло (received) 15.11.2016

Бібліографічний опис/Библиографическое описание/ Bibliographic descriptions

Зовнішня поверхня осередку деформації при валковій розливі-прокатні тонкий смуг/ В.А.Чубенко, А.А.Хіноцька, В.Чубенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 31(1203). – С. 69–74. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2519-2671

Внешняя поверхность очага деформации при валковой разливке- прокатке тонких полос /В.А.Чубенко, А.А.Хиноцкая, В.Чубенко/ // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 31(1203). – С. 69–74. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2519-2671

The outer surface of the roll gap at the roll casting-rolling thin strips/ V.A.Chubenko, A.A.Khinotskaya, V.Chubenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 69–74. – Bibliogr.: 14 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів/ Сведения об авторах/ About the Authors

Чубенко Вікторія Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Криворізький національний університет», доцент кафедри металургії чорних металів та ливарного виробництва, тел.: 0507472823, e-mail victoria_4@rambler.ru

Чубенко Вікторія Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Криворожський національний університет», доцент кафедри металургії чорних металів та литейного виробництва, тел.: 0507472823 e-mail victoria_4@rambler.ru

Chubenko Victoria Anatolievna –Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Krivoy Rog National University, tel.: 0507472823, e-mail: victoria_4@rambler.ru

Хіноцька Алла Анатольевна – старший викладач кафедри металургії чорних металів та ливарного виробництва ДВНЗ «Криворізький національний університет»

Хиноцкая Алла Анатольевна – старший преподаватель кафедры металлургии черных металлов и литейного производства ДВНЗ «Криворожский национальный университет»

KHinotskaya Alla Anatolievna – Senior Lecturer of Department of Iron Metallurgy Metals Krivoy Rog National University

Чубенко Валерій Андрійович – ДВНЗ «Криворізький національний університет», студент

Чубенко Валерий Андреевич – ДВНЗ «Криворожский национальный университет», студент

Chubenko Valeriy Andreevich – Student, Krivoy Rog National University

УДК 621.7

В. Л. ЧУХЛЕБ, Е. С. КЛЕМШОВ, В. А. ГРИНКЕВИЧ, О. А. ЯРОШЕНКО, Т. А. ХАЛЕЗОВА, Х. ДЬЯ**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОВКИ ПОКОВОК ГЛАДКИХ ВАЛОВ
ИЗ ДУПЛЕКС-СТАЛИ В УСЛОВИЯХ ООО «ДНЕПРОПРЕСС СТАЛЬ»**

В статье выполнена оптимизация процессаковки дуплекс-стали путем математического моделирования схем протяжки по различным режимам с изменением схем кантовок и подач, а также определены показатели неравномерности распределения деформации по сечениям по разработанному авторами методу оценки неравномерности деформации по объему поковки с рассмотрением изменения этих величин, как в поперечном, так и в продольном направлениях. Для этого были промоделированы существующий и предложенный авторами способ протяжки поволовок гладких валов и путем достижения максимальной равномерности деформации и минимального искривления поковки в процессековки выбран наиболее оптимальный, который и был предложен для последующей автоматизации при ковке на гидравлическом ковочном прессе в условиях кузнечно-термического цеха ООО «Днепропресс Сталь».

Ключевые слова: ковка, дуплекс-сталь, протяжка, кантовка, распределение деформаций

У статті виконана оптимізація процесу кування дуплекс-сталі шляхом математичного моделювання схем ковальної витяжки (протяжки) по різних режимам зі зміною схем кантувань і подач, а також визначені показники нерівномірності розподілення деформацій по перетинах за розробленим авторами методом оцінки нерівномірності деформації в об'ємі металу поковки з розглядом зміни цих величин, як в поперечному, так і в поздовжньому напрямках. Для цього були промодельовані існуючий і запропонований авторами спосіб протяжки поволовок гладких валів і шляхом досягнення максимальної рівномірності деформації і мінімального викривлення поковки в процесі кування обрано найбільш оптимальний, який і був запропонований для подальшої автоматизації при куванні на гідрравлічному кувалльному пресі в умовах ковально-термічного цеху ТОВ «Дніпропрес Сталь».

