

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*

№ 37 (1259) 2017

Збірник наукових праць
Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ «ХПІ» 2017

Вісник Національного технічного університету «ХПІ»

Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 37 (1259) – 90 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. Дмитриєнко, 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. Плеснєцов, 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.; М. Є. Тараненко, д-р техн. наук, проф.; Є. М. Смирнов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, 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.; Е. 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 вченого радою НТУ «ХПІ»

Протокол № 10 від 22 грудня 2017 р.

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 37 (1259) 2017

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkiv
NTU "KhPI" 2017

Collected Works. Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – No 37 (1259) – 90 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 «KPI» 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. Drahobetskyy, Dr. of Sciences, professor; S.V. Ershov Dr. of Sciences, professor; V. L. Kalyuzhny, Dr. of Sciences, professor; M.E. Taranenko, Dr. of Sciences, professor; E.M. Smirnov, Dr. of Sciences, professor; G.M. Suchkov, 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 10 from Desember 22, 2017

УДК 004.942

А.В. АЛТУХОВ, А.Ф. ТАРАСОВ, Н.Н. ПОДНЕБЕСНЫЙ, А.О. ВИННИКОВ

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИНТЕНСИВНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РЕВЕРСИВНОГО СДВИГА

Выполнен анализ проблем, возникающих при разработке САПР штамповой оснастки для процессов интенсивного пластического деформирования (ИПД). Разработан модуль интегрированной САПР для САЕ-системы ABAQUS, позволяющий автоматизировать создание расчетной модели процесса реверсивного сдвига (РС) и его модификаций. Разработанный модуль позволил провести исследования технологического процесса ИПД по схеме РС при изменении ряда технологических параметров.

Ключевые слова: параметрическое проектирование, интегрированная САПР, САЕ, штамповочная оснастка, интенсивные пластические деформации.

Виконано аналіз проблем, які виникають при розробці САПР штампового оснащення для процесів інтенсивного пластичного деформування (ІПД). Розроблено модуль інтегрованої САПР для САЕ-системи ABAQUS, який дозволяє автоматизувати створення розрахункової моделі процесу реверсивного зсуву (РЗ) та його модифікацій. Розроблений модуль дозволив провести дослідження технологічного процесу ІПД за схемою РЗ при зміненні ряду технологічних параметрів

Ключові слова: параметричне проектування, інтегрована САПР, САЕ, штамповче оснащення, інтенсивні пластичні деформації.

The problems arising in the development of CAD for tools design for the processes of severe plastic deformation (SPD) was analyzed. The structure of the developed integrated CAD which includes industrial CAD/CAE-systems is considered. The scheme of the tooling and the parameters of the geometric model of the SPD process for the example of the modified reverse shear (RS) are given. The integrated CAD module for the CAE-system ABAQUS has been developed allowing to automate the creation of the design model of the reverse shear (RS) process and its modifications. A feature of modeling in the CAE-system of SPD processes is considered, which can include many calculation steps with spatial displacement and positioning of the workpiece between operations. The developed module made it possible to conduct studies of the technological process of SPD according to the RS scheme with the modification of a number of technological parameters. The analysis of the influence of technological parameters on the unevenness of deformation on the volume of the billet is made.

Keywords: parametric design, integrated CAD, CAE, die tools, severe plastic deformations.

Введение. Использование САЕ-систем в инженерных расчетах изделий машиностроения позволяет значительно сократить время на подготовку разрабатываемых проектов и улучшить качество технической документации. Возможности современных компьютеров обеспечивают с помощью САЕ-систем моделирование технологических процессов и получение приемлемого результата без трудоемких натурных экспериментов. Однако, при проведении цикла типовых исследований остается трудоемким процесс подготовки проекта (расчетной модели) для САЕ-системы, что приводит к замедлению поиска оптимальных параметров инструмента, заготовки и самого технологического процесса. К параметрам процесса, которые необходимы для моделирования, можно отнести кинематические характеристики инструмента, маршруты деформирования, позиционирование заготовки между этапами деформирования, температурный режим, условия контакта, количество шагов расчета и другие.

Кроме того, компьютеры обеспечивают поддержку принимаемых решений за счет интеграции с базами данных и знаний, которые содержат необходимую информацию для поддержки принимаемых проектировщиком технологических и конструктивных решений: модели деформируемых материалов, параметрические модели оснастки и др. [1, 2].

Целью работы является разработка САПР технологических процессов ОМД, которые обеспечивают наиболее полное использование возможностей CAD/CAE-систем.

Постановка задачи исследований. Процессы интенсивного пластического деформирования ИПД получили большое распространение среди процессов ОМД благодаря уникальным свойствам металлов и сплавов, которые они получают в результате такой обработки [3]. Однако промышленное применение сдерживается сложностью реализации процессов ИПД, ограниченными размерами получаемых заготовок, обработкой преимущественно цветных металлов. Сложности при проектировании новых процессов ИПД создает также отсутствие специализированного программного обеспечения.

Современные САЕ-системы обладают рядом возможностей, которые не всегда используют при проектировании изделий машиностроения, в частности, открытые интерфейсы [2, 4] для автоматизации управления САЕ-системой в составе интегрированной САПР. Такие интерфейсы дают возможность автоматизировать подготовку расчетной модели для последующего моделирования, а также получить доступ к базе результатов расчетов для анализа параметров напряженно-деформированного состояния в узлах модели заготовки для анализа процесса деформирования. В случае необходимости автоматизируется и пересчет модели после ее корректировки. Как правило, для автоматизации подготовки расчетной модели в САПР применяют параметрические модели технологического процесса и оснастки, на основе которых генерируют готовые проекты, пригодные для моделирования в САЕ-системе [4–6].

Создание САПР на основе промышленных компонентов требует формулировки концептуальных принципов построения таких программных систем, а

также учета особенностей предметных областей, в которых выполняется моделирование. В данном случае необходимо рассматривать схемы технологических процессов, реологические модели поведения обрабатываемых материалов, включая пористые, полученные методами порошковой металлургии или аддитивными технологиями, конструктивные особенности оснастки, а также ряд других факторов [7].

Необходимость разработки программного кода для внешних модулей CAD/CAE-систем является наибольшей проблемой для конструкторов и технологов, занимающиеся проектированием и моделированием в CAE-системах, так как они далеко

не всегда имеют необходимый уровень подготовки в области программирования.

Основной материал исследований. В качестве примера при разработке принципов построения интегрированной САПР технологических процессов ИПД выбрана схема модифицированного реверсивного сдвига (РС) [8], для реализации которой требуется относительно простая штамповочная оснастка и универсальное оборудование.

В расчетную модель процесса ИПД РС включены подвижный 1 и неподвижный 2 пuhanсоны с наклонными гранями, между которыми установлена заготовка 3 (рис. 1 а, б). Они размещены в неподвижной матрице со стенками 4 и 5.

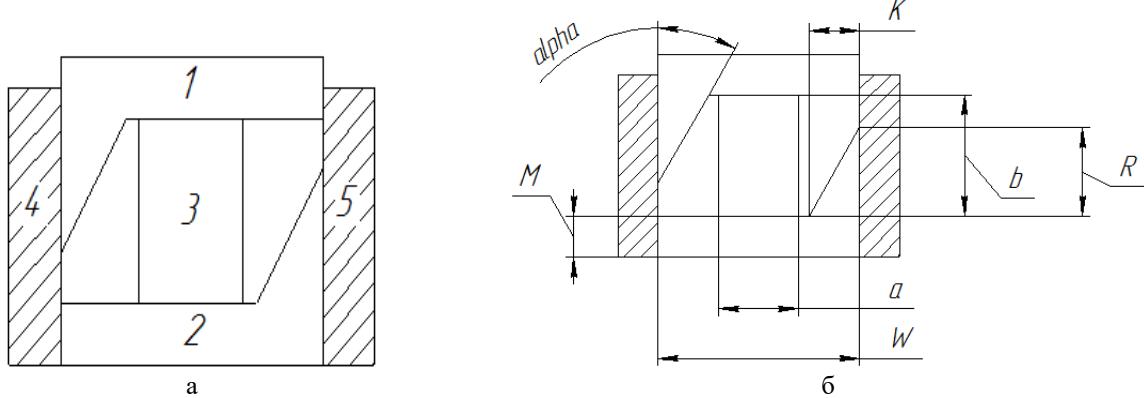


Рис. 1 – Расчетная модель процесса модифицированного реверсивного сдвига (РС): а – схема оснастки; б – параметры геометрической модели

Размеры пuhanсонов и внутреннего пространства матрицы зависят от размера обрабатываемой заготовки. Основными варьируемыми параметрами являются ширина заготовки, угол наклона граней пuhanсонов и рабочий ход пuhanсона. Для автоматизации проектирования технологического процесса ИПД по данной схеме РС разработана интегрированная САПР на базе CAE-системы

ABAQUS. Структура САПР (рис. 2) включает модули для создания расчетной модели и обработки результатов моделирования. Также в интегрированную САПР включена CAD-система (SolidWorks) для создания геометрических моделей инструмента и заготовки, которые затем используются для расчетов в CAE-системе.

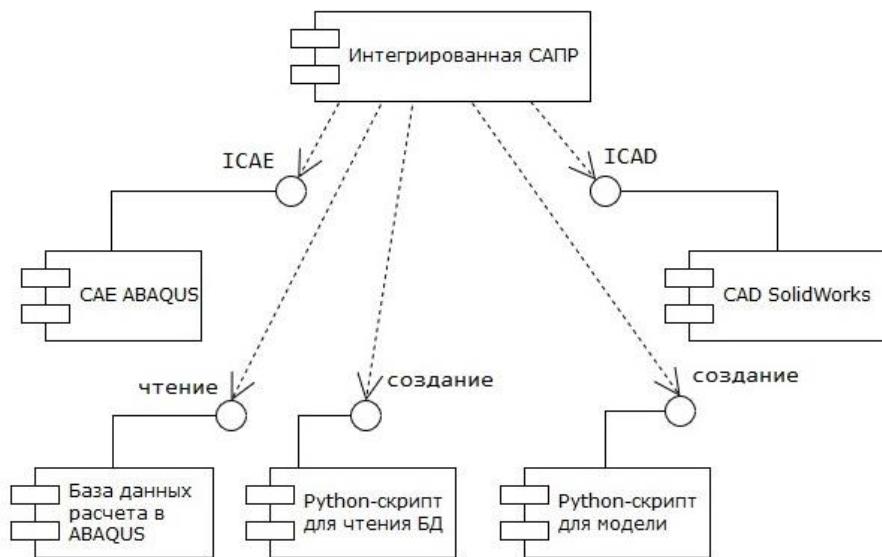


Рис. 2 – Структура интегрированной САПР для проектирования технологических процессов ИПД

В качестве задания на расчет в модуле, взаимодействующем с CAE-системой ABAQUS применяется параметризованный скрипт на языке Python, который обрабатывается пре-процессором и пост-процессором ABAQUS. Внешние модули САПР реализованы на языке программирования C# и обеспечивают ввод исходных размеров заготовки и ключевых параметров технологического процесса, включая базовые размеры параметрической модели инструмента.

После этого на основе параметрической модели производится расчет значений зависимых параметров геометрической модели оснастки и построение ее в CAE-системе.

При проектировании интегрированной САПР для технологического процесса ИПД разработана диаграмма классов (рис. 3), которая может быть применена для ряда процессов ИПД близких по конструктивным особенностям и набору инструментов к процессу РС.

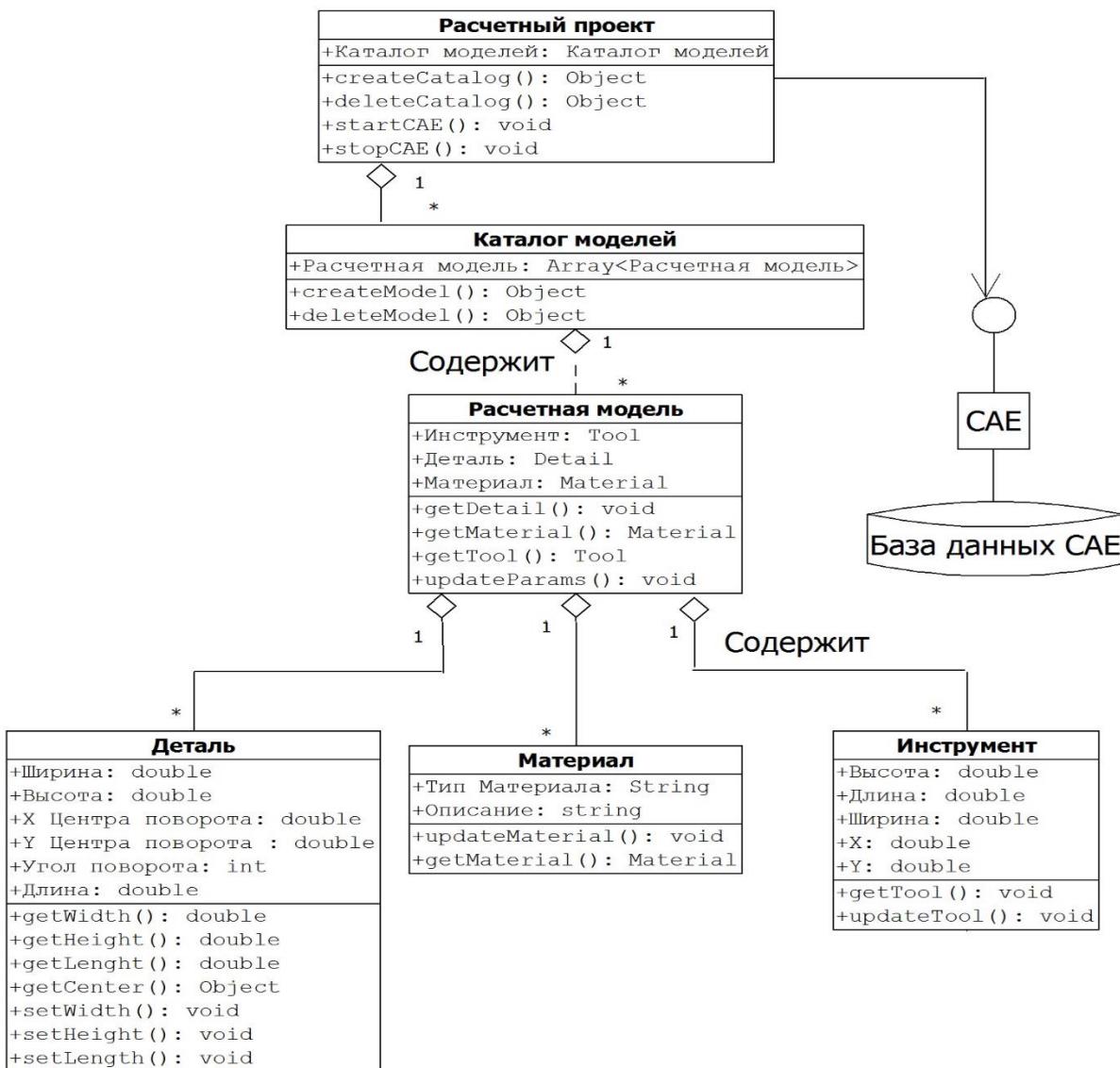


Рис. 3 – Диаграмма классов интегрированной САПР для проектирования технологического процесса ИПД

Разработка более общей интегрированной САПР, которая охватывала бы процессы ИПД для другого оборудования и существенно отличающейся оснастки, влечет за собой расширение структуры внешних модулей, включения каталогов, баз данных, обеспечивающих информационную поддержку проектирования штамповой оснастки под другие схемы и условия деформирования, формы заготовок, и т.д. (см. рис.2). В частности, в структуре САПР показан модуль, включающий Python-скрипт для

чтения базы данных CAE-системы ABAQUS и получения результатов моделирования для дальнейшей обработки.

По введенным размерам генерируется Python-скрипт, который содержит набор инструкций для формирования готового проекта расчетной модели технологического процесса. Важным компонентом скрипта является модель материала, которая обеспечивает адекватность моделирования. Интеграция с использованием скриптов позволяет

строить зависимости изменения параметров деформирования от времени расчета, прогнозировать результаты и др.

При реализации САПР была учтена особенность процессов ИПД, которая заключается в необходимости многоэтапного процесса деформирования заготовки со сменой направления деформирования. Для осуществления такого многоэтапного процесса расчетная модель включала 13 шагов расчета, причем только 4 из которых были связаны непосредственно с процессом

деформирования. Остальные использовались для поворота модели заготовки между операциями деформирования и установки ее в штамп с заданными углами поворота в пространстве.

Разработанная САПР (рис. 4) позволила автоматизировать построение расчетной модели технологического процесса ИПД по схеме модифицированного реверсивного сдвига в САЕ-системе ABAQUS и провести исследование влияния ряда технологических параметров на процесс деформирования.

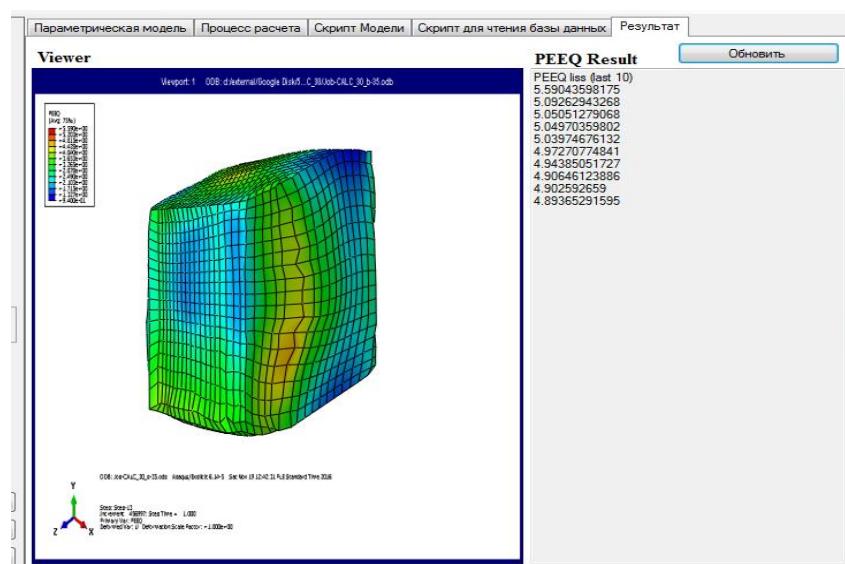


Рис. 4 – Интерфейс интегрированой САПР для процеса модифицированного реверсивного сдвига

Рассмотрим влияние основных технологических параметров на неравномерность деформации в объеме заготовки, поскольку в результате ИПД свойства по объему заготовки должны одинаковы. В процессе исследования моделировали деформацию двух заготовок из титана BT1-0 с размерами 35/20/25 и 40/20/25 (высота/длина/ширина) за 4 операции РС. Анализ результатов показал, что увеличение высоты заготовки приводит к увеличению неравномерности деформации на 20%.