Ключові слова: кування, дуплекс, протягування, кантування, розподілення деформацій

This article was made for optimization of forging the duplex steel by mathematical modeling of forging-drawing schemes with different modes of deformation and with the canting schemes and feeds changing, as well as defined the indicators of unevenness of strain distribution on the cross sections by the method of evaluation of unevenness of strain distribution inside the forgings with the consideration of this values as in transverse and longitudinal directions. This method is simple, but makes it possible to see what happens with the metal (particularly with a strain distribution) inside the forgings during the forging-drawing process. Also, this method was used firstly for needs of real manufacturing process, that was mathematically modulated in computer simulation software. For this matter were modeled real existing process of forging and proposed by authors process of forging-drawing of smooth shafts and through the achievement of maximal deformation unevenness and minimal curvature of the forging during the forging-drawing process selected the most optimal scheme of deformation, which was proposed for further automation of forging process on hydraulic forging press in terms of forging-thermal shop Ltd. "Dneproress Steel".

Keywords: forging, duplex, forging drawing, canting, strain distribution

Введение. Дуплекс-стали в последнее время все больше находят применение в различных областях машиностроения. Дуплекс-стали и способы их обработки давлением являются перспективными в области исследований, так как на качество получаемой продукции наибольшее влияние оказывает рациональный режимковки, который может быть спроектирован в зависимости от оптимизации схемы деформации путем математического моделирования с последующим их применением в реальных промышленных условиях.

Постановка проблемы. На сегодняшний день по всему миру предприятия по производству поволовок стремятся расширить свой сортамент, в частности за счет разработки режимов обработки новых, не исследованных сплавов или сплавов специального назначения. Такой метод расширения сортамента необходим, ввиду того что в мире всё больше развивается потребность в изделиях со специальным набором механических свойств. Сами же механические свойства определяются не только свойствами материала, но и способом обработки давлением. В данном случае, под способом обработки давлением понимается свободная ковка, а именно, кузнечная вытяжка (протяжка).

Дуплекс-стали относятся к классу высоколегированных сталей и требуют специального

режима деформации. Помимо точного соблюдения температурного интервалаковки для дуплекс-сталей, необходимо придерживаться и определённой схемы кантовок, а также не превышать допустимые степени деформации. Все эти параметры определяют качество изделия, а в частности механические свойства.

Поэтому, согласно вышесказанному, разработка оптимальных режимов деформации, при ковке поволовок гладких валов из дуплекс-сталей, для получения высокого качества продукции необходима.

Анализ последних исследований и публикаций. На данном этапе развития науки об обработке металлов давлением существует тенденция к постоянному усовершенствованию технологий получения металлопродукции. В кузнечном производстве, как и в любом другом способе обработки металлов давлением, существует два приоритетных направления:

- 1) усовершенствование формы деформирующего инструмента и заготовки;
- 2) оптимизация параметров для конкретных деформационных процессов.

К усовершенствованию формы деформирующего инструмента относится изменение формы бойков. В данном направлении существует

множество работ, в которых рассматривается влияние нестандартных форм бойков, отличных от классических плоских, вырезных или комбинированных, на напряженно-деформированное состояние поковки. Одной из таких работ является работа [1], в которой рассмотрено влияние геометрических параметров инструмента на деформированное состояние металла и дефектообразование. Авторы этой работы использовали ступенчатые бойки для более интенсивной проработки внутренних слоев металла заготовки. При этом ими было установлено, что велика вероятность образования внешних дефектов на поверхности круглой заготовки, поэтому необходимы малые обжатия в пределах 10–15%. Для устранения подобных дефектов на плоской заготовке авторами работы [1] предложены ступенчатые бойки с углом скоса 45°. Однако данный метод накладывает определённые трудности при составлении технологического процесса и соответственно увеличению времени производства поковок, что отражается на производительности, в особенности в условиях производства на предприятиях. Поэтому в данной работе форма инструмента не была изменена, а принята стандартная форма комбинированных бойков (верхний плоский и нижний вырезной) которая зачастую используется на предприятиях.

Как было сказано, при составлении технологического процесса производства поковки, на предприятии используются специальные схемы. Подобная схема приведена в работе [2]. Одним из пунктов данной схемы, помимо выбора формы и размеров бойков, является проектирование самого процесса деформации, то есть количества операцийковки и их параметры. К параметрам процессаковки длинномерных изделий относится степень деформации заготовки, величина подачи и схема кантовок заготовки. При этом ещё одним параметромковки, который выражается через схему кантовок, является наличие макросдвигов [3]. К данной области изучения пластической деформации металлов в последнее время имеется большой интерес, так как при небольших степенях деформации возможно получение минимальной анизотропии свойств металла как в продольном, так и в поперечном направлении. Так, например, существуют исследования по изучению влияния неравномерного прогрева заготовок для интенсификации сдвиговых деформаций. Одним из таких исследований является исследование в работе [4]. Таким образом, авторы работы [4], добиваются улучшения проработки центральной зоны заготовки за счет интенсивной сдвиговой деформации. Однако направленная неравномерность прогрева заготовки не рациональна при ковке дуплекс-сталей, ввиду слишком малого температурного интервалаковки, величина которого для дуплекс-сталей составляет около 120°C–150°C в зависимости от марки стали. Это связано с

образованием труднодеформируемых фаз сплава при превышении или выходе за пределы нижнего интервала ковочных температур.

Применение макросдвиговых деформаций обусловлено возможностью влияния на макроструктуру металла путем регулирования потоков пластического течения металла. В данном случае имеется ввиду оптимизация схемы кантовок, а точнее грамотное построение режима обжатий и кантовок на основе чередования зон деформации и суммировании эффектов, возникающих при пластическом вытеснении металла.

Как было сказано ранее, в мире все больше возникает потребность в металлопродукции со специальным набором механических свойств, которые, от части, обеспечиваются легированием стали. Так же известно, что легированные марки стали требуют специального деформационного режима, во избежание образования дефектов как внешних, так и внутренних. Для этого разрабатываются специальные технологические процессыковки, в которых важную роль играют чередующиеся обжатия и кантовки.

Постановка задачи. Главной целью данной работы является оптимизация технологического процессаковки поковок гладких валов из дуплекс-стали в условиях предприятия ООО «Днепропресс Сталь». На предприятии освоены более 100 марок сталей и сплавов. При этом вопросу обеспечению качественной продукцией своих потребителей уделяется первостепенное значение. В связи с этим в кузнечно-термическом цехе ООО «Днепропресс Сталь» внедряются новые и совершенствуются существующие технологические процессыковки слитков на гидравлических ковочных прессах.

Одной из задач, стоящих перед ООО «Днепропресс Сталь» является освоениековки дуплекс-сталей. Однако для получения качественной продукции необходимо знание напряженно-деформированного состояния в процессековки и формирование предложений по оптимизации режима деформации. Для моделирования процесса свободнойковки в Forge 2008® были заданы параметры реального процессаковки поковок из дуплекс-стали S32304 (сталь 03X23H4AM), а так же заданы параметры переходовковки, ранее разработанные в работах [5,6].

Исходной заготовкой дляковки является слиток (см. рис. 1) с донной частью 450x450 мм, прибыльной частью 580x580 мм и общей длиной 1500 мм. Конечным изделием является гладкий вал диаметром 320 мм.

Оптимальный температурный интервалковки для данного сплава составляет 1160–1040°C. При моделировании используются комбинированные бойки – верхний плоский, а нижний вырезной. Развал выреза нижнего бойка составляет 450 мм, а глубина выреза – 160 мм.

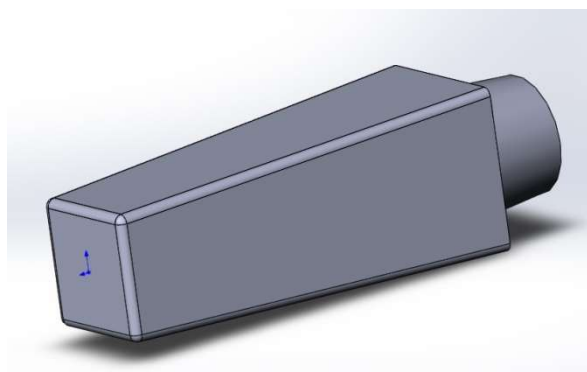


Рис. 1 – Объемная модель слитка из дуплекс-стали

Для моделирования процесса было задано две схемы кантовок: 1) реальная схема кантовок, используемая на предприятии (схема 1); 2) схема кантовок, разработанная авторами данной работы (схема 2). Схема кантовок, разработанная авторами данной работы, также представлена в работах [5, 6], и является схемой ковки «по кольцу» и состоит из 15 обжатий. В данной схеме после первого обжатия

следует кантовка на 120° , после этого заготовка снова обжимается и кантуется на 120° , затем следуют три обжатия и кантовки на 60° и после этого следуют 10 обжатий и кантовок на 15° . Относительная подача при этом составляет 0,5 от ширины бойка. Форма заготовок в процессе деформации приведена на рис. 2.