Углы наклона деформирующей поверхности пuhanсонов принимали значения 30–45° с шагом 5°. При этом неравномерность деформации уменьшалась с каждой последующей операцией и незначительно зависит от угла наклона деформирующей поверхности инструмента.

Исследовали также два маршрута деформирования: 1) поворот всегда производился на 90° относительно оси у; 2) первый и третий повороты заготовки осуществляли на 90°, второй на –90°. Неравномерность деформации для первого маршрута деформирования оказалась ниже, чем для второго на 20 %.

Коэффициент трения на поверхности инструмента варьировали в пределах 0.2–0.4 по закону Кулона. Исследования показали, что увеличение трения приводит к увеличению неравномерности деформации на 30%.

Выводы. Таким образом, на примере реализованного внешнего модуля для САЕ-системы ABAQUS и CAD-системы SolidWorks показана принципиальная возможность создания интегрированных САПР на базе промышленных систем с использованием их открытых интерфейсов. Использование этих возможностей в виде скриптов с заданием на моделирование в САЕ-системе автоматизирует проведение исследований новых технологических процессов ОМД и позволяет сократить время при проектировании сложных конструкций штамповой оснастки.

Разработана САПР штамповой оснастки и моделирования процесса ИПД по модифицированной схеме реверсивного сдвига, что позволило исследовать влияние технологических параметров на процесс РС. В частности, установлено, что наибольшее влияние на неравномерность деформации в заготовке оказывает ее геометрия, маршрут деформирования и трение на контактных поверхностях.

Список литературы

1. *Rahulkumar Shivajirao Hingole. Advances in Metal Forming: Expert System for Metal Forming / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – 126 p.*
2. *Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.*

3. Estrin Y. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science/ Y. Estrin, A. Vinogradov // Acta Materialia. – 2013. – 61. – P. 782–817.
4. Puri, Gautam. Python Scripts for ABAQUS: learn by example. – Charleston, 2011 – 747 p.
5. 3D Parametric Modeling for Product Variants Using Case Study on Inner Ring of Spherical Roller Bearing / Ruchik D. Trivedi, Dhaval B. Shah, Kaushik M. Patel Procedia Engineering, 2013. – Vol.51. – pp. 709–714
6. GAJA: 3D CAD methodology for developing a parametric system for the automatic (re)modeling of the cutting components of compound washer dies / David Potocnik, Bojan Dolsak, Miran Ulbin. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 2013. – Vol.14 (5) – pp. 327–340.
7. Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням CAD/CAM/CAE-систем: монографія / О.Ф. Тарасов, О.В. Алтухов, П.І. Сагайда, Л.В. Васильєва, В.Л. Аносов. – Краматорськ: ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. – 239 с.
8. Patent 102513 Україна, МПК B21J 5/00, B21K 1/12. Способ інтенсивної пластичної деформації заготівки осадженням зі зміною напрямку деформування / О.Ф. Тарасов, С.О. Тарасов; Донбасская государственная машиностроительная академия. №a201505723; заявл. 10.06.2015; опубл. 10.11.2015, бюл. № 21.
2. Li, K. Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE). – SPb.: Piter, 2004. – 560 p.
3. Estrin Y. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science/ Y. Estrin, A. Vinogradov // Acta Materialia. – 2013. – 61. – P. 782–817.
4. Puri, Gautam. Python Scripts for ABAQUS: learn by example. – Charleston, 2011 – 747 p.
5. 3D Parametric Modeling for Product Variants Using Case Study on Inner Ring of Spherical Roller Bearing / Ruchik D. Trivedi, Dhaval B. Shah, Kaushik M. Patel Procedia Engineering, 2013. – Vol.51. – pp. 709–714.
6. GAJA: 3D CAD methodology for developing a parametric system for the automatic (re)modeling of the cutting components of compound washer dies / David Potocnik, Bojan Dolsak, Miran Ulbin. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 2013. – Vol.14 (5) – pp. 327–340.
7. Avtomatizovane proyektuvannya i vigotovlennya virobiv iz zastosuvannym CAD/CAM/CAE-sistem: monografiya / O.F. Tarasov, O.V. Altukhov, P.I. Sagayda, L.V. Vasileva, V.L. Anosov. – Kramators'k: TSTRÍ «Drukars'kiy dim», 2017. – 239 p.
8. Patent 102513 Ukrayina, MPK B21J 5/00, B21K 1/12. Sposob intensivnoi plastichnoi deformatsiyi zahotivky osadzhennym z zminoyu napryamku deformuvannya / O.F. Tarasov, S.O. Tarasov; Donbasskaya hosudarstvennaya mashynostroytel'naya akademyya. №a201505723; zayavl. 10.06.2015; opubl. 10.11.2015, byul. No 21.

Bibliography (transliterated)

1. Rahulkumar Shivajirao Hingole. Advances in Metal Forming: Expert System for Metal Forming / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. – 126 p.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розробка інтегрованої САПР технологічних процесів інтенсивного пластичного деформування на прикладі реверсивного зсуву / О.В. Алтухов, О.Ф. Тарасов, М.М. Піднебесний, А.О. Віnnіков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 5–10 – Бібліогр.: 8 назв.– ISSN 2519-2671

Разработка интегрированной САПР технологических процессов интенсивного пластического деформирования на примере реверсивного сдвига / А.В. Алтухов, А.Ф. Тарасов, Н.Н. Поднебесный, А.О. Винников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 5–10 – Бібліогр.: 8 назв.– ISSN 2519-2671

Development of integrated CAD for technological processes of severe plastic deformation using the example of reverse shear / A.V. Altukhov, A.F. Tarasov, N.N. Podnebesny, A.O. Vinnikov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 5–10. – Bibl.: 8. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Алтухов Олександр Валерійович – кандидат технічних наук, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, старший викладач кафедри комп'ютерних інформаційних технологій; тел.: (0626) 41-86-55; e-mail: tsl@ukr.net

Алтухов Александр Валерьевич – кандидат технических наук, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, старший преподаватель кафедры компьютерных информационных технологий; тел.: (0626) 41-86-55; e-mail: tsl@ukr.net

Altukhov Alexander Valerievich – Candidate of Technical Sciences, Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Senior lecturer of the Department of Computer Information Technologies; tel.: (0626) 41-86-55; e-mail: tsl@ukr.net

Тарасов Олександр Федорович – доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія, м Краматорськ, завідувач кафедри комп'ютерних інформаційних технологій; тел.: (0626) 41-86-55; e-mail: alexandrtar50@gmail.com

Тарасов Александр Федорович – доктор технических наук, профессор, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, заведующий кафедрой компьютерных информационных технологий; тел.: (0626) 41-86-55; e-mail: alexandrtar50@gmail.com

Поступила (received) 14.11.2017

Tarasov Alexander Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Head of the Department of Computer Information Technologies; tel.: (0626) 41-86-55; e-mail: alexandrtar50@gmail.com

Піднебесний Микола Миколайович – Донбаська державна машинобудівна академія, м Краматорськ, магістр кафедри комп'ютерних інформаційних технологій; тел.: (0626) 41-86-55; e-mail: kit@dgma.donetsk.ua

Поднебесный Николай Николаевич – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, магистр кафедры компьютерных информационных технологий; тел.: (0626) 41-86-55; e-mail: kit@dgma.donetsk.ua

Podnebesny Nikolai Nikolaevich – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Master of Computer Information Technologies Department; tel.: (0626) 41-86-55; e-mail: kit@dgma.donetsk.ua

Віnnіков Артем Олегович – Донбаська державна машинобудівна академія, м Краматорськ, магістрант кафедри комп'ютерних інформаційних технологій; тел.: (0626) 41-86-55; e-mail: kit@dgma.donetsk.ua

Vinnikov Artem Olegovich – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Master of Computer Information Technologies Department; tel.: (0626) 41-86-55; e-mail: kit@dgma.donetsk.ua

Віnnіков Артем Олегович – Донбаська державна машинобудівна академія, м Краматорськ, магістрант кафедри комп'ютерних інформаційних технологій; тел.: (0626) 41-86-55; e-mail: kit@dgma.donetsk.ua

Vinnikov Artem Olegovich – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Master of Computer Information Technologies Department; tel.: (0626) 41-86-55; e-mail: kit@dgma.donetsk.ua

УДК 621.771.01

Э.П. ГРИБКОВ, Е.Ю. ГАВРИЛЬЧЕНКО

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАСТРОЕК ЛИСТОПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Розглянута методика визначення параметрів процесу правки листів, відмінною рисою якої є облік вигину робочих роликів і його вплив на виправлення дефекту хвильястості. Методика заснована на спільному використанні інженерної та регресійної моделей, отриманих в результаті реалізації скінчено-елементної моделі правки хвильястості листів. Даний підхід дозволяє знизити час розрахунку параметрів листоправильної машини. Отримано оптимальні значення коефіцієнта проникнення пластичної деформації, налаштувань машини, а також величини вигину робочого ролика для досягнення регламентованої стандартами хвильястості листів.

Ключові слова: товстолистовий металопрокат, правка, напружено-деформований стан, математичне моделювання, якість, листоправильна машина.

Рассмотрена методика определения параметров процесса правки листов, особенностью которой является учёт изгиба рабочих роликов и его влияние на исправление дефекта волнистости. Методика основана на совместном использовании инженерной и регрессионной моделей, полученных в результате реализации конечно-элементной модели правки волнистости листов. Данный подход позволяет снизить время расчета настроек листоправильной машины. Получены оптимальные значения коэффициента проникновения пластической деформации, настройки машины, а также величины изгиба рабочего ролика для достижения регламентированной стандартами волнистости листов.

Ключевые слова: толстолистовой металопрокат, правка, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование, качество, листоправильная машина.

The paper considers the method of determining the parameters of the sheets leveling, a distinguishing feature of which is the inclusion of a working roll bending and its impact on the correction of the defect waviness. The method is based on the joint use of an engineering model levelling the curvature of sheets and descriptions of regression resulting from the implementation of the finite element model changes waviness. This approach reduces the calculation time settings leveler. Optimum values of the coefficient of plastic deformation penetration, leveler settings, as well as the value of the bending of the working roller to achieve the standards regulated waviness of the sheets were obtained. From the analysis of the obtained dependences it can be concluded that the band waviness decreases with increasing bending and overlapping of the rollers. The calculations show that with a large waviness of the order of 60 mm / m, a single curvature of the rollers achieves the required undulation of the edges ($A < 8 \text{ mm} / \text{m}$) is not possible. The most significant factor here is the decrease in the parameter W / h to a level of 0.25, which is achieved, as a rule, by a third roller and is limited by the normalized coefficient of plastic deformation penetration. However, it is sufficient to bend a single roller in the majority of cases to ensure the quality normalized by the corrugation of the sheets, and for sheets 4 ... 14 mm thick with a width of 1000 ... 2000 mm, the amount of curvature required for straightening the edge curvature of the rollers does not exceed 2.0 mm.

Keywords: thick plate, leveling, stress-strain state, mathematical modeling, quality, leveler.

Введение. Листовой металлоканат является основной металлопродукцией, потребляемой промышленностью Украины и повышение его качества является актуальной задачей. На заключительном этапе производства лист подвергается правке на многороликовых листоправильных машинах, параметры и настройки которых определяют его качество, в частности, планшетность. Тенденция совершенствования листоправильных машин заключается в расширении их технологических возможностей за счет изгиба рабочих роликов, что позволяет устранить дефекты не только в продольном, но и в поперечном направлении. В то же время технологические режимы правки для такого типа машин носят эмпирический характер и требуют развития соответствующих систем автоматизированного проектирования.

Анализ публикаций. Правка листов является одним из важных этапов получения качественной металлопродукции. Повышение требований к геометрическим характеристикам листопрокатной продукции определяет развитие листоправильных машин с точки зрения повышения эффективности процесса и расширения их возможностей для реализации правки не только продольной кривизны, но и волнистости, что возможно при использовании изгиба рабочих роликов [1]. Указанное делает актуальным развитие математических моделей процесса правки для определения необходимых настроек листоправильной машины.

Основная задача математического описания процесса правки листового металлоканата заключается в определении энергосиловых параметров, необходимых для проектирования оборудования и в определении остаточной кривизны листа, необходимой для определения технологических настроек машины. В качестве методов моделирования используются численные и конечно-элементные модели. Численные модели обладают высоким быстродействием, что позволяет им использовать в автоматической системе управления [2–3]. Конечно-элементные модели требуют больших затрат машинного времени на расчет, но позволяют получать более точные результаты с широким учетом влияния факторов на процесс [4–5]. Во всех работах, посвященных моделированию правки листов отмечается преимущественное влияние свойств материала на протекание процесса. Существующие модели процесса правки листового проката не учитывают влияние изгиба рабочих роликов на распределение деформации по ширине листа и, как следствие, исправление дефекта волнистости. Это делает актуальным дальнейшее развитие математических моделей с представлением деформируемого металла в трехмерном пространстве и последующим анализом влияния технологических настроек рабочих роликов на плоскость управляемого проката.

Цель и постановка задачи. Целью работы является совершенствование математической модели процесса правки листового металлоканата и

создание на её основе системы автоматизированного расчета технологических настроек листоправильной машины с дифференцированным приложением силы правки по ширине проката.

Автоматизированное проектирование технологических настроек листоправильной машины. Математическая модель процесса правки, а также ее программная реализация в своей совокупности позволяет определять энергосиловые параметры процесса правки исходя из известных параметров выпрямляемого металла и листоправильной машины [6].

Следует отметить, что разработанный алгоритм математической модели позволяет определять требуемую для исправления продольной кривизны технологическую настройку правильной машины, что сводится к определению настроек координат каждого из подвижных роликов в зависимости от известных параметров выпрямляемого металла, геометрических параметров листоправильной машины, а также допускаемого значения остаточной кривизны металла после правки. При этом особенностью данной модели является возможность применения такой настройки роликов листоправильной машины, при которой исправляется дефект, связанный с разным удлинением волокон по ширине листа.

Изучая опыт эксплуатации оборудования, для облегчения задачи металла в правильную машину первый по ходу металла ролик – верхний целесообразно устанавливать на толщину металла, а значение прогиба металла первыми роликами на входе в машину соответствует:

$$f_3 = \frac{\sigma_s t^3}{KEh}, \quad (1)$$

где σ_s – предел прочности материала полосы, подвергаемой правке, МПа;

t – шаг роликов правильной машины, мм;

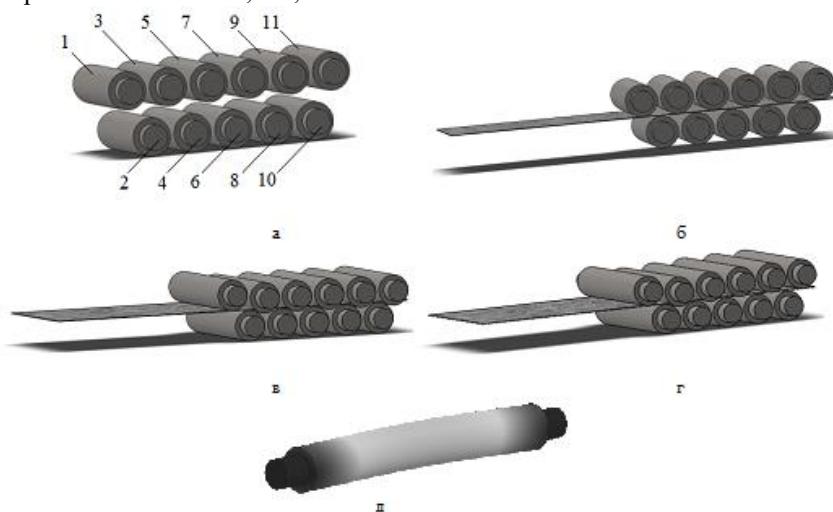


Рис. 1 – Расчтная схема к алгоритму автоматизированного проектирования технологической настройки многороликовой листоправильной машины: а – все нижние ролики лежат в одной плоскости на уровне правки; б – верхние ролики на расстоянии от нижних, равном толщине выпрямляемого металла; в – верхние ролики, начиная со 2-го, опускаются на величину, равную расчетному прогибу f_3 ; г – верхние ролики, начиная с № 5, начинают приподнимать на величину, равную точности позиционирования осей роликов имеющимся нажимным механизмом; д – обеспечивается изгиб валка ΔW_i

E – модуль упругости, МПа;

h – толщина полосы, подвергаемой правке на листоправильной машине, мм;

K – коэффициент проникновения пластической деформации.

В качестве исходных данных были использованы следующие: диаметр роликов d листоправильной машины; шаг роликов t листоправильной машины; количество n роликов, а также их особенность расположения; толщина листа h , физико-механические свойства материала листа, его предел текучести и коэффициенты, описывающие кривую упрочнения; исходная кривизна листа; заданный коэффициент проникновения пластической деформации; максимально допустимая кривизна листа после правки.

Под особенностями расположения правильных роликов подразумевается порядок их расположения в верхней и нижней кассетах (верхний или нижний ролики первый по ходу движения металла), возможность регулирования положения входного и выходного роликов, параллельная, наклонная или индивидуальная настройка остальных роликов и расположение регулируемых роликов – в верхней или нижней кассетах.

Основываясь на указанных предпосылках, полученных из опыта эксплуатации и, используя вышеприведенные исходные данные, был разработан следующий алгоритм автоматизированного проектирования технологической настройки многороликовой листоправильной машины, приведенный для конструкции с возможностью правки листов с волнистостью:

На первом этапе для всего цикла проектирования все нижние ролики лежат в одной плоскости на уровне правки (рис. 1, а), а верхние ролики устанавливаются на расстоянии от нижних, равном толщине выпрямляемого металла (см. рис. 1, б).

На втором этапе первый ролик остается без изменений, а последующие верхние ролики, начиная со 2-го, опускаются на величину, равную расчетному прогибу f_3 (см. рис. 1, в).

Третий этап заключается в моделировании процесса правки для полученных координат правильных роликов. Происходит проверка, которая заключается в следующем: когда кривизна металла на выходе из машины меньше или равна допускаемой, проектирование завершается, настройка считается приемлемой. Если же кривизна полосы на выходе из листоправильной машины превышает допустимое значение, то ролики № 1 и 3 остаются на месте, а верхние ролики, начиная с № 5, начинают

приподнимать на величину, равную точности позиционирования осей роликов имеющимся нажимным механизмом (см. рис. 1, г). Для полученных координат снова производится повтор, начиная с третьего этапа.

После того, как остаточная продольная кривизна χ_1 листа войдет в допускаемый интервал кривизны, проверяется показатель формы листа Φ_1 и в случае необходимости проводят изгиб валка ΔW_i (см. рис. 1, д).

Укрупненная блок-схема данного алгоритма решения показана на рис. 2.

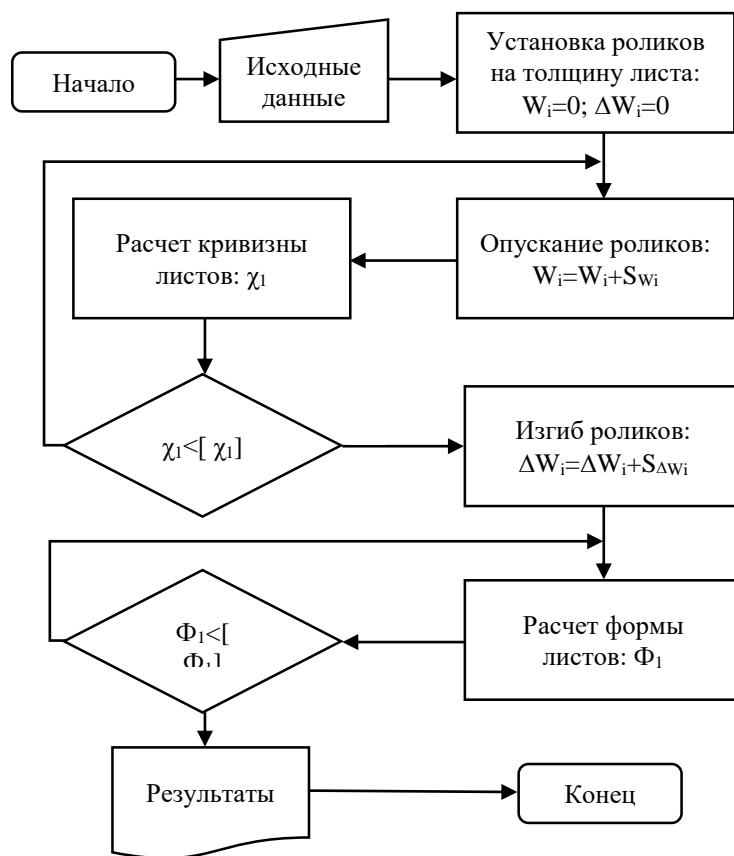


Рис. 2 – Укрупненная блок-схема алгоритма автоматизированного расчета технологической настройки многороликовой листоправильной машины

Для проверки адекватности разработанного алгоритма автоматизированного расчета технологической настройки многороликовой листоправильной машины был проведен ряд расчетов для различного типоразмера листов из различных материалов. На основе расчетных распределений остаточной кривизны листов для диапазона толщин от 4 мм до 16 мм установлено что при увеличении угла наклона верхней траверсы остаточная кривизна уменьшается до своего минимального значения, близкого к нулю, а затем наблюдается ее бессистемное хаотичное изменение с резким увеличением. Из представленных распределений видно, что с увеличением толщины выправляемого металла для достижения заданной остаточной

кривизны листа угол наклона верхней траверсы увеличивается. Анализ зависимостей показывает наличие единственного экстремума результирующей кривизны листа и подтверждает правомерность используемого алгоритма и дальнейшего его использования для расчётов.

На основе описанного алгоритма были произведены исследования по проектированию технологических настроек для различных геометрических параметров выправляемого листа и анализ полученных настроек в зависимости от исходных параметров процесса. Пример полученных расчетных распределений показан на рис. 3.

Из проведенных расчётов для различных типоразмеров и анализа графика, видно, что

оптимальное значение коэффициента проникновения упругой деформации лежит в диапазоне от 4...4,5, причем меньшее значение относится к меньшей толщине проката.

Применение программной реализации описанной математической модели с точки зрения многокритериального поиска экстремумов для нахождения наиболее адекватных параметров технологических процессов для заданных исходных характеристик механического оборудования и сортамента выправляемого металлопроката позволяет выбрать такой набор технологических настроек, при котором, с одной стороны, достигается

минимальный прогиб листа и, соответственно, минимальная величина силы и момента правки, что является актуальным для решения задач расширения сортамента обрабатываемого металлопроката на существующих листоправильных машинах с ограниченными технологическими возможностями, а с другой стороны, нахождения настроек, обеспечивающих наилучшее качество готовой продукции на современных листоправильных машинах, способных реализовать индивидуальную настройку правильных роликов, включая учет показателей плоскости листа.

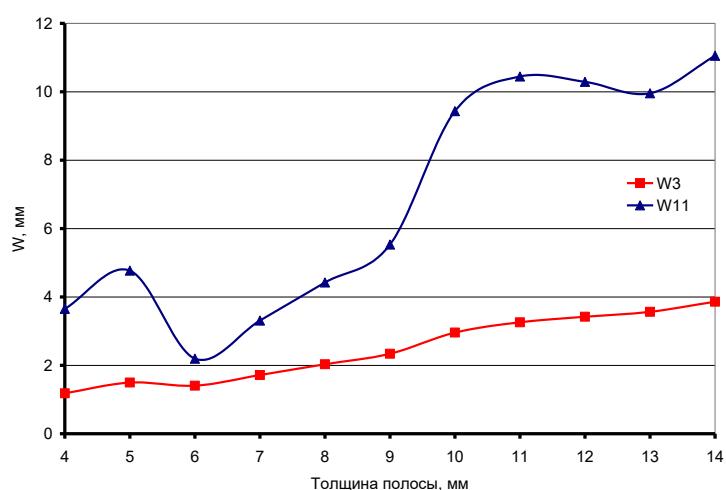


Рис. 3 – Зависимость положения третьего W3 и одиннадцатого W11 роликов от толщины полосы

На рисунке 4 представлены результаты расчета применительно к процессу правки полосы толщиной от 4 до 14 мм при фиксированном перекрытии роликов на величину 3,5 мм, то есть при различных отношениях W/h (от 0,875 до 0,214) и одинаковой величине волнистости равной $A=60$ мм/м. Из анализа данных зависимостей можно сделать вывод об уменьшении волнистости полосы при увеличении изгиба и перекрытия роликов. При этом расчеты показывают, что при данной волнистости

однократным изгибом роликов достичь требуемую волнистость кромок ($A < 8$ мм/м) не представляется возможным. Наиболее значимым фактором при этом является уменьшение параметра W/h до уровня 0,25, который достигается, как правило, третьим роликом и ограничивается нормируемым коэффициентом проникновения пластической деформации. При этом, как показывают расчеты требуемый уровень плоскостности ($\Phi=0,1\dots1,0$) можно достичь изгибом рабочих роликов на уровне 1,5...2,0 мм.

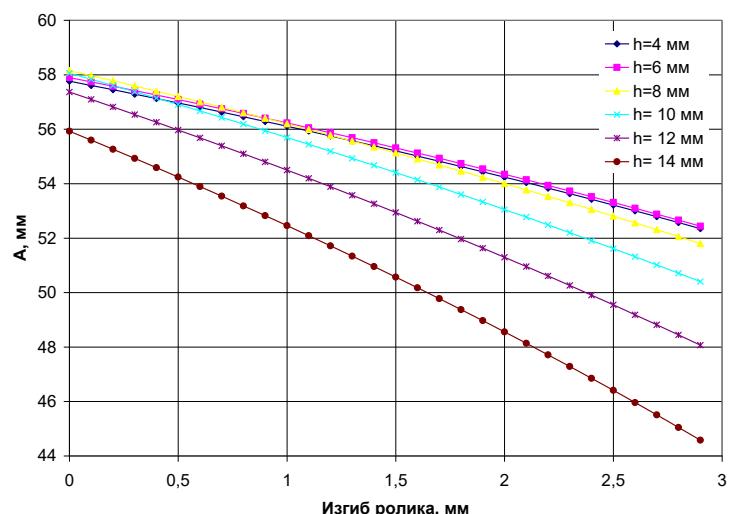


Рис. 4 – Зависимость амплитуды краевой волнистости полосы от изгиба рабочих роликов

Выводы. На основе исследования влияния установки и изгиба рабочих роликов листоправильной машины на качество правки разработан комплекс математических моделей процесса правки листов с дифференцированным приложением силы по ширине проката, включающий аналитическую, конечно-элементную и регрессионную модели. В результате реализации которых установлено, что изгиб рабочего ролика влияет на исправление дефекта волнистости листа. В частности, для обеспечения нормируемого стандартами качества по волнистости листов достаточно в большинстве случаев изгиба одного ролика, причем для листов толщиной 4...14 мм при ширине 1000...2000 мм – величина требуемого для правки краевой волнистости изгиба роликов не превышает 2,0 мм.

Список литературы

- Шинкин В. Н. Расчет технологических параметров правки стального листа на одиннадцатироликовой листоправильной машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate / В. Н. Шинкин // Производство проката. – 2014. – № 8. – С. 26–34.
- Слоним А. З. Правка листового и сортового проката / А. З. Слоним, А. Л. Сонин. – М. : Металлургия, 1981. – 232 с.
- Недорезов И. В. Роликовые правильные машины АО «Уралмаш» и пути их совершенствования / И. В. Недорезов, Б. Я. Орлов, А. Х. Винокурский // Труды первого Конгресса прокатчиков. Магнитогорск, 23–27 октября, 1995. – М., 1996. – С. 38–42.
- Park K. Development of a Finite Element Analysis Program for Roller Leveling and Application for Removing Blanking Bow Defects of Thin Steel Sheet / K. Park, S. Hwang // ISIJ International. – Vol. 42 (2002), No. 9. – pp. 990–999. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.42.990>.
- Cui L. Analysis of Leveling Strategy for a plate Mill / L. Cui, X Hu, X. Liu // Advanced Materials Research. – Vol. 145 (2011). – pp. 424–428. <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.145.424>.

- pp. 424–428. <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.145.424>.
- Математическая модель технологических настроек ЛПМ ТЛС 2850 Ашинского металлургического завода для горячей и холодной правки листов / В. А. Федоринов, А. В. Барабаш, Е. Ю. Гаврильченко, Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 48–53.

Bibliography (transliterated)

- Shinkin V. N. Calculation of the technological parameters of straightening the steel sheet at 11-roll leveler transverse cutting line firm [Raschet tehnologicheskikh parametrov pravki stal'nogo lista na odinnadcatirolikovoj listopravil'noj mashine linii poperechno rezki firmy Fagor Arrasate] / V. N. Shinkin // Proizvodstvo prokata. – 2014. – № 8. – pp. 26–34.
- Slonim A. Z. Leveling sheet and long products [Pravka listovogo i sortovogo prokata] / A. Z. Slonim, A. L. Sonin. – Moscow : Metallurgija, 1981. – 232 p.
- Nedorezov I. V. Roller straightening machines JSC "Uralmash" and ways to improve them [Rolikovye pravil'nye mashiny AO «Uralmash» i puti ih sovershenstvovaniya] / I. V. Nedorezov, B. Ja. Orlov, A. H. Vinokurskij // Trudy pervogo Kongressa prokatchikov. Magnitogorsk, 23–27 oktyabrya, 1995. – Moscow : 1996. – pp. 38–42.
- Park K. Development of a Finite Element Analysis Program for Roller Leveling and Application for Removing Blanking Bow Defects of Thin Steel Sheet / K. Park, S. Hwang // ISIJ International. – Vol. 42 (2002), No. 9. – pp. 990–999. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.42.990>.
- Cui L. Analysis of Leveling Strategy for a plate Mill / L. Cui, X Hu, X. Liu // Advanced Materials Research. – Vol. 145 (2011). – pp. 424–428. <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.145.424>.
- Mathematical model of technological settings of the LPM TLS 2850 Ashinsky Metallurgical Plant for hot and cold edging sheets [Matematicheskaja model' tehnologicheskikh nastroek LPM TLS 2850 Ashinskogo metallurgicheskogo zavoda dlja gorjachej i holodnoj pravki listov] / V. A. Fedorinov, A. V. Barabash, E. Ju. Gavril'chenko, Je. P. Gribkov // Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2014. – № 1(38). – pp. 48–53.

Поступила (received) 15.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Автоматизоване проектування технологічних налаштувань листоправильної машини / Е. П. Грибков, Є.Ю. Гаврильченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 11–16 – Біблиогр.: 6 назв.– ISSN 2519-2671

Автоматизированное проектирование технологических настроек листоправильной машины / Е. П. Грибков, Е. Ю. Гаврильченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 11–16 – Біблиогр.: 6 назв.– ISSN 2519-2671

Aided-design of the leveler technological settings / E. P. Gribkov, E. Yu. Gavrilchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 11–16. – Bibl.: 6. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Грибков Едуард Петрович – доктор технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, доцент кафедри автоматизованих металургійних машин і обладнання; тел.: (0626) 41-46-81; e-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Грибков Эдуард Петрович – доктор технических наук, доцент, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, доцент кафедры автоматизированных металургических машин и оборудования; тел.: (0626) 41-46-81; e-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Gribkov Eduard Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Docent, Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Associate Professor at the Department of Automated Metal Forming Process and Machinery; tel.: (0626) 41-46-81; e-mail: amm@dgma.donetsk.ua

Гаврильченко Євген Юрійович – начальник бюро агрегатних ліній дивізіону прокатного обладнання ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», м. Краматорськ; тел.: (06264) 7-82-39; e-mail: bbps@nkmz.donetsk.ua.

Гаврильченко Евгений Юрьевич – начальник бюро агрегатных линий дивизиона прокатного оборудования ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск; тел.: (06264) 7-82-39; e-mail: bbps@nkmz.donetsk.ua

Gavril'chenko Evgeniy Yurevich – Chief of Bureau of aggregate division lines rolling equipment of PJSC "Novokramatorsky Mashinostroitelny Zavod", Kramatorsk; tel.: (06264) 7-82-39; e-mail: bbps@nkmz.donetsk.ua

УДК 621.771.06

**А.В. ГРИЦЮК, А.П. МАРЧЕНКО, Ю.Д. МУЗЫКИН, В.В. ТАТЬКОВ, А.Г. НИКОЛЕНКО,
А.Н. ЧИСТЯКОВ, В.А. КРЕЧМАН**

ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ПРОМАСЛИВАНИЯ ХОЛОДНОГО ПРОКАТА

Рассмотрены требования, предъявляемые к консервационным смазкам при нанесении их на поверхность холоднокатанного листа методом распыления, и показано, что качество масляной пленки зависит от стабильности поддержания температуры масла в зоне распыла. В случае термостатирования в гидробаке предложены перегородки в виде маслонагревателя с позисторными нагревательными элементами. В случае термостатирования смазочной жидкости непосредственно в потоке перед выходом в форсунку используется малогабаритный нагреватель проточного типа. Контроль и настройка нагревательных устройств осуществляется с помощью контроллера, сигналы которого через интерфейс фиксируются, обрабатываются и архивируются. Показаны способы реализации данного требования в зависимости от технологических и эксплуатационных условий холодной прокатки. Предложенные технические решения для термостатирования смазочных жидкостей прошли апробацию в цехе ЦХП-1 металлургического комбината ПАО «Запорожсталь».

Ключевые слова: антикоррозионные смазки, холодный прокат, промасливание, термостатирование, теристоры, нагреватели.

Розглянуті вимоги, котрі пред'являються до консерваційних мастил при нанесенні їх на поверхню холоднокатаного листа методом розпилю, і вказано, що якість мастильної плівки залежить від стабільності підтримання температури мастила у зоні розпилю. У випадку термостатування у гідробакі запропоновані перегородки виглядом мастилонагрівачів з позисторними нагріваючими елементами. У випадку термостатування мастильної рідини безпосередньо у потоці перед входом у форсунку використовуються малогабаритні нагрівачі проточного типу. Контроль та настроювання нагрівального обладнання виконується за допомогою контролера, сигналі якого через інтерфейс фіксуються, оброблюються та архівуються. Показані способи реалізації цієї вимоги в залежності від технологічних та експлуатаційних вимог холодної прокатки. Наведені технічні рішення для термостатування мастильних рідин, котрі пройшли випробування у цеху ЦХП-1 металургійного комбінату ПАО «Запоріжсталь».

Ключові слова: антикорозійні мастила, холодний прокат, покриття мастилом, підтримання температури, терістори, нагрівачі.

The requirements for conservation lubrications applied to the surface of a cold rolled sheet by spraying are considered and it is shown that the quality of the oil film depends on the stability of maintaining the oil temperature in the spray zone. In the case of thermostating in the hydraulic tank, we offer partitions in the form of a oil heater with posistor heating elements. In the case of thermostating the lubricating liquid directly in the flow, a small-sized, flow-through type heater is used before leaving the nozzle. Monitoring and adjustment of heating devices is carried out with the help of the controller, whose signals through the interface are fixed, processed and archived. The ways of realization of this requirement are shown depending on the technological and operating conditions of cold rolling. The proposed technical solutions for the thermostating of lubricating fluids have been tested in the workshop of the refinery in the metallurgical plant of PJSC Zaporizhstal.

Keywords: anticorrosive lubricants, cold rolling, oiling, thermostating, thyristors, heaters.

Введение. Одной из финишных операций технологического процесса холодной прокатки углеродистого листа является консервация его поверхности посредством промасливания. Промасливание уменьшает образование продуктов коррозии и при соблюдении требований к упаковке, транспортированию и хранению проката гарантирует отсутствие коррозии в течение не менее трех месяцев после изготовления продукции. Реально срок действия защиты проката от коррозии промасливанием зависит от многих параметров, большинство из которых недетерминированы. Первоначально равномерно нанесенная масляная пленка со временем становится неравномерной и на поверхности проката появляются незащищенные маслом участки. Скорость образования этих участков, в значительной степени, зависит как от климатических и атмосферных условий, так и от условий хранения, которые строго не определены и могут изменяться в широком диапазоне. Кроме того, устойчивость защитной антикоррозионной пленки зависит от качества ее нанесения, которая может быть проконтролирована и характеризуется массой масла, нанесенного с одной или двух сторон проката,

выраженной в граммах на один квадратный метр поверхности [1, 2].

В случае, если требуется повышенная степень защиты против образования продуктов коррозии, применяется пассивирование и промасливание. При поставках проката в рулонах в районы Крайнего Севера и приравненной к ним местности консервация промасливанием обязательна. Поэтому по требованию потребителя завод обязан предоставлять информацию о способе консервации поверхности, а также марке и расходе масла при промасливании.