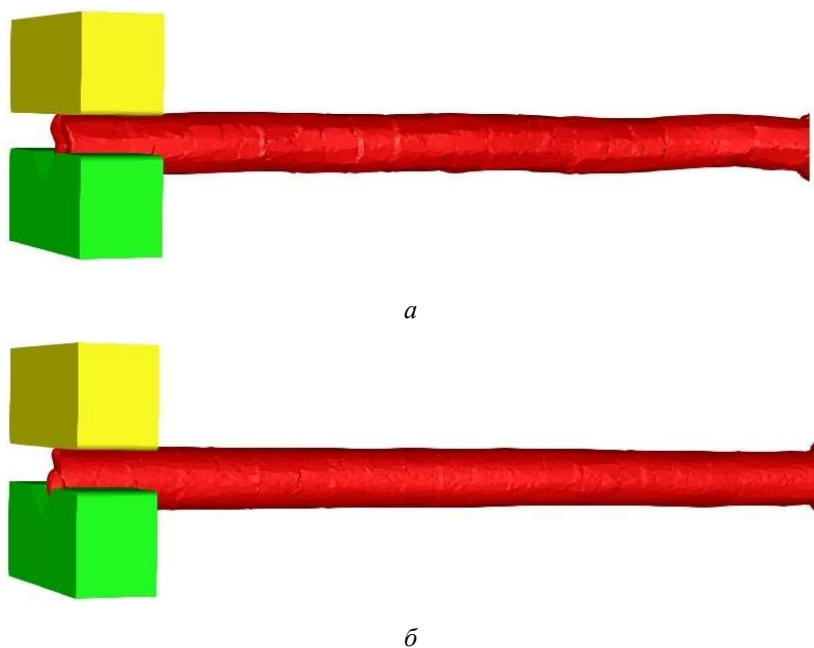


Рис. 2 – Форма заготовки в процессе ковки: а – при ковке по схеме 1; б – при ковке по схеме 2

Схема кантовок, используемая на предприятии, не имеет точно определенной последовательности углов кантовок. Углы кантовок также отличаются друг от друга при каждом обжатии. Величина угла при каждом обжатии варьируется в пределах от 25° до 50° . При этом схема кантовок состоит из шести обжатий, после чего производится три обжатия с

подачей заготовки и кантовкой её на угол из вышеописанного интервала. Величина относительной подачи при этом составляет 0,3 от ширины бойка. Степень деформации при обжатиях, при использовании обеих схем кантовок, составляет 10%

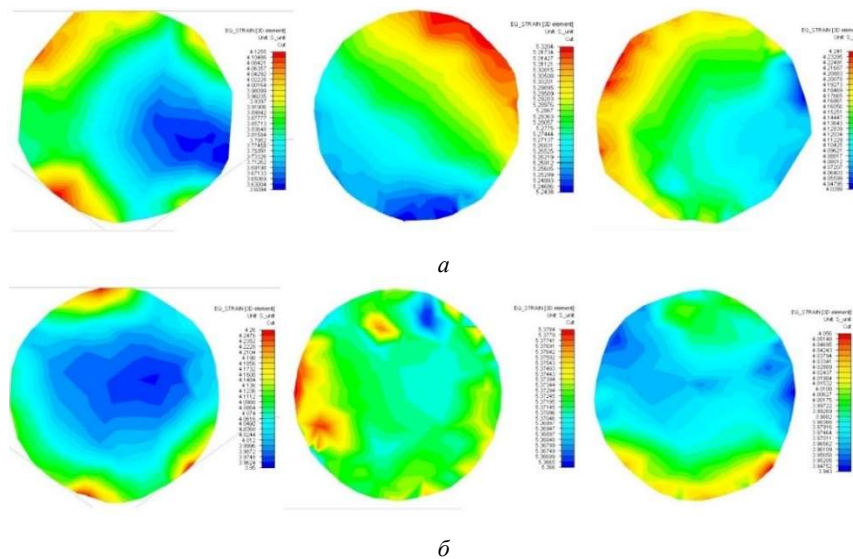


Рис. 3 – Распределение деформаций при протяжке (слева на право – передний конец, середина, задний конец).
а – при ковке по схеме 1; б – при ковке по схеме 2

Анализ результатов моделирования был осуществлен с помощью трех поперечных сечений, два из которых расположены на концах поковки и одно на середине длины.