Цель работы, постановка задачи. Нанесение консервационных и рабоче-консервационных масел на поверхность холоднокатанного листа может осуществляться погружением, распылением или в электростатическом поле. При этом масла наносят или нагретыми до температуры порядка 70°C или без подогрева при температуре не ниже 15°C [1]. В случае широкой номенклатуры холоднокатанного листа, консервационная смазка наносится, как правило, распылением, как наиболее универсальным методом. Однако, для эффективной реализации указанного метода необходимо строгое соблюдение двух условий: поддержание заданной температуры масла в

форсунке распыла и обеспечение скорости истечения масла из форсунки. Только при соответствии указанных параметров рабочим требованиям будет обеспечен точный и равномерный слой наносимого антикоррозионного покрытия за счет получения мелких и равномерно распределенных частиц. Значение рабочих температур и скоростей истечения для каждого вида консервационных смазок устанавливается экспериментально в процессе эксплуатации прокатного оборудования. Отклонение этих параметров от рабочих значений не допускается, так как их понижение приводит к неравномерности смазочного слоя, а повышене – к отклонению толщины слоя смазки и снижению степени промасливания.

Таким образом, для эффективного выполнения технологического процесса промасливания, путем распыления на поверхность холоднокатанного листа консервационного покрытия, необходимо обеспечить стабильное поддержание температуры смазки в зоне форсунки при любых изменениях внешних условий. Реализация этого требования возможна при наличии современных нагревательных устройств, которые обладают высокими техническими характеристиками и обеспечивают экономический эффект.

Материалы исследований. Стабилизация температуры консервационной смазки в момент ее попадания в форсунку может быть осуществлена двумя способами: либо нагревом масла в гидробаке, либо непосредственным нагревом потока масла перед его входом в форсунку. Применение каждого из указанных способов определяется как в зависимости от технологических требований получения консервационной смазки, так и от конструктивных особенностей гидросистемы [3]. Первый способ применяют в тех случаях, когда гидростанция расположена вблизи участка промасливания, что исключает существенное изменение температуры по длине маслопровода. В этом случае удается создать простую и надежную маслонагревательную

установку, обслуживание которой не вызывает затруднений. Второй способ применяют, когда форсунки удалены от гидростанции на значительное расстояние, либо условия эксплуатации связаны с неотапливаемыми помещениями или открытыми участками при низких температурах окружающей среды.

В обоих случаях для терmostатирования смазочной жидкости предлагается использовать позисторные нагревательные элементы (ПНЭ), конструктивное оформление которых определяется местом их установки. Основным элементом ПНЭ является позисторная керамика, отличительной особенностью которой является линейная пропорциональная связь между температурой керамического элемента и его электрическим сопротивлением. Эта связь позволяет создать саморегулирующие нагревательные устройства, поддержание постоянной температуры которых автоматически регулируется изменением силы тока до уровня, необходимого для сохранения заданной температуры. В результате устанавливается термодинамическое равновесие между количеством тепла генерируемого нагревательным элементом и теплоотводом, который зависит от параметров нагреваемой среды. Разрешающая способность этой связи иллюстрируется следующим параметром: при изменении температуры от +12°C до +160°C электрическое сопротивление керамического элемента возрастает на порядок [4]. Таким образом, использование ПНЭ позволяет существенно упростить систему контроля за процессом нагрева и электрорегулирования, так как эти процессы происходят в автоматическом режиме.

При терmostатировании консервационного масла в гидробаке позисторный нагревательный элемент выполняют в виде отдельного законченного узла, готового к установке на пластину радиатора (рис. 1).

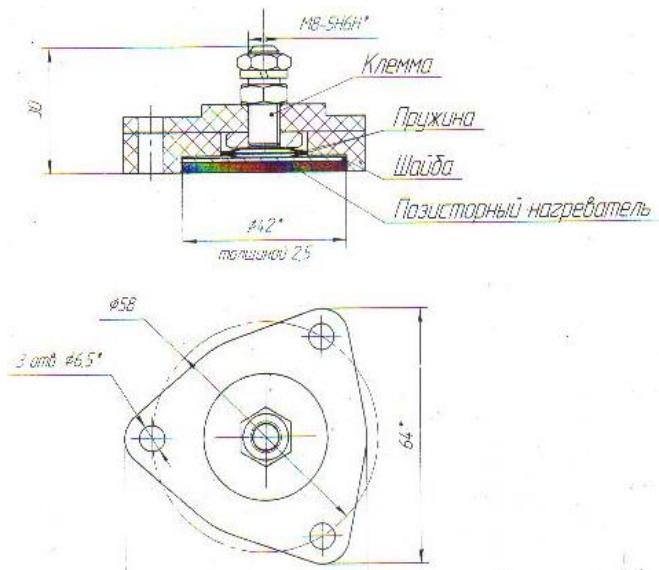


Рис. 1 – Позисторний нагревательний элемент ПНЭ

Нагреватель ПНЭ включает в себя малогабаритный цилиндрический плоский корпус, в котором расположен керамический элемент, представляющий собой саморегулируемый позистор с неограниченным временем работы, который за счет изменения сопротивления при нагреве автоматически снижает ток питания.

Представленный нагревательный элемент может использоваться только в гидросистемах, заправленных нетокопроводящей жидкостью при

условии обязательного ее наличия, так как отсутствие активного отбора тепла приводит к их разрушению нагревательных элементов. Кроме того, терmostатируемая жидкость должна обязательно проходить фильтрацию, так как наличие металлических частиц с размером 0,5...1 мм также приводит к нарушению работы позистора. Основные технические параметры, определяющие условия работы нагревательного элемента, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Технические характеристики позисторного нагревательного элемента (ПНЭ)

Параметр	Единица измерения	Значение
Температура нагрева масла	°C	25...27
Напряжение электропитания	V	±25
Сопротивление при температуре 20°C	Ом	0,2...0,03
Ток включения	A	25±20
Ток при длительной рабочей температуре	A	5±10
Температура переключения нагревательного элемента	°C	140±10
Время выхода на рабочий режим при температуре окружающей среды -25°C	мин	10±2

Пример установки нагревателей ПНЭ на радиаторные пластины и компоновка их в секции представлена на рис. 2. Секция представляет собой коробчатую конструкцию, включающую три радиаторные пластины, на каждой из которых установлено по четыре нагревательных элемента. Секция монтируется в гидробаке как перегородка на пути течения потока масла и является самостоятельным элементом со строго определенными функциями и условиями эксплуатации: перегородка бака маслонагревательная позисторного типа (ПБМНПТ). Источник питания нагревателя питания ПБМНПТ содержит силовой

трехфазный трансформатор мощностью 6,3 кВт с выходным эффективным напряжением 20 ± 2 В и три трехфазных выпрямителя с максимальным выходным током по 160 А. Представленная маслонагревательная перегородка рассчитана для установки в гидробак с объемом порядка 2 м³.

Для терmostатирования консервационных смазок непосредственно в потоке перед входом в форсунку используется малогабаритный нагреватель проточного типа (МНПТ), который позволяет обеспечить высокую точность поддержания температуры (рис. 3).

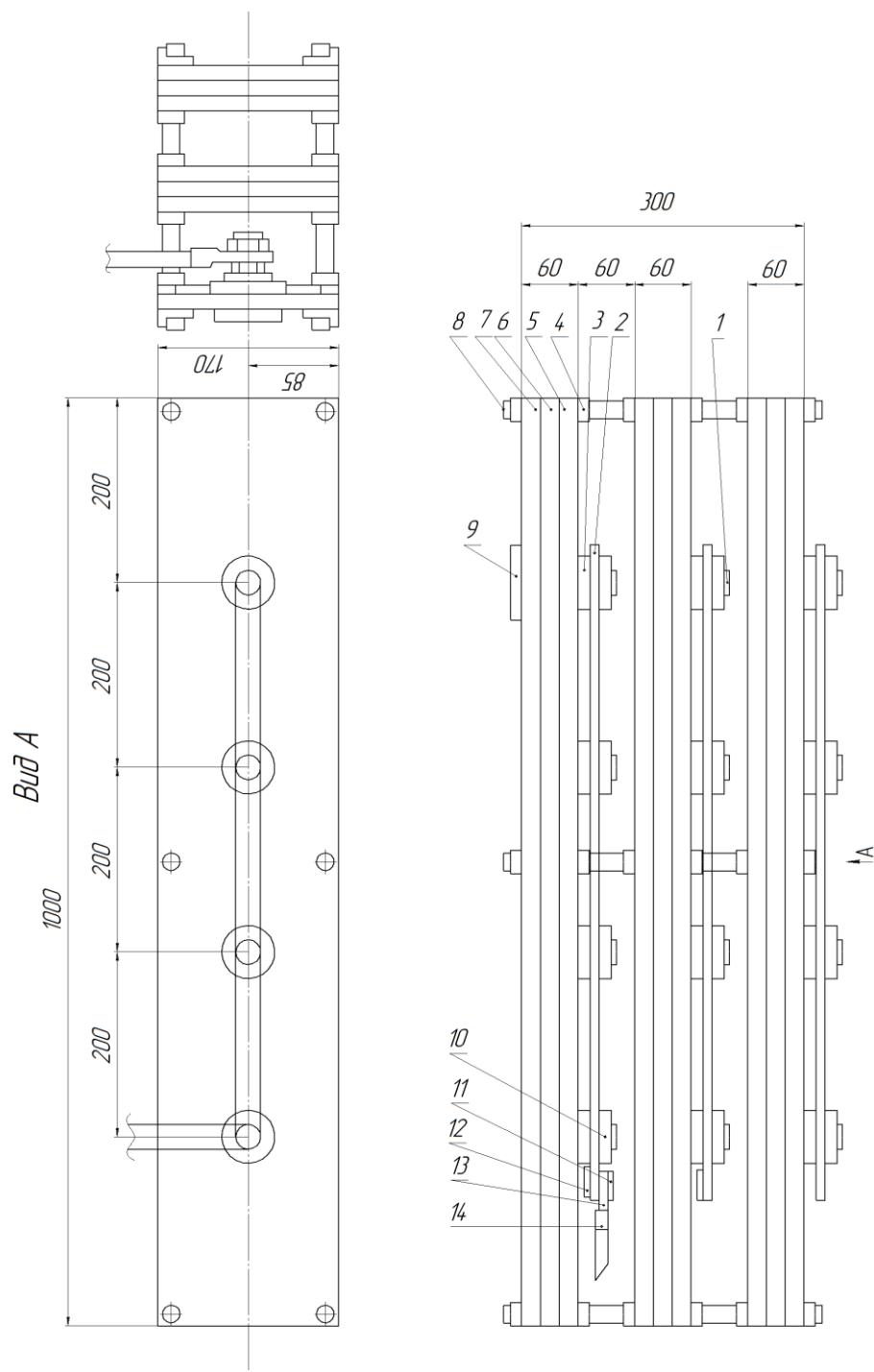


Рис. 2 – Перегородка бака маслонагревательная с позисторными нагревательными элементами:
2 – шина токопроводящая; 3 – позисторный нагреватель ПНЭ; 6 – пластина нагрева;
9 – прижим позисторного нагревателя ПНЭ; 13 – клемма крепления кабеля; 14 – кабель

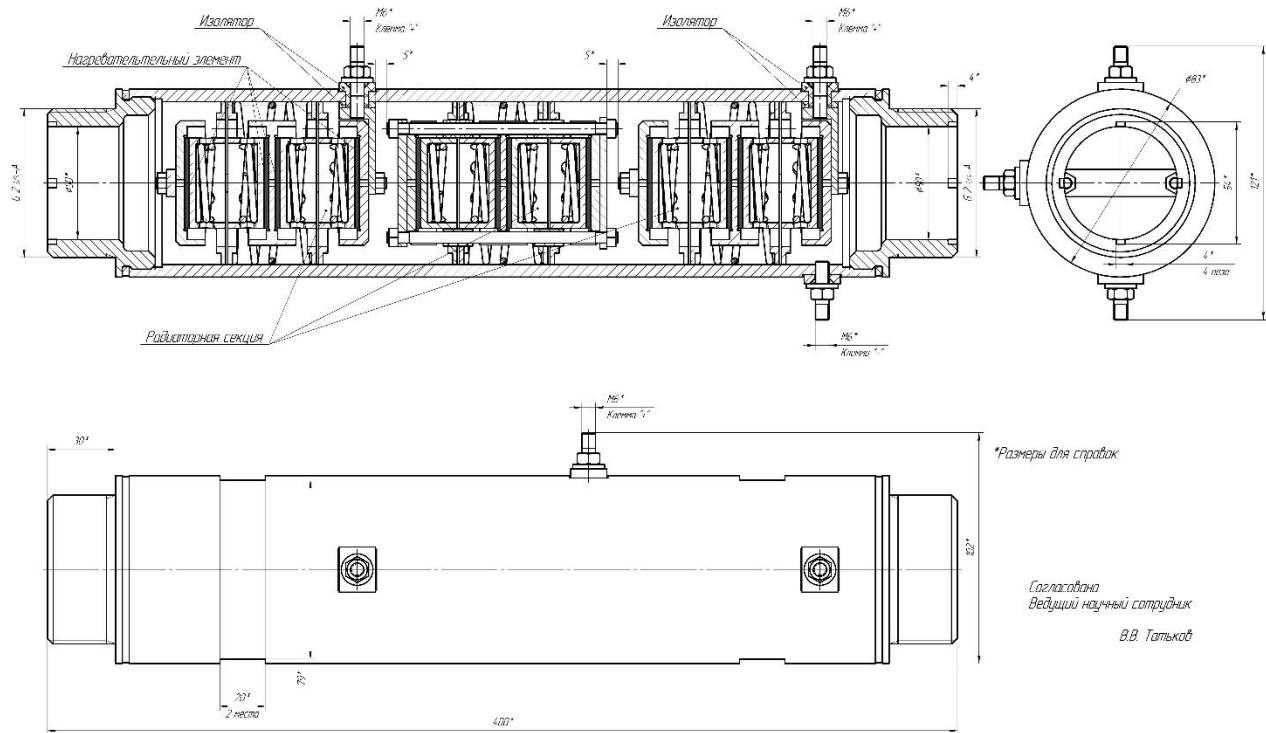


Рис.3 – Малогабаритний нагреватель проточного типа:

- 1 – корпус; 2 – радиаторная секция; 3.1, 3.2 – муфты корпуса; 4.1, 4.2 – кольцо уплотнительное;
5 – радиатор; 6 – пружина; 7 – радиатор; 8 – керамический нагревательный элемент

Нагреватель состоит из цилиндрического корпуса, в котором последовательно расположены три радиаторные секции. Каждая секция собрана из четырех П-образных радиаторов к которым посредством пружин прижаты керамические нагревательные элементы. Для повышения эффективности теплообмена за счет увеличения площади контакта нагретых поверхностей радиаторов с протекающей жидкостью, в цилиндрических частях радиаторов выполнены радиальные отверстия. Таким образом, за время течения смазывающей жидкости через МНПТ, она последовательно обтекает все нагретые поверхности радиаторных секций. Через

резьбовые муфты, которые установлены на торцах нагревателя, осуществляется подвод и отвод терmostатируемой смазочной жидкости [4, 5].

В зависимости от необходимой производительности МНПТ может быть выполнен в одно-, двух- и трехсекционном исполнении. Источник питания нагревателя содержит силовой трехфазный трансформатор мощностью 4 кВт с выходным эффективным напряжением 20 ± 2 В и три трехфазных выпрямителя с максимальным выходным током по 80 А. Основные технические параметры, определяющие условия работы нагревателя проточного типа МНПТ, представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Технические характеристики малогабаритного нагревателя проточного типа (МНПТ)

Параметр	Единица измерения	Значение
Расход жидкости при проверке технических характеристик	л/мин	10 ± 2
Условное минимальное проходное сечение	мм	25
Температура подогрева жидкости в нагревателе	°С	15 ± 5
Напряжение электропитания	В	25 ± 3
Ток включения одновременно трех секций	А	400
Ток включения поочередно трех секций	А	200
Ток в установившемся режиме	А	120 ± 15
Время выхода на установившийся режим при температуре окружающей среды -25°C	мин	6 ± 2
Температура переключения нагревательного элемента не	°С	160

Настройка и контроль режимов работы представленных позисторных нагревателей осуществляется с помощью переносного пульта контроля параметров системы смазки ПКПССП, который сертифицирован и выпускается согласно ТУ.У.29.1-22637063-032-2005. С помощью пульта осуществляется контроль следующих параметров: температура масла на входе и выходе нагревательного элемента; фиксация предельных значений температур на входе и выходе нагревателя; одновременная индикация давления в трех рабочих точках; потребляемый ток как отдельными секциями нагревателя, так и суммарный показатель; временные параметры, характеризующие как стабильные режимы работы, так и переходные этапы. Таким образом, полученные сведения позволяют не только фиксировать качество термостатирования смазочных жидкостей для промасливания холодного проката, но и осуществлять настройку гидросистемы в процессе работы.

Результаты испытаний. Апробация предлагаемых теристорных нагревателей проведена на металлургическом комбинате ПАО «Запорожсталь» в цехе холодного проката ЦХП-1 на прокатных станах 1700-1 и 1700-2. Малогабаритный нагреватель прямоточного типа МНПТ проверялся на дрессировочном стане в качестве нагревателя потока смазочной жидкости, поступающей в указатель потока УПДТ. В качестве контролируемых параметров были приняты: температура и давление масла на входе и выходе нагревателя, а также температура его корпуса; характеристики потока, контролируемые УПДТ; сила тока и напряжение источника питания позисторного нагревателя; время стабилизации показаний контролируемых параметров при изменении характеристик потока масла. Все данные через интерфейс USB передавались на пульт контроля ПКПССП для обработки, визуализации и архивирования. Сравнительный анализ полученных результатов с ожидаемыми значениями параметров при различных режимах течения смазочной жидкости показал высокую степень их согласования и, следовательно, подтвердило эффективность использования нагревателей МНПТ для термостатирования.

Маслонагреватель ПБМНПТ проверялся в виде перегородки гидробака для подачи консервационного масла на агрегате поперечной резки АПР-3. Функционально нагреватель должен заменить существующую систему подогрева масла паром, которая требует непрерывного контроля и ручной регулировки для получения стабильного термостатирования. Предложенная перегородка располагается в гидробаке с объемом $2,1\text{ м}^3$ и выполнена в виде трех радиаторов, на каждом из которых установлено по четыре позисторных нагревателя ПНЭ общей мощностью $3,6\text{ кВт}$ при подогреве масла на 20°C и расходе $2\text{ м}^3/\text{час}$. Номинальное напряжение питания 25 В , ток при установленном режиме термостатирования 120 А .

В процессе испытания контролировалась температура консервационного масла в гидробаке для промасливания холоднокатанного листа. Результаты испытаний были получены в виде теплограмм с разрешающей способностью $\varepsilon = 0,95$, которые позволили установить фактическую температуру масла в различных точках по объему бака, а также температуру как на поверхности керамического позисторного нагревателя, так и на стенках бака. Такая объективная картина фактических температур позволила проверить термодинамическое равновесие в гидросистеме и сделать заключение об эффективности применения нагревательных перегородок ПБМНПТ.

Выводы:

1. Показано, что качественное промасливание холодного проката методом распыления является одним из эффективных способов защиты металла от коррозии и возможно лишь при строгом соблюдении требуемой температуры консервационной жидкости.

2. Для термостатирования смазочной жидкости в качестве нагревательного элемента ПНЭ предлагается использовать позисторную керамику, отличительной особенностью которой является существенная зависимость сопротивления от температуры, что позволяет использовать ее для автоматической температурной регулировки.

3. Предложена нагревательная перегородка для гидробака ПБМНПТ на базе позисторных нагревателей, которая термостатирует значительные объемы масла, которое непосредственно подается в форсунки для нанесения с одной либо с двух сторон на холоднокатанный лист.

4. Предложен малогабаритный нагреватель прямоточного типа МНПТ, который позволяет термостатировать консервационное масло в потоке непосредственно перед форсункой. Такой способ термостатирования позволяет исключить тепловые потери по длине трубопровода, так как нагреватель установлен в непосредственной близости от потребителя масла.

5. Для контроля и настройки рассмотренных позисторных нагревательных устройств предлагается пульт контроля параметров системы смазки ПКПССП, который позволяет фиксировать как электрические, так и гидромеханические параметры и за счет интерфейса передавать их на пульт контроля для обработки, визуализации и архивирования.

6. Предложенный комплект позисторных нагревателей ПБМНПТ и МНПТ, а также пульт контроля ПКПССП прошли промышленно-натурные испытания для термостатирования консервационных масел на участках дрессировочных станов и агрегатов поперечной резки прокатных станов 1700-1 и 1700-2 цеха холодного проката ЦХП-1 металлургического комбината ПАО «Запорожсталь». Результаты совместных испытаний, выполненные представителями завода и НТУ «ХПИ», показали полное соответствие представленных образцов требованиям нормативно-технической документации и поэтому рекомендованы к внедрению.

Список літератури

- ГОСТ 9.014-78. Единая система защиты от коррозии и старения. Временная противокоррозионная защита изделий. Общие требования. – М.: Изд-во Стандартов, 2017. – 84 с.
- ГОСТ Р52246-201. Прокат листовой горячекатаный. Технические требования. – М.: Изд-во Стандартинформ, 2014. – 31 с.
- Симененко О.В. Консервационное масло для защиты холоднокатанного углеродистого проката от коррозии /О.В. Симененко, С.Е. Русаков, Е.П. Мирошниченко, А.И. Чистяков // Журнал Сталь. 2013. – № 10. – С. 44–47.
- Марченко А.П. Использование высоких технологий малолитражного дизелестроения в системе смазки металлургического оборудования /А.П. Марченко, А.В. Грицюк, В.В. Татьков и др.// Авиационно-космическая техника и технологии. – 2014.– № 10(117). НАУ им. Жуковского (ХАИ). – С. 99–104.
- Патент на корисну модель № 106710. Малогабаритний нагрівач проточного типу (МНПТ) /О.В. Грицюк, А.П. Марченко, О.А. Мотора та інші // Бюл. № 9– МПК(2016.01). 2016.

Bibliography (transliterated)

- GOST 9.014-78. Unified system of protection against corrosion and aging. Temporary anticorrosive protection of products. General requirements. – Moscow: Publishing House of Standards, 2017.– 84 p.
- GOST R52246-201. Rolled sheet hot-dip galvanized. Technical requirements . – Moscow: Izd-vo Standartinform, 2014. – 31 p.
- Simenenko O.V. Conservative oil to protect cold-rolled carbon steel from corrosion / O.V. Simenenko, S.E. Rusakov, E.P. Miroshnichenko, A.I. Chistyakov // Journal of Steel. 2013.– No 10. – P. 44–47.
- Marchenko A.P. The use of high-tech small-scale diesel in the lubrication system of metallurgical equipment / AP. Marchenko, A.V. Gritsyuk, V.V. Tat'kov et al. // Aviation and Space Equipment and Technologies . – 2014.– No 10(117). NAU them. Zhukovsky (KhAI). – P. 99–104.
- Patent for corsna model № 106710. Small-sized pump type flow (MNPT) / O.V. Gritsyuk, A.P. Marchenko, O.A. Motora // Bul. No 9. – IPC (2016.01). 2016.

Поступила (received) 15.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Терmostатирование смазочных жидкостей для промасливания холодного проката / А.В. Грицюк, А.П. Марченко, Ю.Д. Музыкин, В.В. Татьков, А.Г. Николаенко, А.Н. Чистяков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 17–24 – Бібліогр.: 5 назв.– ISSN 2519-2671

Терmostатування мастильних рідин для промаслювання холодного прокату /А.В. Грицюк, А.П. Марченко, Ю.Д. Музикін, В.В. Татьков, А.Г. Ніколаєнко, А.Н. Чистяков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 17–24 – Бібліогр.: 5 назв.– ISSN 2519-2671

Thermostating of lubricating fluids for oiling cold rolled products / A.V. Gritsyuk, A.P. Marchenko, Yu.D. Muzykin, V.V. Tat'kov, A.G. Nikolaenko, A.N. Chistyakov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 17–24. – Bibl.: 5. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Грицюк Александр Васильевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель генерального конструктора по НИР – главный конструктор Государственного предприятия «Харьковское конструкторское бюро по двигателестрению»; e-mail: dthkbd@ukr.net

Грицюк Олександр Васильович – доктор технических наук, старший научковий співробітник, заступник генерального конструктора по НДР – головний конструктор Державного підприємства «Харківське конструкторське бюро з двигунобудівництва»; e-mail: dthkbd@ukr.net

Gritsyuk Aleksandr Vasilievich – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Deputy General Designer for Research and Development – Chief Designer of the State Enterprise "Kharkiv Design Bureau for Motor Propulsion"; e-mail: dthkbd@ukr.net

Марченко Андрей Петрович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания». Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua

Марченко Андрій Петрович – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи, завідувач кафедри “Двигуни внутрішнього згоряння”. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua

Marchenko Andrey Petrovich – doctor of technical sciences, professor, vice-rector for scientific work, head of the department "Engines of internal combustion". National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"; e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua

Музикин Юрій Дмитрович – кандидат технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Детали машин и мехатронных систем»; тел. +38-067-264-56-78; e-mail: muzykin 1940@mail.ru

Музикін Юрій Дмитрович – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри “Деталі машин та мехатронних систем”; тел. +38-067-264-56-78; e-mail: muzykin 1940@mail.ru

Muzykin Yuri Dmitrievich – candidate of technical sciences, professor, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", professor of the department "Details of machines and mechatronic systems"; tel.+38-067-264-56-78; e-mail: muzykin 1940@mail.ru

Тат'ков Владислав Вікторович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской части Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», тел. +38-067-735-87-09; e-mail: tatjkov@kpi.kharkov.ua

Тат'ков Володимир Вікторович – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник науково-дослідної частини Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», тел. +38-067-735-87-09; e-mail: tatjkov@kpi.kharkov.ua

Tat'kov Vladimir Viktorovich – Cand.Tech.Sci., Leading Researcher of the Scientific Research Department of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", tel. +38-067-735-87-09; e-mail: tatjkov@kpi.kharkov.ua

Ніколенко Андрей Георгієвич – начальник цеха холодного проката №1, ПАО «Запорожсталь»; тел.+38-050-341-82-07; e-mail: andrey.nikolenko@zaporizhstal.com

Ніколенко Андрій Георгійович – керівник цеху холодного прокату № 1, ПАТ «Запоріжсталь»; тел.+38-050-341-82-07; e-mail: andrey.nikolenko@zaporizhstal.com

Nikolenko Andrey Georgievich – the head of the Cold Rolling Shop No. 1, PJSC "Zaporizhstal"; tel. .+38-050-341-82-07; e-mail: andrey.nikolenko@zaporizhstal.com

Чистяков Александр Николаевич – начальник участка гидравлики и смазки цеха холодного проката №1, ПАО «Запорожсталь»; тел.+38-050-341-48-50; e-mail: aleksandr.chistyakov@zaporizhstal.com

Чистяков Олександр Миколайович – керівник дільниці гіdraulіки та мастил цеху холодного прокату №\1, ПАТ «Запоріжсталь»; тел. +38-050-341-48-50; e-mail: aleksandr.chistyakov@zaporizhstal.com

Chistyakov Alexander Nikolaevich – the chief of a site of hydraulics and greasing of shop of cold hire №1, PJSC "Zaporozhstal"; tel. +38-050-341-48-50; e-mail: aleksandr.chistyakov@zaporizhstal.com

Кречман Віталій Анатольєвич – старший мастер участка гидравлики и смазки цеха холодного проката №1, ПАО «Запорожсталь», тел.+38-095-935-86-68; e-mail: vitaliy.krechman@zaporizhstal.com

Кречман Віталій Анатолійович – старший майстер дільниці гіdraulіки та мастил цеху холодного прокату № 1, ПАТ «Запоріжсталь»; тел.+38-095-935-86-68; e-mail: vitaliy.krechman@zaporizhstal.com

Kretschman Vitaliy Anatolyevich – senior master of the hydraulics and lubrication section of the Cold Rolling Shop No. 1, PJSC "Zaporizhstal", tel. +38-095-935-86-68; e-mail: vitaliy.krechman@zaporizhstal.com

УДК 621.777.07

Ю.Ю. ЗУБКО, А.С. БОБУХ, Я.В. ФРОЛОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ПОЯСКА МАТРИЦЫ И ФОРКАМЕРЫ НА НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА ПРИ МНРКУП

В статье показаны результаты исследований влияния пояска матрицы и форкамеры на неравномерность деформации металла при МНРКУП. Цель статьи – определение влияния геометрических параметров инструмента на течение металла и неравномерность деформации при многониточном неравноканальном прессовании с помощью конечно-элементного моделирования. В исследованиях использовались. В качестве материала заготовки был выбран алюминий 1100 (аналог АД0), температура деформации 501°C. Материал инструмента – сталь с твердостью HRC39. Диаметр входного канала 42 мм, диаметр выходного канала 15 мм. Привод пuhanсона – гидравлический пресс с номинальным усилием 120 МН. Коэффициент трения между инструментами и заготовкой 0,8, что соответствует процессу без применения смазки. Температура окружающей среды 11°C. Условие остановки процесса – перемещение пuhanсона на 70 мм.

Ключевые слова: МНРКУП, деформация, форкамера, моделирование, прессование, течение металла.

У статті показані результати досліджень впливу паска матриці і форкамери на нерівномірність деформації металу при МНРКУП. Мета статті – визначення впливу геометричних параметрів інструменту на перебіг металу і нерівномірність деформації при многониточній неравноканальному пресуванні за допомогою кінцево-елементного моделювання. У дослідженнях використовувалися. Як матеріал заготовки був обраний алюміній 1100 (аналог ПЕКЛО0), температура деформації 501 ° С. Матеріал інструменту – сталь з твердістю HRC39. Діаметр входного каналу 42 мм, діаметр вихідного каналу 15 мм. Привід пuhanсона – гідралічний прес з номінальним зусиллям 120 МН. Коєфіцієнт тертя між інструментами і заготовкою 0,8, що відповідає процесу без застосування мастила. Температура навколошного середовища 11 ° С. Умова зупинки процесу – переміщення пuhanсона на 70 мм.

Ключові слова: БНРКП, деформація, форкамера, моделювання, пресування, плин металу.

The article shows the results of studies of the influence of the girdle of the matrix and the prechamber on the nonuniformity of metal deformation under the MTNECLE. The purpose of the article is to determine the influence of the geometric parameters of the tool on the metal flow and the unevenness of the deformation in the case of multi-thread unequal-channel pressing using finite element modeling. In the studies used. The results of the studies presented below were obtained by modeling in the QForm VX software environment. In previous studies, the adequacy of simulation results in this software environment was confirmed [8]. As the material of the billet was chosen aluminum 1100 (analog ADO), deformation temperature 501 ° C. Tool material – steel with hardness HRC39. The diameter of the input channel is 42 mm, the diameter of the output channel is 15 mm. The punch drive is a hydraulic press with a nominal force of 120 MN. Coefficient of friction between tools and workpiece 0.8, which corresponds to the process without the use of lubricant. The ambient temperature is 11 ° C. The process stop condition is the displacement of the punch by 70 mm.

Keywords: MTNECAE, deformation, prechamber, modeling, extrusion, metal flow.

Введение. Развитие машиностроения в значительной мере обеспечивается разработкой и применением новых конструкционных материалов, обладающих определенным сочетанием механических свойств. Создание таких материалов достигается путём легирования или применением особых режимов деформации, которые оказывают решающее влияние на формирование структуры материала [1]. С другой стороны, особое внимание в обработке металлов давлением уделяется ресурсосбережению для повышения конкурентной способности изделий и снижению его стоимости. Для уменьшения расхода металла и энергоресурсов постоянно разрабатываются новые методы обработки металлов давлением [2]. К ним относятся методы интенсивной пластической деформации, которые позволяют обеспечить глубокую проработку структуры металла за счет комбинации сдвиговых и скользящих деформаций. Широкого распространения они не получили ввиду особенностей процесса и сложности получения изделий сложной геометрической конфигурации. На сегодняшний день одним из самых распространённых и развитых методов интенсивной пластической деформации (ИПД) является равноканальное угловое прессование (РКУП). В развитии РКУП появился новый метод ИПД – неравноканальное угловое прессование (НРКУП) [3]. Основываясь на опыте предыдущих исследователей были разработаны инструмент [4] и технология [5] для процесса ИПД, названного многониточным неравноканальным угловым

прессованием (МНРКУП). В ходе исследований этого процесса основное внимание было уделено неравномерности деформации [6]. Неравномерность деформации, обусловленная комбинацией различных напряженно-деформированных состояний металла в зоне деформации при МНРКУП накладывается на нестабильные размеры этой зоны, называемой по аналогии с прямым прессованием ОЧПЗ. Это затрудняет управление интенсивностью проработки структуры и получение на выходе изделия со стабильными по длине структурой и свойствами. Одним из технологических элементов процесса МНРКУП является форкамера. Она облегчает течение металла в затрудненных местах и способствует выравниванию скоростей прессования профиля по его сечению [7]. Эта статья посвящена исследованию влияния форкамеры и геометрии деформирующего пояска матрицы на неравномерность деформации металла [6]. Представленные ниже результаты исследований получены путем моделирования в программной среде QForm VX, предоставленной кафедре ОМД им. акад. Чекмарёва Micas Simulations Ltd. В предыдущих исследованиях была подтверждена адекватность результатов моделирования в этой программной среде [8].

Постановка задачи. Для повышения управляемости неравномерностью деформации в процессе МНРКУП путем воздействия на скорости прессования отдельных элементов сечения профиля необходимо более детально исследовать влияние

форкамеры и геометрии деформирующего пояска матрицы на прямолинейность выходящего профиля.

Компьютерная модель. Для проведения исследования было выбрано математическое моделирование на базе программы QForm VX. Этот программный пакет хорошо себя зарекомендовал при проведении расчётов влияния геометрии инструмента на течение металла, а также показал хорошие

результаты сходимости при сопоставлении с проведёнными экспериментами. Создание исходной сетки заготовки и инструмента для расчёта математической модели проводилось в встроенным в программу QForm VX редакторе QShape, возможности которого позволяют определить инструмент и заготовку на этапе построения сетки (рис. 1).

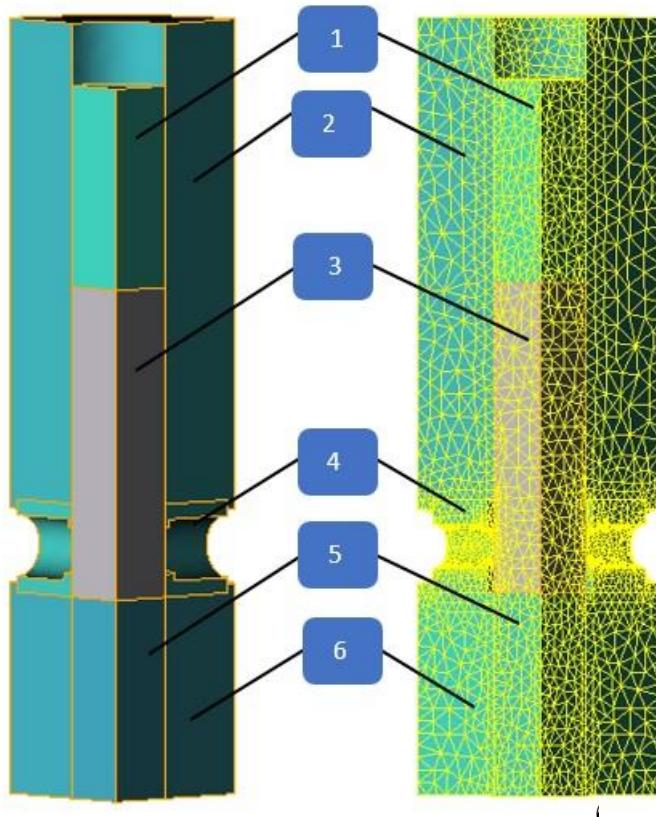


Рис. 1 – Исходная сетка заготовки и инструмента для расчёта математической модели многониточного неравноканального углового прессования (МНРКУП): а – геометрический вид; б – начальная сетка модели до начала процесса; 1 – пuhanсон, 2 – верхняя часть контейнера, 3 – заготовка, 4 – выходной канал, 5 – контр-пuhanсон, 6 – нижняя часть контейнера

В качестве материала заготовки был выбран алюминий 1100 (аналог АД0), температура деформации 501°C. Материал инструмента – сталь с твёрдостью HRC39. Диаметр входного канала 42 мм, диаметр выходного канала 15 мм. Привод пuhanсона – гидравлический пресс с номинальным усилием 120 МН. Коэффициент трения между инструментами и заготовкой 0,8, что соответствует процессу без применения смазки. Температура окружающей среды 11°C. Условие остановки процесса – перемещение пuhanсона на 70 мм. Для ускорения процессов расчёта в моделировании использовалась $\frac{1}{4}$ часть модели (рис. 1), так как инструмент симметричен в 2 плоскостях.