На рис. 3 представлено распределение деформаций в поперечных сечениях поковки при ковке по схеме 1 (см. рис. 3, а) и по схеме 2 (см. рис. 3, б).

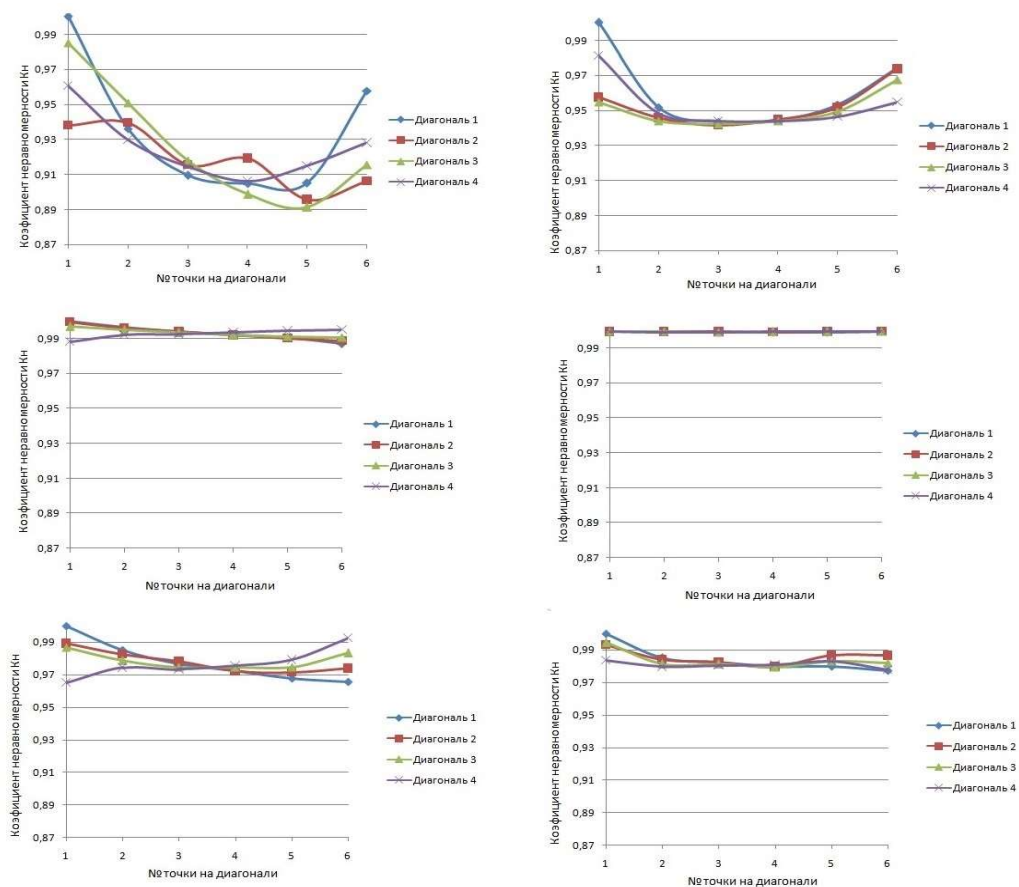


Рис. 4 – Распределение неравномерности деформации в поперечных сечениях (сверху вниз – передний конец, середина, задний конец) заготовки: а – при ковке по схеме 1; б – при ковке по схеме 2

Смысл метода определения неравномерности деформации заключается в определении как можно меньшей разницы показателей деформации в сечении. Сам же метод позволяет количественно оценить неравномерность распределения деформаций в металле. Для количественного определения неравномерности деформаций был рассчитан коэффициент неравномерности деформации K_n . Показатель неравномерности деформации может принимать значения не больше единицы, так как является отношением показателей эквивалентной деформации в контрольных точках сечения к максимальному значению эквивалентной деформации в сечении. Определение максимального значения деформации в сечении и соответствующих соотношений было рассмотрено в работах [5, 6].