В качестве технологических элементов, которые позволяют управлять истечением металла в процессе

прессования были выбраны глубина форкамеры и толщина пояска матрицы. Здесь увеличение глубины форкамеры позволяет снизить напряжения между слоями ОЧПЗ [9], а разница в толщине пояска матрицы позволяет уравновешивать разницу в силах трения, возникающую в контейнере при МНРКУП.

В ходе предыдущих исследований было установлено, что оптимальным отношением толщины пояска является 2/3 и 2/4. Под этим отношением подразумевается отношение толщины пояска матрицы в верхней части (рис. 2, а) к толщине в нижней части (рис. 2, б), что является геометрическим параметром пояска матрицы (a/b). Все данные для определения отношения, а также глубины форкамер (рис. 2, в) приведены в табл. 1.

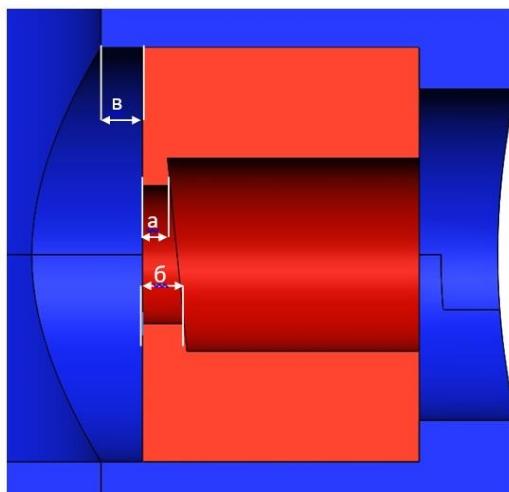


Рис. 2 – Геометрические параметры выходного канала: а – толщина пояска сверху,
б – толщина пояска снизу, в – глубина форкамеры

В исследовании использовалось 3 форкамеры: 3 мм, 5 мм и 7 мм. Такие размеры форкамер обусловлены тем, что диаметр описанной окружности, а в нашем случае – это диаметр выходного канала 15 мм. Стенки форкамеры выполнены под углом 90° с целью стабилизации

процесса на внешних границах обжимной пластической зоны. Такое решение в будущем позволит исследовать геометрические параметры переходной зоны с помощью метода сеток в натурных экспериментах.

Таблица 1 – Геометрические параметры исследуемых форкамер и поясков матрицы

№ п/п	Толщина пояска сверху (а), мм	Толщина пояска снизу (б), мм	Глубина форкамеры (в), мм
1	2	3	3
2			5
3			7
4		4	3
5			5
6			7

Анализ полученных результатов. В ходе моделирования с варьируемыми глубиной форкамеры и геометрией пояска было получено 6 вариантов истечения профиля из канала (табл. 2).

Для оценки влияния глубины форкамеры на неравномерность деформации использовался метод, описанный в предыдущих работах [7]. Его суть заключается в использовании критерия Q_{cp} , который усреднённо показывает отклонение спицы от нормали. В качестве нормали была принята ось выходного отверстия матрицы. Отклонение спицы от нормали рассчитывается по формуле:

$$O_{cp} = \frac{l_n + l_{n+1} + \dots + l_{ni}}{n_i}; \quad (1)$$

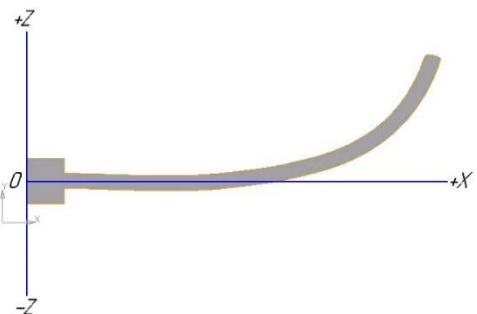
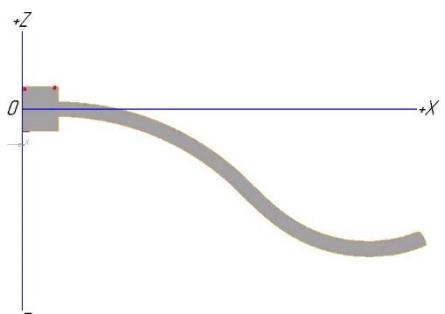
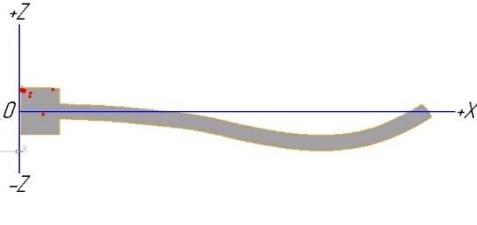
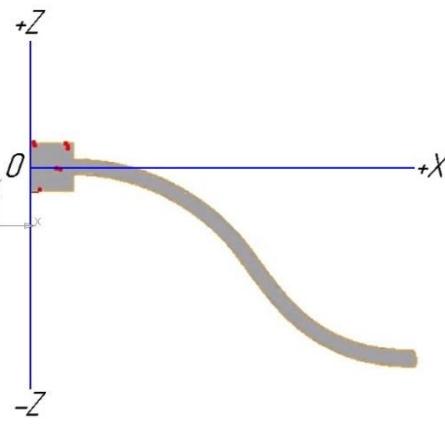
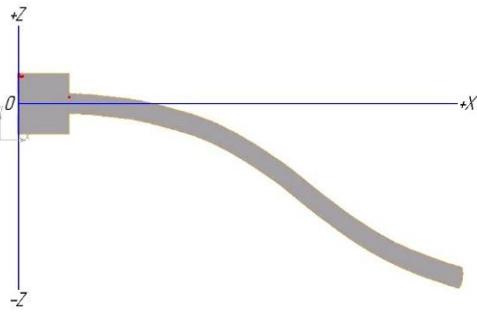
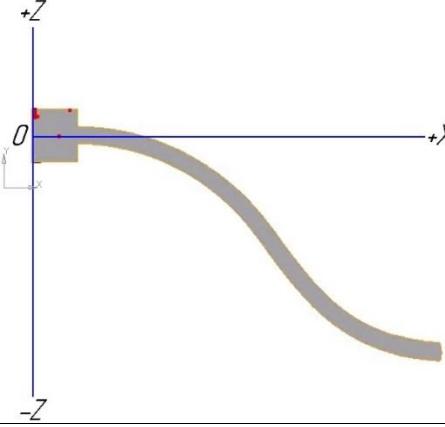
где: l_n – длина отрезка от центральной линии спицы к нормали (база измерения), мм;

n_i – количество отрезков.

Определение длины отрезка от края спицы к нормали производилось при помощи графических редакторов следующим образом: на поперечном сечении детали откладывалась нормаль X, проходящая через геометрический центр выходного канала матрицы и центральная линия спицы. После чего каждые 5 мм откладывался отрезок от нормали к центру заготовки (рис. 3). При этом значение длины отрезка бралось по модулю, так как отклонение спицы в направлении оси Z принималось с положительным знаком, а в направлении оси -Z с отрицательным. В результате были получены значения среднего отклонения профиля на базе 5 мм $Q_{cp(5)}$.

Результаты расчёта среднего искривления спицы собраны в табл. 3.

Таблиця 2 – Образцы, полученные в результате моделирования

Глубина форкамеры, мм	Геометрический параметр пояска матрицы	
	2/3	2/4
3		
5		
7		

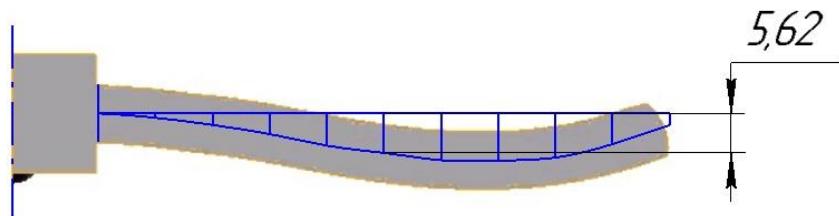


Рис. 3 – Пример определения кривизны спицы графическим способом

Таблиця 3 – Значення искривления спицы в зависимости от форкамеры
и геометрического параметра пояска матрицы

Геометрический параметр пояска	Значения $Q_{\text{ср}(5)}$ (мм) для различных глубин форкамеры		
	Глубина форкамеры, мм		
	3	5	7
2/3	+13,1	-3,93	-27,3
2/4	-26,9	-27,7	-22,9

Если привести полученные данные к базе измерений, равной 1/3 от диаметра профиля, то можно говорить о том, что варьирование технологических элементов МНРКУП позволило управлять искривлением профиля в диапазоне от -5,54 до +2,62. Анализ полученных результатов показал, что для данного коэффициента вытяжки и коэффициента трения наименьшее искривление выходящего профиля дает сочетание глубины форкамеры, равной 5 мм, с геометрическим параметром пояска матрицы равным 2/3.

Выводы. Таким образом, в результате моделирования процесса МНРКУП в программной среде QForm VX показано, что изменение таких характерных для процесса прессования технологических элементов, как глубина форкамеры и толщина пояска матрицы позволяет управлять скоростями истечения по сечению профиля таким образом, чтобы компенсировать неравномерность деформации, вызванную сложной комбинацией напряженно-деформированных состояний в ОЧПЗ. Так, в результате численного моделирования были получены как положительные, так и отрицательные значения отклонения профиля от оси выходного отверстия матрицы, что позволило определить сочетание технологических элементов, дающее минимальное значение этого неравномерности истечения. Установлено, что отклонение профиля изменяется с течением процесса прессования, что связано как с характеристикой оставающего материала, так и с нестационарностью размеров ОЧПЗ. Это является предметом дальнейших исследований.

Список литературы

1. Е.И. Разуваев Современные технологии обработки металлов давлением / Е.И. Разуваев, Н.В. Моисеев, Д.В. Капитаненко, М.В. Бубнов // Труды ВИАМ 2015. №2 . С. 3–5.
2. С.Б. Сидельников Основы технологических процессов обработки металлов давлением / С. Б. Сидельников, Р. И. Галиев, Д. Ю. Горбунов, Е. С. Лопатина, А. С. Пещанский // ИПК СФУ 2008 (95) – С. 5–8
3. Р.З. Валиев Наноструктурные наноматериалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, Н.В. Александров// – М.: Логос, 2000. – 272 с.
4. Пат. 120026 Україна, МПК B21C 25/00 (2017.01). Пристрій для багатоканального поперечно-кутового пресування / Фролов Я.В., Зубко Ю.Ю., Макеев С.Ю., Макеєва Г.С.; заявник та власник Національна металургійна академія України. – заявл. 13.03.2017; опубл. 25.10.2017, Бюл. № 20. – 3 с.: 2 іл.
5. Зубко Ю.Ю. Боковое многоканальное прессование / Приднепровский научный семинар «Обработка металлов давлением» от 04.04.2016 / http://metal-forming.org/index.php/zasedaniya/item/bokovoe-mnogokanalnoe-pressovanie?category_id=2
6. Зубко Ю.Ю. Влияние геометрии инструмента на течение металла при МНРКУП / Ю.Ю. Зубко, Я.В. Фролов, А.В. Ашкелянец // Monografie Nr 68, Czestochowa 2017, С. 296–302
7. Зубко Ю.Ю. Исследование влияния геометрии пояска матрицы на течение алюминия в процессе МНРКУП // Зубко Ю.Ю., Фролов Я.В., Ремез О.А., Ашкелянец А.В./ Краматорск: ДГМА, 2017 – С. 84–88.
8. В.Н. Данченко Производство профилей из алюминиевых сплавов // В.Н. Данченко, А.А. Миленин, А.Н. Головко/ Днепропетровск: «Системные технологии», 2002. – 439 с.
9. Зубко Ю.Ю. Многониточное неравноканальное прессование / Зубко Ю.Ю., Фролов Я.В., Ашкелянец А.В./ Днепропетровск: ПП «Аксент», – 2017. – С. 221-230. / <http://metal-forming.org/images/annot-2017/PDM-2017/221-230.pdf>

Bibliography (transliterated).

1. Ye.I. Sovremennyye tekhnologii obrabotki metallov davleniyem / Ye.I. Razuvayev, N.V. Moiseyev, D.V. Kapitanenko, M.V. Bubnov // Trudy VIAM 2015. – No2. – P. 3–5.
2. S. B. Sidel'nikov Osnovy tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniyem / S. B. Sidel'nikov, R. I. Galiyev, D. Yu. Gorbunov, Ye. S. Lopatina, A. S. Peshchanskiy // IPK SFU 2008 (95) – P. 5–8
3. R.Z. Valiyev Nanostrukturye nanomaterialy, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey / R.Z. Valiyev, N.V Aleksandrov// – Moscow: Logos, 2000. – 272 p.
4. Pat. 120026 Ukrayina, MPK V21S 25/00 (2017.01). Prystriy dlya bahatokanal'noho poperechno-kutovoho presuvannya / Frolov YA.V., Zubko Yu.Yu., Makeyev S.Yu., Makeyeva H.S.; zayavnyk ta vlasnyk Natsional'n'a metalurhiyna akademiya Ukrayiny. – zayavl. 13.03.2017; opubl. 25.10.2017, Byul. No 20. – 3 p.; 2 il.
5. Zubko YU.YU. Bokovoye mnogokanal'noye pressovaniye / Pridneprovskiy nauchnyy seminar «Obrabotka metallov davleniyem» ot 04.04.2016 / http://metal-forming.org/index.php/zasedaniya/item/bokovoye-mnogokanal'noye-pressovaniye?category_id=2
6. Zubko YU.YU. Vliyanije geometrii instrumenta na techeniye metalla pri MNRKUP / YU.YU. Zubko, Ya.V. Frolov, A.V. Ashkelyanets // Monografie No 68, Czestochowa 2017, P. 296–302
7. Zubko YU.YU. Issledovaniye vliyanija geometrii poysaka matrytsy na techeniye alyuminija v protsesse MNRKUP // Zubko Yu.Yu., Frolov YA.V., Remez O.A., Ashkelyanets A.V./ Kramatorsk: DGMA, 2017 – P. 84–88.
8. V.N. Danchenko Proizvodstvo profiley iz alyuminiyevykh splavov // V.N. Danchenko, A.A. Milenin, A.N. Golovko/ Dnepropetrovsk: «Sistemnyye tekhnologii», 2002. – 439 p.
9. Zubko YU.YU. Mnogonitochnoye neravnokanal'noye pressovaniye / Zubko Yu.Yu., Frolov Ya.V., Ashkelyanets A.V..// Dnepropetrovsk: PP «Aktsent», – 2017. – P. 221-230./ <http://metal-forming.org/images/annot-2017/PDM-2017/221-230.pdf>

Поступила (received) 29.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Исследование влияния геометрии пояска матрицы и форкамеры на неравномерность деформации металла при МНРКУП / Ю.Ю. Зубко, А.С. Бобух, Я.В. Фролов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія:Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів_у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 25–30 – Бібліогр.: 9 назв.– ISSN 2519-2671

Дослідження впливу геометрії пояска матриці і форкамери на нерівномірність деформації при БНРККП / Ю.Ю. Зубко, А.С. Бобух, Я.В. Фролов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія:Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів_у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 25–30 – Бібліогр.: 9 назв.– ISSN 2519-2671

Investigation of the influence of the girdle of the matrix and prechamber on the unevenness of deformation of metal during MNECAE / Yu. Yu. Zubko, A.S. Bobukh, Ya.V. Frolov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 25–30. – Bibl.: 9. – ISSN 2519-2671

Сведения об авторах / Відомості про авторів / About the Authors

Зубко Юрій Юрієвич – аспірант каф. ОМД ім. акад. Чекмарьова, Національної металургіческої академії України, г. Дніпр; e-mail: yurazubko1993@gmail.com

Зубко Юрій Юрійович – аспірант каф. ОМД ім. акад. О. П. Чекмарьова, Національної металургійної академії України, м Дніпро; e-mail: yurazubko1993@gmail.com

Zubko Yurii Yurievich – Post-graduate student of the metal forming department them. acad. Chekmaryova, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro; e-mail: yurazubko1993@gmail.com

Бобух Александр Сергійович – кандидат технических наук, доцент каф. ОМД ім. акад. А.П. Чекмарева, Національної металургіческої академії України, г. Дніпр; e-mail: bobukh@metal-forming.org

Бобух Олександр Сергійович – кандидат технічних наук, доцент каф. ОМД ім. акад. О. П. Чекмарьова, Національної металургійної академії України, м Дніпро; e-mail: bobukh@metal-forming.org

Bobukh Olexandr Sergievich – Candidate of Technical Sciences, associate professor of the metal forming department named after. acad. O.P. Chekmaryova, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro; e-mail: bobukh@metal-forming.org

Фролов Ярослав Вікторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ОМД им. акад. А.П. Чекмарьова, Національної металургіческої академії України, г. Дніпр; e-mail: yafrolov@gmail.com

Фролов Ярослав Вікторович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри ОМД ім. акад. О.П. Чекмарьова, Національної металургійної академії України, м/ Дніпро; e-mail: yafrarov@gmail.com

Frolov Yaroslav Vicktorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of the metal forming named after. acad. A.P. Chekmaryova, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro; e-mail: yafrarov@gmail.com

УДК 621.923

О.С. КЛЕНOV, С.А. ДИТИНЕНКО, А.Г. КРЮК, Ф.В. НОВИКОВ

ФОРМИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ

Приведены аналитические зависимости для определения шероховатости поверхности при шлифовании, полученные на основе теоретико-вероятностного подхода при моделировании режущих зерен круга в форме конуса и сферы. Показано, что моделирование режущих зерен круга в форме сферы приводит к заниженным значениям, а в форме конуса – к завышенным значениям шероховатости поверхности по сравнению с экспериментальными данными. Поэтому при расчете шероховатости поверхности режущие зерна круга следует рассматривать в форме усеченного конуса, учитывая размеры образующейся площадки износа на зерне.

Ключевые слова: шлифование, шероховатость поверхности, режущие зерна круга, конус, сфера, площадка износа, теоретико-вероятностный подход

Наведено аналітичні залежності для визначення шорсткості поверхні при шліфуванні, які отримано на основі теоретико-імовірнісного підходу при моделюванні ріжучих зерен круга в формі конуса та сфери. Показано, що моделювання ріжучих зерен круга в формі сфери призводить до занижених значень, а в формі конуса – до завищених значень шорсткості поверхні порівняно з експериментальними даними. Тому при розрахунку шорсткості поверхні ріжучі зерна круга слід розглядати в формі усіченого конуса з урахуванням розмірів майданчиків зносу, що утворюються на зернах.

Ключові слова: шліфування, шорсткість поверхні, ріжучі зерна круга, конус, сфера, майданчик зносу, теоретико-імовірнісний підхід

Analytical dependences are given for determining the surface roughness during grinding, obtained on the basis of the theoretical-probabilistic approach in the modeling of the cutting grains of a circle in the form of a cone and a sphere. It is shown that the modeling of the cutting grains of a circle in the form of a sphere leads to underestimated values, and in the form of a cone – to overestimated values of the surface roughness in comparison with the experimental data. Therefore, to determine the roughness parameters of the surface when grinding with a diamond circle after dressing, it is suggested that the grains be considered in the form of a cone, and after the running-in of a circle, in the form of a sphere. When the roughness of the surface is refined, the cutting grain of the circle should be considered in the form of a truncated cone, taking into account the dimensions of the wear area on the grain, using a dimensionless coefficient equal to zero for the sharpened grain and varying within 0 ... 1 for worn-out grain. Based on the results of the research, practical recommendations are given to reduce the surface roughness during grinding.

Keywords: grinding, surface roughness, cutting circle grains, cone, sphere, wear surface, probability-theoretic approach

Введение. Механическая обработка характеризуется наименьшей энергоемкостью среди всего разнообразия методов обработки деталей машин, что предполагает ее широкое практическое использование. Наибольшими возможностями с точки зрения обеспечения параметров качества и точности обрабатываемых поверхностей обладает метод шлифования. Благодаря тому, что съем материала при шлифовании происходит в результате участия в резании чрезвычайно большого количества абразивных зерен, обеспечивающих тончайшие микросрезы, шероховатость обрабатываемой поверхности существенно уменьшается, достигая значений $R_a = 0,05$ мкм и менее. Это позволяет рассматривать метод шлифования основным финишным методом обработки деталей машин. Для обоснования технологических возможностей шлифования необходимо располагать научными знаниями о закономерностях формирования шероховатости поверхности при шлифовании и основных условиях ее уменьшения. Это требует проведения дальнейших исследований и разработки новых математических моделей определения шероховатости поверхности при шлифовании.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам исследования шероховатости поверхности при шлифовании в научно-технической литературе удалено большое внимание [1–3]. Экспериментально установлено влияние параметров шлифования на показатели шероховатости поверхности и определены условия ее уменьшения. Разработан теоретико-вероятностный подход при шлифовании [4, 5], позволяющий теоретически прогнозировать

оптимальные условия обработки с точки зрения уменьшения шероховатости поверхности. Однако большое количество факторов, возникающих в процессе шлифования, затрудняет точный расчет шероховатости поверхности. Поэтому в настоящей работе, в развитие теоретико-вероятностного подхода при шлифовании, предложены новые теоретические зависимости для определения шероховатости поверхности с учетом параметров режущего рельефа круга, моделируя режущие зерна в форме конуса, усеченного конуса и сферы. Сравнение расчетных и экспериментальных значений шероховатости поверхности позволит обосновать наиболее приемлемую для расчетов форму режущих зерен и научно обоснованно подойти к определению оптимальных условий шлифования по критерию наименьшей шероховатости поверхности.

Целью работы является определение условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании на основе применения новых аналитических подходов к ее определению.

Изложение основного материала. В работах [6, 7] приведены аналитические зависимости для определения максимальной вероятностной (приведенной) толщины среза H_{max} и параметра шероховатости поверхности R_a при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами, имеющими конусообразную форму (рис. 1):

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{t \cdot \rho} \cdot (1 - \eta)^2}{tg \gamma \cdot m \cdot V_{kp} \cdot (1 + \eta)}} ; \quad (1)$$

$$R_a = 0,2 \cdot H_{max} \cdot \sqrt[5]{\frac{H_{max}}{4 \cdot t}}; \quad (2)$$

$$R_a = 2 \cdot \sqrt[5]{\frac{(1-\eta)^4 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{dem}^2 \cdot \rho}{(1+\eta)^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{kp}^2}}, \quad (3)$$

где \bar{X} – зернистость круга, м;
 m – объемная концентрация зерен в круге;
 γ – половина угла при вершине зерна конусообразной формы;

V_{dem} – скорость детали, м/с;

V_{kp} – скорость круга, м/с;

t – глубина шлифования, м;

$\rho = 1/R_{kp} + 1/R_{dem}$;

R_{kp}, R_{dem} – радиусы круга и детали, м;

$\eta = x/H$ – безразмерный коэффициент, определяющий степень затупления зерна (для острозаточенного зерна $\eta=0$, для затупленного зерна $\eta \rightarrow 1$);

x – величина линейного износа зерна, м;

H – максимальная условная глубина внедрения зерна в обрабатываемый материал, отсчитывается от вершины исходного неизношенного максимально выступающего над уровнем связки зерна, м.

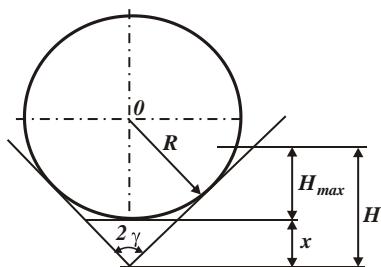


Рис. 1 – Расчетная схема параметров шлифования

Наряду с параметрами режима шлифования, характеристиками алмазного круга и обрабатываемой детали, зависимость (3) содержит множитель $\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2}$, который обусловлен линейным износом зерен круга. Очевидно, чем больше безразмерный коэффициент η , тем больше линейный износ зерен круга и меньше параметр шероховатости поверхности R_a . Это условие предопределяет основное направление уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании, так как безразмерный коэффициент η из всех входящих в зависимость (3) параметров оказывает на R_a наибольшее влияние.

Следует отметить, что традиционно расчеты шероховатости поверхности при шлифовании выполняются для исходного режущего рельефа круга, т.е. для $\eta=0$, что приводит к завышенным расчетным значениям шероховатости поверхности. Поэтому наличие в зависимости (3) безразмерного

коэффициента η , учитывающего линейный износ зерен круга, позволяет приблизить расчетные значения шероховатости поверхности к экспериментальным значениям и открывает новые технологические возможности изыскания условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании. Для решения этих задач целесообразно перейти от конусообразной к сферической форме зерен радиусом R , рассматривая расчетную схему, показанную на рис. 1. В результате выполненных расчетов установлено, что безразмерный коэффициент η для условия $\gamma=45^\circ$ определяется зависимостью:

$$\eta = \frac{1}{\left(1 + 2,415 \cdot \frac{H_{max}}{R}\right)}. \quad (4)$$

Как видно, безразмерный коэффициент η зависит лишь от отношения H_{max}/R : чем оно больше, тем меньше безразмерный коэффициент η . Это приводит к более полному использованию режущих возможностей алмазного круга.

Соответственно, множитель $\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2}$,

входящий в зависимость (3), примет вид:

$$\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} = 8,5 \cdot \left(\frac{H_{max}}{R}\right)^4. \quad (5)$$

Подставляя преобразованную зависимость (5) в (1), имеем:

$$H_{max} = \frac{1836,45 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{kp} \cdot R^2}. \quad (6)$$

В итоге получена аналитическая зависимость для определения максимальной вероятностной (приведенной) толщины среза H_{max} , которая по структуре отличается от аналогичной зависимости (1), полученной при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами, имеющими конусообразную форму. Входящие в зависимость (6) параметры в большей степени влияют на параметр H_{max} , чем в зависимости (1). Следовательно, моделируя режущие зерна в форме сферы, можно в более широких пределах изменять параметр H_{max} за счет изменения входящих в зависимость (6) параметров.

При условии $\bar{X}=2 \cdot R$ зависимость (6) окончательно выразится:

$$H_{max} = \frac{14,7 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot R \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{kp}}. \quad (7)$$

В полученной зависимости (7) зернистость круга, определяемая радиусом зерна R , влияет на параметр H_{max} аналогично параметрам V_{dem} , V_{kp} и m , тогда как в зависимости (1) зернистость круга $\bar{X}=2 \cdot R$ входит с наибольшей степенью.

Следовательно, моделируя режущие зерна в форме сферы, сложно добиться существенного уменьшения параметра H_{max} за счет уменьшения зернистости круга (радиуса зерна R).

С учетом зависимости (6) зависимость (2) принимает вид:

$$R_a = \frac{367,3 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{kp} \cdot R^2} \times \\ \times \sqrt[5]{\frac{459 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem}}{m \cdot V_{kp} \cdot R^2} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}}} \quad (8)$$

Из зависимостей (2) и (8) вытекает, что параметр шероховатости поверхности R_a , по сути, определяется максимальной вероятностной (приведенной) толщиной среза H_{max} , т.е. чем меньше H_{max} , тем меньше параметр R_a .

Если принять, что $\bar{X} = 2 \cdot R$, то зависимость (8) выразится:

$$R_a = \frac{2938,4 \cdot \pi \cdot R \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{kp}} \times \\ \times \sqrt[5]{\frac{3672 \cdot \pi \cdot R \cdot V_{dem}}{m \cdot V_{kp}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}}} \quad (9)$$

Исходя из зависимости (9), основными условиями уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a являются: уменьшение зернистости круга (радиуса зерна R), скорости детали V_{dem} , глубины шлифования t и увеличение объемной концентрации зерен в круге m и скорости круга V_{kp} . В отличие от зависимости (3), полученной при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами, имеющими конусообразную форму, в зависимости (8) зернистость круга, определяемая радиусом зерна R , влияет на R_a аналогично параметрам V_{dem} , V_{kp} и m . Поэтому, моделируя режущие зерна в форме сферы, сложно добиться значительного уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a за счет уменьшения зернистости круга (радиуса зерна R), так как влияние параметров R , V_{dem} , V_{kp} и m на параметр R_a равносильно.

При глубинном шлифовании кругом с режущими зернами в форме сферы, так же как и при шлифовании кругом с режущими зернами в форме конуса, сохраняется закономерность уменьшения параметра шероховатости поверхности R_a для заданной производительности обработки $Q = B \cdot V_{dem} \cdot t$:

$$R_a = \frac{2938,4 \cdot \pi \cdot R \cdot Q}{m \cdot V_{kp} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \times \\ \times \sqrt[5]{\frac{3672 \cdot \pi \cdot R \cdot Q}{m \cdot V_{kp} \cdot B \cdot t} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}}} \quad (10)$$

где B – ширина шлифования, м.

Как следует из зависимости (10), с увеличением глубины шлифования t параметр шероховатости поверхности R_a уменьшается. Следовательно, применяя схему глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали V_{dem} , можно одновременно добиться увеличения производительности обработки и уменьшения шероховатости обработанной поверхности при съеме значительных припусков. Это позволяет операции предварительного и окончательного шлифования объединить в одну операцию, что снижает трудоемкость обработки при одновременном увеличении производительности и обеспечении высокого качества обрабатываемых поверхностей.

Расчеты, выполненные на основе полученных зависимостей (6) и (2), показали, что для исходных данных: $V_{dem} = 10$ м/мин; $V_{kp} = 30$ м/мин; $t = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м; $m = 100$; $R = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м; $R_{kp} = 0,15$ м; $R_{dem} = 0,08$ м максимальная вероятностная (приведенная) толщина среза $H_{max} = 11,1$ мкм, а параметр шероховатости поверхности $R_a = 1,11$ мкм.

Расчетами, выполненными на основе зависимостей (1) и (2), для этих же исходных данных при условии $\eta = 0$ (т.е. для зерен конусообразной формы) установлено, что $H_{max} = 33$ мкм, а $R_a = 4,27$ мкм.

Приведенные экспериментальные исследования процесса круглого наружного шлифования алмазным кругом на металлической связке 1A1 300x25 AC6 200/160 4 M1-01 цилиндрической твердосплавной фрезы диаметром 160 мм (изготовленной из твердого сплава BK8) с режимом шлифования $V_{dem} = 10$ м/мин; $V_{kp} = 30$ м/мин; $t = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м показали, что для этих же исходных данных параметр шероховатости поверхности $R_a = 2,0$ мкм.

Как видно, расчетные значения параметра шероховатости поверхности R_a отличаются от экспериментального значения. Так, при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами сферической формы расчетное значение R_a в 1,8 раза меньше экспериментального значения, а при шлифовании алмазным кругом с режущими зернами конусообразной формы, наоборот, расчетное значение R_a в 2,13 раз больше экспериментального значения. Следовательно, расчет параметра шероховатости поверхности R_a необходимо производить по зависимости (3), рассматривая режущие зерна в форме усеченного конуса с учетом безразмерного коэффициента $\eta > 0$, т.е. с учетом

образования на зернах конусообразной формы “площадок износа”, определяемых величиной линейного износа зерен x и, соответственно, безразмерным коэффициентом $\eta > 0$.

Расчеты, выполненные на основе зависимости (2), показали, что экспериментальное значение параметра шероховатости поверхности $R_a = 2,0 \text{ мкм}$ достигается при значениях $H_{max} = 19 \text{ мкм}$ и $\eta = 0,45$.

Экспериментально установлено, что при алмазном шлифовании с параметрами режима резания $V_{dem} = 1 \text{ м/мин}$ и $t = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ параметр шероховатости поверхности $R_a = 1,5 \text{ мкм}$. Тогда для зерен сферической формы параметры H_{max} и R_a принимают значения: $H_{max} = 3,21 \text{ мкм}$ и $R_a = 0,17 \text{ мкм}$. Соответственно, для зерен конусообразной формы (при условии $\eta = 0$): $H_{max} = 18,8 \text{ мкм}$ и $R_a = 1,43 \text{ мкм}$.

Как видно, расчетное значение R_a для зерен конусообразной формы ($\eta = 0$) незначительно отличается от экспериментально установленного значения. Следовательно, в этом случае шлифование производится алмазным кругом с режущими зернами конусообразной формы фактически с нулевой величиной их линейного износа ($x \rightarrow 0$, $\eta \rightarrow 0$). С физической точки зрения это означает, что в связи с небольшой скоростью детали $V_{dem} = 1 \text{ м/мин}$ режущие зерна фактически не износились, тогда как при увеличении скорости детали до значения $V_{dem} = 10 \text{ м/мин}$ шлифование осуществлялось зернами со значительными “площадками износа”, т.е. почти сферическими зернами. Из этого вытекает, что с увеличением скорости детали V_{dem} (соответственно, производительности обработки) в связи с повышенной силовой напряженностью процесса шлифования происходит увеличение площадок износа на режущих зернах. Поэтому при расчете шероховатости поверхности режущие зерна можно рассматривать в форме сферы. При шлифовании алмазным кругом после правки, т.е. острозаточенным кругом, режущие зерна можно рассматривать в форме конуса. При уточненном расчете шероховатости поверхности режущие зерна алмазного круга следует рассматривать в форме усеченного конуса, учитывая размеры образующейся площадки износа на зерне с помощью безразмерного коэффициента η , равного нулю для острозаточенного зерна и изменяющегося в пределах 0...1 – для изношенного зерна. Таким образом, теоретически и экспериментально доказано, что для расчета параметра шероховатости поверхности R_a по зависимостям (2) или (3) необходимо знать количественные значения параметра H_{max} или безразмерного коэффициента η .

Расчетами установлено, что при $V_{dem} = 10 \text{ м/мин}$ отношение $H_{max}/R = 0,33$, а при $V_{dem} = 1 \text{ м/мин}$ соответственно $H_{max}/R = 0,188$. Согласно

известным экспериментальным данным профессоров Крагельского И. В. и Богомолова Н. И., в первом случае процесс стружкообразования при резании протекает в устойчивом режиме, тогда как во втором случае имеет место переход от процесса упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала (без образования микростружек) к процессу стружкообразования при резании. Этим обусловлена незначительная силовая напряженность процесса шлифования и соответственно образование незначительных площадок износа на режущих зернах круга. Следовательно, уменьшение отношения H_{max}/R приводит к уменьшению шероховатости обработанной поверхности, чем, собственно, и объясняется эффективность применения на финишных операциях обработки деталей машин процессов абразивного полирования и доводки, обеспечивающих существенное уменьшение шероховатости обработанной поверхности.

Выводы. В работе приведены аналитические зависимости для определения параметра шероховатости поверхности R_a при шлифовании, полученные на основе теоретико-вероятностного подхода при моделировании режущих зерен круга в форме конуса и сферы. Показано, что моделирование режущих зерен круга в форме сферы приводит к заниженным значениям параметра шероховатости поверхности R_a , а моделирование режущих зерен круга в форме конуса, наоборот, к завышенным значениям параметра R_a по сравнению с экспериментальными данными. Поэтому для определения параметра R_a при шлифовании алмазным кругом после правки предложено режущие зерна рассматривать в форме конуса, а после приработки круга и их износа – в форме сферы.

При уточненном расчете шероховатости поверхности режущие зерна круга следует рассматривать в форме усеченного конуса, учитывая размеры образующейся площадки износа на зерне с помощью безразмерного коэффициента, равного нулю для острозаточенного зерна и изменяющегося в пределах 0...1 – для изношенного зерна. На основе полученных результатов исследований даны практические рекомендации по уменьшению шероховатости поверхности при шлифовании.

Список литературы

1. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
2. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 245 с.
3. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
4. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 212 с.
5. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов, 1979. – 232 с.
6. 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, 1995. – 36 с.

7. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування: моно-графія / Ф. В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.

Bibliography (transliterated)

1. Maslov Ye.N. Teoriya shlifovaniva metallov / Ye.N. Maslov. – Moscow: Mashinostroyenie, 1974. – 319 p.
2. Filimonov L.N. Vysokoskorostnoye shlifovaniye / L.N. Filimonov. – Leningrad.: Mashinostroyenie, 1979. – 245 p.
3. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsesssa shlifovaniva / A.V. Yakimov. – Moscow: Mashinostroyenie, 1975. – 175 p.
4. Korolev A.V. Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke / A.V. Korolev. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. – 212 p.

5. Novoselov Yu.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke / Yu.K. Novoselov. – Saratov, 1979. – 232 p.
6. Novikov F.V. Fizicheskiye i kinematicheskiye osnovy vysokoproizvoditel'nogo almaznogo shlifovaniva: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk: spets. 05.03.01 "Protsessy mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty" / F.V. Novikov. – Odessa, 1995. – 36 p.
7. Novikov F. V. Visokoproduktivne almazne shlifuvannya : monografiya / F. V. Novikov. – Kharkiv: Vid. KhNEU, 2014. – 412 p.