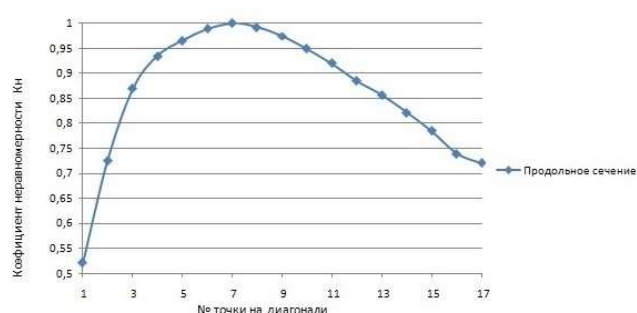
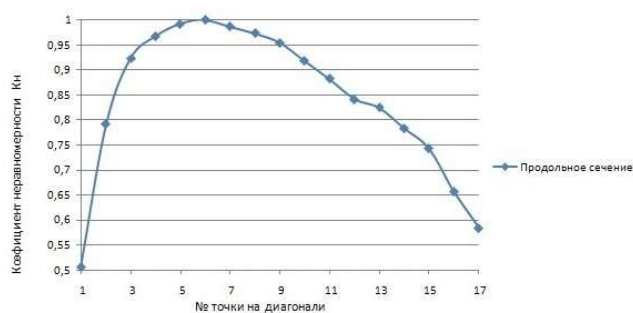


Рис. 5 – Распределение неравномерности деформации в продольном сечении заготовки:
а – при ковке по схеме 1; б – при ковке по схеме 2

Из анализа графиков неравномерности распределения деформаций в продольных сечениях видно, что несмотря на различия в параметрах схем кантовок, величина коэффициента неравномерности распределения деформаций является практически идентичной как при ковке по схеме, разработанной авторами данной работы, так и при ковке по реально используемой на предприятии схеме кантовок.

Выводы проведенного исследования.

1) Параметры схем кантовок напрямую влияют на равномерность распределения деформаций в металле, что в свою очередь отражается на анизотропии механических свойств поковки.

2) В условиях ООО «Днепропресс Сталь» имеются все необходимые возможности для производства слитков и последующейковки дуплекс-стали.

3) Исходя из анализа результатов моделирования, можно заметить, что неравномерность распределения деформаций в продольном сечении поковки, несмотря на различия параметров схем кантовок, практически не отличаются, что свидетельствует об эффективности разработанной авторами статьи схемы кантовок.

4) Предложенная авторами схема кантовок обеспечивает меньшую неравномерность распределения деформаций, что видно на рис. 4. Это

Детальный анализ неравномерности распределения деформаций в металле был проведен с помощью построения графиков (рис. 4). На графиках изображены показатели неравномерности распределения деформации в трех сечениях.

Как видим, при ковке по схеме разработанной авторами работы заметна большая равномерность распределения деформаций, что видно по меньшему разбросу величин в сечении (кривизна линий), а также по минимальной величине коэффициента неравномерности распределения деформации.

В продольном сечении было взято 17 точек расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Значение показателя неравномерности в точках приведены на рис. 5.

связанно с рациональностью предложенной схемы и также со строгим соблюдением очередности обжатий, величин угла кантовки и подачи.

5) Указанные разработки приняты к рассмотрению и внедрению на ООО «Днепропресс Сталь» с последующей автоматизацией свободнойковки дуплекс-сталей в кузнечно-термическом цехе на гидравлических ковочных прессах.

Список литературы

1. Алиева Л.И. Ковка поковок типа валов с продольным сдвигом специальными бойками / Л.И. Алиева, Я.Г. Жбанков, В.Ю. Станков // Вестник НТУ «ХПИ». 2013. № 43 (1016). С/ 3–10.
2. Морозова С.А. Блок-схема проектирования технологии свободнойковки на прессах / С.А. Морозова, О.В. Жуйкова, В.Н. Неверов // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. №8–9. С. 467–471.
3. Тюрин В.А. Макросдвиг – союзник кузнеца / В.А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2016. №8. С/ 6–10.
4. Жбанков Я.Г. Интенсификация сдвиговых деформаций при ковке заготовок с неоднородным температурным полем / Я.Г. Жбанков // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2013. №2 (281). С. 42–47.
5. Чухліб В.Л. Дослідження напружено-деформованого стану при протяжці титанового сплаву з метою оптимізації параметрів кування / В.Л. Чухліб, Є.С. Клемшов, В.О. Гринкевич, Х. Дия // Вестник НТУ «ХПИ». 2015. №24. С. 15–166.
6. Чухліб В.Л. Дослідження впливу параметрів процесу попереднього осаджування на нерівномірність розподілення

деформацій в метали при протягуванні заготовок з титанового сплаву / В.Л. Чухліб, Є.С. Клемешов, В.О. Гринкевич, Х. Дія // Вісник НТУ «ХПІ». 2016. №1 (76). С. 147–155.

References (transliterated)

1. Alieva L.I. Kovka pokovok tipa valov s prodol'nym sdvigom special'nymi bojkami / L.I. Alieva, Ja.G. Zhbankov, V.Ju. Stankov // Vestnik NTU «ХПІ». 2013. No 43 (1016). P. 3–10.
2. Morozova S.A. Blok-shema proektirovanija tehnologii svobodnoj kovki na pressah / S.A. Morozova, O.V. Zhujkova, V.N. Neverov // Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'. 2002. No 8–9. P. 467–471.
3. Tjurin V.A. Makrosdvig – sojuznik kuzneca / V.A. Tjurin // Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem. 2016. No 8. P. 6–10.
4. Zhbankov Ja.G. Intensifikacija sdvigojvyh deformacij pri kovke zagotovok s neodnorodnym temperaturnym polem / Ja.G. Zhbankov // Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'. 2013. No 2 (281). P. 42 – 47.
5. Chuhlib V.L. Doslidzhennja napruzhenno-deformovanogo stanu pri protjazhki titanovogo splavu z metoju optimizacii parametriv kuvannja / V.L. Chuhlib, Ye.S. Klemeshov, V.O. Grinkevich, H. Dija // Vestnik NTU «ХПІ». 2015. No 24. P. 159-166.
6. Chuhlib V.L. Doslidzhennja vplivu parametriv procesu poperedn'ogo osadzhuvanija na nerivnomirnist' rozpodilennja deformacij v metali pri protjaguvanni zagotovok z titanovogo splavu / V.L. Chuhlib, Ye.S. S. Klemeshov, V.O. Grinkevich, H. Dija // Visnik NTUU «ХПІ». 2016. No 1 (76).P. 147–155

Поступила (received) 15.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оптимізація технології кування поковок гладких валів з дуплекс-сталей в умовах ТОВ «Дніпропрес Сталь»/ В.Л. Чухліб, Є.С. Клемешов, В.О. Гринкевич, О.О. Ярошенко, Т.А. Халезова, Х. Дія // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 75–81. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

Оптимизация технологииковки поковок гладких валов из дуплекс-сталей в условиях ООО «Днепропресс Сталь»/ В.Л. Чухлеб, Е.С. Клемешов, В.А. Гринкевич, О.А. Ярошенко, Т.А. Халезова, Х. Дия // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 31(1203). – С. 75–81. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

Optimization of technology of forging of shafts from duplex steels in terms of Ltd. “Dnepropress Steel”/ V.L. Chuhlib, Y.S. Klemeshov, V.A. Grinkevich, O.A. Yaroshenko, T.A. Khalezova, H. Dija // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 31(1203). – P. 75–81. – Bibliogr.: 6 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чухлеб Виталий Леонидович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры обработки металлов давлением им. акад. Чекмарева А.П., г. Днепропетровск; тел.: (095) 792-55-92; e-mail: cvl1@mail.ua.

Чухліб Віталій Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. Чекмарьова О.П., м. Дніпропетровськ; тел.: (095) 792-55-92; e-mail: cvl1@mail.ua.

Chukhlib Vitaliy Leonidovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Metallurgical Academy of Ukraine, Associate Professor at the Department of Metal Forming; tel.: (095) 792-55-92; e-mail: cvl@mail.ru.

Клемешов Евгений Сергеевич – аспирант кафедры обработки металлов давлением им. акад. Чекмарева А.П., г. Днепропетровск; e-mail: klemeshov.evgen@gmail.com.

Клемешов Євген Сергійович – аспірант кафедри обробки металів тиском ім. акад. Чекмарьова О.П., м. Дніпропетровськ; e-mail: klemeshov.evgen@gmail.com.

Klemeshov Yevhen Sergijovich – Ph.D. student, National Metallurgical Academy of Ukraine, Associate Professor at the Department of Metal Forming; e-mail: klemeshov.evgen@gmail.com.

Гринкевич Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обработки металлов давлением им. акад. Чекмарева А.П., г. Днепропетровск.

Гринкевич Володимир Олександрович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри обробки металів тиском ім. акад. Чекмарьова О.П., м. Дніпропетровськ.

Grinkevich Volodymyr Oleksandrovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Metallurgical Academy of Ukraine, Professor at the Department of Metal Forming.

Ярошенко Олег Александрович – директор по производству ООО «Днепропресс Сталь», г. Днепропетровск.

Ярошенко Олег Олександрович – директор з виробництва ТОВ «Дніпропрес Сталь», м. Дніпропетровськ.

Yaroshenko Oleg Oleksandrovych – production Director of Joint Stock Company "Dnepropress Steel", Dnipropetrovsk.

Халезова Татяна Адольфовна – начальник – кузнечно-пресового бюро ООО «Днепропресс Сталь», г. Днепропетровск.

Халезова Тетяна Адольфівна – начальник ковальсько-пресового бюро ТОВ «Дніпропрес Сталь», м. Дніпропетровськ.

Khalezova Tatyana Adolfovna – Head of press-forging Bureau of Joint Stock Company "Dnepropress Steel", Dnipropetrovsk.

Дыя Хенрик – доктор технических наук, профессор, профессор Политехники Ченстохова, г. Ченстохова, Польша.

Дия Хенрик – доктор технічних наук, професор, професор Політехники Ченстохової, м. Ченстохова, Польша.

Dyja Henrik – Doctor of Science in Engineering, Full professor; Polytechnic of Chensochowa, Professor at the Department of Material Engineering.

ЗМІСТ

Алиева Л. И., Гончарук К. В., Шкира А. В. Формоизменение стержневых деталей с фланцем при радиально-прямом выдавливании.....	5
Гожій С. П., Кліско А. В., Суботенко Г. М. Енергоефективний спосіб виготовлення деталей з центральною порожниною із застосуванням процесів штампування обкочуванням.....	11
Горностай В. М., Сабол С. Ф., Потятиник А. М., Головка О. С. Визначення впливу різностінності вихідної заготовки на якість кінцевого виробу при видавлюванні з потоншенням.....	17
Єршов С. В., Геймур К. Г., Кравченко К. О., Марченко К. К. Дослідження зносу калібрів при прокатуванні катанки в умовах середньосортно-дротового стану 400/200 ПАТ «ДМК».....	23
Загорянский О. В. Моделирование совместного течения разнородных металлов и их деформации на основе вариационных принципов.....	31
Калюжный В. Л., Олександренко Я. С., Куликов И. П. Холодная гибка стальных прямоугольных труб в трубогибе с проточкой специального профиля на фасонном валке.....	36
Калюжный О. В., Куліков І. П. Вплив радіуса заокруглення конусної матриці спеціального профіля на формоутворення та розміри виробів з горловиною при закритому обтиску трубчастих заготовок.....	42
Кузьменко Е. А., Кузьменко В. И., Христофорова Т. А. Факторы, определяющие стойкость штампов холодного выдавливания.....	50
Максименко О. П., Кузьмин Е. В. Анализ режимов деформации при прокатке в проволочном блоке стана 400/200 с учетом продольной устойчивости полосы в валках.....	57
Новиков Ф. В., Рябенков И. А. Условия уменьшения шероховатости поверхности отверстия для разных методов абразивной обработки.....	63
Чубенко В. А., Хіноцька А. А., Чубенко В. Зовнішня поверхня осередку деформації при валковій розливці-прокатці тонких листів.....	69
Чухлеб В. Л., Клемшов Е. С., Гринкевич В. А., Ярошенко О. А., Халезова Т. А., Дья Х. Оптимизация технологииковки поковок гладких валов из дуплекс-стали в условиях ООО «ДНЕПРОПРЕСС СТАЛЬ».....	75

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХП»**

Збірник наукових праць

Серія
«Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів
у машинобудуванні та металургії»

Випуск 31 (1203) 2016

Науковий редактор: д-р техн. наук проф. А.П. Марченко

Технічні редактори: Т.Л. Ковортний, О.С. Курандо

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХП»
каф. обробки металів тиском, тел. (057) 707-60-40, 707-69-16, e-mail:

Обл. вид. № 31-16

Підп. до друку 15.11.2016 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. RISO-друк. Гарнітура Таймс.
Ум.друк.арк. 8,6. Обл.-вид. арк. 8.9.

Наклад 300 прим. Зам. No 17. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК No 116 от 10.07.2000 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Видавництво та друк ФО-П Шейніна О.В.

61052, Україна, м. Харків, вул. Слов'янська, 3

Тел. 057 759-48-79

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК No 2779 від 28.02.2007 р.