*Поступила (received) 26.10.2017**Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

Формування шорсткості поверхні деталей машин в процесі шліфування / О. С. Кленов, С. О. Дитиненко, А. Г. Крюк, Ф. В. Новіков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 31–35. – Біблиогр.: 7 назв.– ISSN 2519-2671

Формирование шероховатости поверхности деталей машин в процессе шлифования / О. С. Кленов, С. А. Дитиненко, А. Г. Крюк, Ф. В. Новиков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 31–35. – Біблиогр.: 7 назв.– ISSN 2519-2671

Forming of a roughness of a surface of details of machines in the course of grinding / O.S. Klenov, S.A. Ditinenko, A.G. Kriuk, F.V. Novikov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 31–35. – Bibl.:7. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кленов Олег Станиславович – канд. техн. наук, директор, Фирма “ДиМерус Инженеринг”, г. Харьков; тел.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com

Кленов Олег Станиславович – канд. техн. наук, директор, Фірма "ДіМерус Інженеринг", м. Харків; тел.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com

Klenov Oleg Stanislavovich – Cand. tech. Sci., Director, Firm "DiMerus Engineering", Kharkov; Tel. : +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com

Дитиненко Станіслав Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-0678924575; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Дитиненко Станіслав Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Природоохранные технологии, экология и безопасность жизнедеятельности» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнецова, г. Харьков; тел.: +38-0678924575; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Ditinenko Stanislav Aleksandrovich – PhD, associate professor of "Environmental technologies, ecology and life safety" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets on Kharkiv; tel. +38-0678924575; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Крюк Анатолий Григорьевич – кандидат технических наук, профессор кафедры «Природоохранные технологии, экология и безопасность жизнедеятельности» Харьковского национального экономического университета, г. Харьков. тел.: +38-0665936393; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Крюк Анатолій Григорович – кандидат технічних наук, професор кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-0665936393; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Kryuk Anatoly Grykorievich – candidate of technical sciences, professor of the department "Environmental technologies, ecology and life safety" of the Semen Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv; tel.: +38-0665936393; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Новіков Федір Васильович – доктор технічних наук, професор кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» 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 кафедры «Природоохранные технологии, экология и безопасность жизнедеятельности» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнецова, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Novikov Fedor Vasilivth – Doctor of Technical Sciences Professor of the Department "Environmental technologies, ecology and life safety" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

УДК 621.98: 621.771.63

В. В. КУХАР, О. С. АНІЩЕНКО, М. М. НАГНІБЕДА

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЛІСТОВОЇ ЗАГОТОВКИ ПРИ ГНУТТІ З ВРАХУВАННЯМ ЗМІЩЕННЯ МАТЕРІАЛУ

У роботі розглянуто характер напружено-деформованого стану листових заготовок при гнутті різними способами. Розглянуто методи досліджень залишкових напружень та деформацій і величини пружинення при гнутті листових заготовок. Показана природа формування різновідмінного напружено-деформованого стану на зовнішньому та внутрішньому радіусах згинання заготовки. В основу досліджені покладені математичні моделі, що отримані на базі методу механіки суцільних середовищ, методика визначення напружено-деформованого стану за геометричними розмірами заготовки, дані з апроксимації кривих зміщення різних матеріалів, у тому числі й тих, що отримані за результатами власних досліджень. Наведені вирази, що дозволяють розраховувати компоненти тензорів, які відповідають за пружну і пластичну складову деформації при гнутті. Розроблено порядок розрахунку напружено-деформованого стану листових заготовок при гнутті із визначенням місця, де використовують рівняння, що апроксимують криву течії матеріалу. Розроблена методика може бути корисною при проєктуванні технологій гнуття, профілювання на багатовалкових станах для визначення напружено-деформованого стану, залишкових напружень і пружинення у заготовці на переходах деформації.

Ключові слова: гнуття; листова заготовка; методика; кут пружинення; напруження; деформації.

В работе рассмотрен характер напряженно-деформированного состояния листовых заготовок пригибе различными способами. Рассмотрены методы исследования остаточных напряжений и деформаций и величины пружинения пригибе листовых заготовок. Показана природа формирования разнородного напряженного состояния на внешнем и внутреннем радиусах изгиба заготовки. В основу исследований положены математические модели, полученные на базе метода механики сплошных сред, методика определения напряженного и деформированного состояния по геометрическим размерам заготовки, данные с аппроксимации кривых упрочнения различных материалов, в том числе и тех, которые получены по результатам собственных исследований. Приведенные выражения, позволяющие рассчитывать компоненты тензоров, которые отвечают за упругую и пластическую составляющую деформаций пригибе. Разработан порядок расчета напряженно-деформированного состояния листовых заготовок пригибе с определением места, где используют уравнения, аппроксимирующие кривую течения материала. Разработанная методика может быть полезна при проектировании технологий гибки, профилирования на многоглавковых станах для определения напряженно-деформированного состояния, остаточных напряжений и пружинения в заготовке на переходах деформации.

Ключевые слова: гибки; листовая заготовка; методика; угол пружинения; напряжения; деформации

Character of the stress-strain state of sheet blanks during bending by different methods is considered in the paper. The methods of research of residual stresses and strains and the magnitude of the spring-back at bending of sheet blanks are considered. The nature of the formation of a heterogeneous stressed state on the external and internal radii of bending of the workpiece is shown. The research is based on the mathematical models obtained and grounded on the method of continuous mechanics of materials, the method of determining the stress and strain state according to the geometric dimensions of the workpiece, data from the approximation of the stress-strain curves for various materials, including results obtained from the own research. The equations are given that allow us to calculate the components of the tensors responsible for the elastic and plastic parts of the deformations (strains) at the bending. The order of calculation of stress-strain state of sheet blanks during bending is developed with the definition of a region where the approximating equations of the stress-strain curve of material flow are used. The developed method can be useful at the design of bending technologies, roll-forming on a multi-roller mills to determine the stress-strain state, residual stresses and spring-back in the perform blank at the deformation stages.

Keywords: bending; sheet blank; method; spring-back angle; stress; strain.

Вступ. Гнуття листових заготовок є вельми поширеною операцією листового штампування. Гнуттям отримують як однічні вироби, так і сталеві армуючі холодногнуті профілі. Питаннями розробки сортаменту спеціальних гнутих профілів і освоєння виробництва постійно приділяється значна увага з причини ефективності їх застосування.

До теперішнього часу відомості, які б описували напружений стан матеріалу та залишкових напружень при гнутті профілів, є такими, що потребують уточнення як з точки зору врахування геометрії та багатоперехідності процесу гнутті, так і з точки зору врахування властивостей реального матеріалу заготовки. Дослідження розрахунку кінцевої формозміни і напружено-деформованого стану повинні бути науково обґрунтованими і базуватись на результатах теоретичних розрахунків, що підкріплені експериментом. Неврахування таких важливих факторів, як пружинення, яке, в свою чергу, залежить від властивостей матеріалу заготовки, приводить до невідповідності кінцевих розмірів профілів потрібної конфігурації і дефектоутворенню у міжвалковому просторі профілезгинальних станів.

Тому актуальним напрямком наукових досліджень є розробка методики розрахунку напружено-деформованого стану листових заготовок при гнутті з врахуванням зміщення матеріалу заготовки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На сьогодні гнуті вироби і гнутий профіль є одними з найбільш поширених продуктів виробництв з обробки металів тиском на ринку України і світу. Питаннями розробки сортаменту спеціальних гнутих профілів і освоєння виробництва постійно приділяється значна увага за кордоном з причини ефективності їх застосування. Найшире і найрізноманітніше застосування подібні спеціальні профілі знаходять в сучасному будівництві, вагонобудуванні, автомобілебудуванні [1].

Гнутий профіль отримують в ході процесу пластичної деформації заготовки на багатовалкових профілезгинальних станах або у штампі. Знаходячись в області пластичної деформації, форма заготовки може бути змінена, а величина напружень, яким піддається заготовка, вища за границю текучості, але нижча за границю міцності матеріалу на розрив [2].

Теоретична основа гнуття листового металу вивчена фахівцями в цій області і застосована при певних технологічних параметрах виробництва гнутих виробів і профілів. Проте технології гнуття-прокатки профілів дуже різноманітні: згинання може бути виконано на профілезгинальніх станах різної конструкції, кількість переходів гнуття-формовки залежить від складності профілю (в деяких випадках кількість переходів гнуття досягає двадцяти і більше), тут слід враховувати властивості матеріалу заготовки і тому подібне. Ці обставини впливають на динаміку зміни напруженено-деформованого стану заготовки при багатоперехідному гнутті і, відповідно, на залишкові напруження в профілі, що має вплив і на його фінішну геометричну форму. Це робить актуальним вдосконалення теоретичних методик визначення кута пружинення, як основного прояву залишкового напруження в заготовках [3]. Дані теоретичного аналізу, отримані методом скінчених елементів, дозволяють визначити значення залишкового напруження та деформації, наблизені до дійсних, проте із зростанням номенклатури профілів, діапазону товщини заготовок, кількості переходів гнуття, погрішність розрахунків є непрогнозованою і залежить від початкових даних, що задаються, і граничних умов [4–6].

Процес згинання з урахуванням пружнопластичної деформації був змодельований методом скінчених елементів для дослідження кута пружинення і впливу технологічних параметрів, включаючи радіус і висоту пuhanсону (рис. 1). Проте в цій роботі деформації при знятті навантаження не розглянуті, при моделюванні властивості матеріалу заготовки враховані недостатньо. Під час деформації, зовнішній шар поверхні заготовки піддається найбільшому розтягуванню, яке потім поширяється по товщині металу з формуванням зони розтягування і зони стискання, а, відповідно, і нейтрального шару усередині заготовки (рис. 2 та рис. 3). Зрозуміло, що якісні (а іноді і кількісні) характеристики зон розтягування і стискання при гнутті змінюються залежно від розмірів заготовки, технологічних умов і властивостей матеріалу, що вимагає додаткового врахування в методиці розрахунку напруженено-деформованого стану і залишкових напружень.

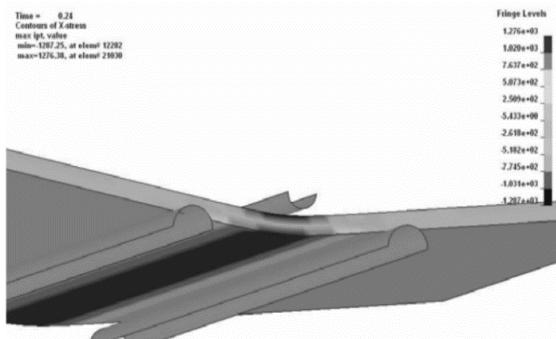


Рис. 1 – Залишкові напруження в заготовці при гнутті [4]

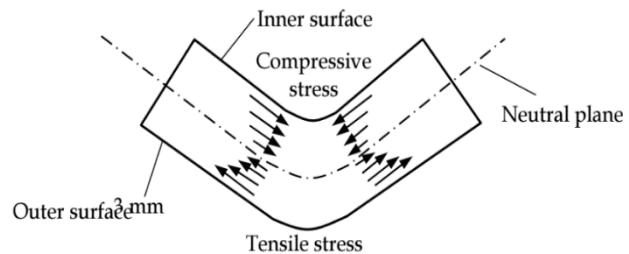


Рис. 2 – Розподіл напружень у середині заготовки при гнутті [6]

Внутрішні напруження у металу призводять до часткового відновлення початкової форми заготовки. Моделювання, виконане у роботах [7, 8], показало, що кут пружинення (рис. 4) може бути визначений у тому числі й на основі теоретичного аналізу результатів моделювання. Проте, коректні, такі, що відповідають експерименту, данні моделювання можливо отримати тільки у вузькому діапазоні деформацій.

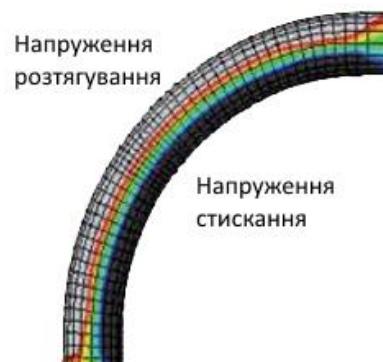


Рис. 3 – Розподіл напружень по товщині металу, що деформується [7]

Чисельне моделювання використовували для зменшення часу і витрат випробувань, а метод скінчених елементів є основним при вивченні різних параметрів процесу і дає уявлення про аналітичну модель гнуття листового металу і формування залишкових напружень усередині заготовки, які характеризують розвиток кута пружинення [8, 9]. При цьому метод скінчених елементів не дозволяє отримати розрахункові залежності, які можуть бути рекомендовані технологам. Крім того, метод вимагає використання потужної комп'ютерної техніки і спеціального програмного забезпечення, що дорого коштує.

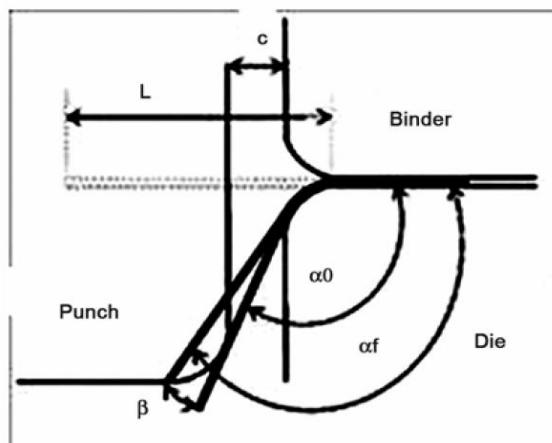


Рис. 4 – Визначення кута пружинення при гнутті листової заготовки [8]

Таким чином аналіз останніх досліджень і публікацій показує гостру необхідність в розробці методики розрахунку напруженено-деформованого стану, залишкових напружень при згинальніх операціях (у тому числі, при багатоперехідному гнутті), що враховують не лише геометричні фактори, а й властивості матеріалу заготовки, тобто характер зміщення. Методика повинна містити аналітичні залежності для визначення компонентів тензорів, рівнянь, що описують криві зміщення матеріалів, що необхідно для використання у технологічних розрахунках.

Мета дослідження. Розробка методики розрахунку показників напруженено-деформованого стану і залишкових напружень при гнутті листових заготовок, яка б враховувала зміщення матеріалу у вигляді аналітичних функцій залежності напруження течучості від фактора деформації.

Виклад основного матеріалу. Розглядали напруженено-деформований стан металу при згинанні профілю, застосувавши метод механіки суцільних середовищ з використанням полів швидкостей переміщень [10, 11]. Відомо, що компоненти тензора швидкості деформацій: $\dot{\varepsilon}_r$, $\dot{\varepsilon}_\varphi$, $\dot{\varepsilon}_z$, $\dot{\gamma}_{r\varphi}$, $\dot{\gamma}_{\varphi z}$, $\dot{\gamma}_{zr}$ пов'язані зі швидкостями переміщень V_r , V_φ , V_z наступними рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_r &= \frac{\partial V_r}{\partial r}; \quad \dot{\varepsilon}_\varphi = \frac{\partial V_\varphi}{\partial r\varphi} + \frac{V_r}{r}; \quad \dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}; \\ \dot{\gamma}_{r\varphi} &= \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r} + \frac{\partial V_r}{\partial \varphi}; \quad \dot{\gamma}_{\varphi z} = \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} + \frac{\partial V_r}{\partial \varphi}; \quad \dot{\gamma}_{zr} = \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Запишемо зв'язок між компонентами тензора швидкостей деформацій і компонентами тензора напружень (σ_r ; σ_φ ; σ_z ; $\tau_{r\varphi}$; $\tau_{\varphi z}$; τ_{zr}):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma + 2\mu_i \dot{\varepsilon}_r; \quad \sigma_\varphi = \sigma + 2\mu_i \dot{\varepsilon}_\varphi; \quad \sigma_z = \sigma + 2\mu_i \dot{\varepsilon}_z; \\ \tau_{r\varphi} &= \mu_i \dot{\gamma}_{r\varphi}; \quad \tau_{\varphi z} = \mu_i \dot{\gamma}_{\varphi z}; \quad \tau_{zr} = \mu_i \dot{\gamma}_{zr}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Тут μ_i – коефіцієнт жорсткості, залежний від характеристик механічних властивостей металу, а

також від отримуваних тілом деформацій і їх швидкостей:

$$\mu_i = \frac{\sigma_i}{3\dot{\varepsilon}_i}. \quad (3)$$

де σ_i та $\dot{\varepsilon}_i$ – інтенсивності напружень і швидкостей деформацій відповідно.

Інтенсивність напружень σ_i і швидкостей деформацій $\dot{\varepsilon}_i$ визначаються виразами:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_r - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\varphi - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6(\tau_{r\varphi}^2 + \tau_{\varphi z}^2 + \tau_{zr}^2) \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\dot{\varepsilon}_r - \dot{\varepsilon}_\varphi)^2 + (\dot{\varepsilon}_\varphi - \dot{\varepsilon}_z)^2 + (\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_r)^2 + \frac{3}{2} (\dot{\gamma}_{r\varphi}^2 + \dot{\gamma}_{\varphi z}^2 + \dot{\gamma}_{zr}^2) \right]^{1/2} \quad (5)$$

Для ідеально пластичного матеріалу приймають $\sigma_i = \sigma_s$. Для матеріалу, що зміцнюється, інтенсивність напружень представляють у вигляді функції, яка описує криву текучості матеріалу: $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, де ε_i – інтенсивність деформацій. Такі функції можуть бути отримані у вигляді апроксимуючих рівнянь, наприклад, у вигляді ступеневої функції: $\sigma_i = A\varepsilon_i^m$, де A , m – сталі для досліджуваного матеріалу, які визначаються експериментально після стандартних випробувань зразків на розтягування-стискання.

Інтенсивність деформацій ε_i знаходять згідно з рівнянням:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(e_r - e_\varphi)^2 + (e_\varphi - e_z)^2 + (e_z - e_r)^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{r\varphi}^2 + \gamma_{\varphi z}^2 + \gamma_{zr}^2) \right]^{1/2} \quad (6)$$

Залежності для пружної формозміни відрізняються від аналогічних залежностей для процесу пластичної формозміни лише значенням коефіцієнта жорсткості μ_i , який при пластичній формозміні визначається виразом (3), а при пружному – виразом:

$$\mu_i = \frac{E}{2}(1+\nu), \quad (7)$$

де E – модуль пружності першого роду; ν – коефіцієнт Пуассону.

Таким чином, для дослідження напруженено-деформованого стану металу скористалися рівняннями методу механіки суцільних середовищ [10, 11] з використанням поля швидкостей переміщень (приймаючи $\nu = 0,5$). При пружиненні переміщення матеріальних точок в місці вигину протилежні до переміщень при пластичній формозміні.

Позначимо геометричні чинники: R_H та R_B – зовнішній та внутрішній радіуси згинання заготовки; $\rho = \sqrt{R_H R_B}$ – радіус нейтрального шару напруження; r – поточний радіус у поперечному перерізі

заготовки, що згинають; V_0 – швидкість руху інструменту; b – ширина полки, що згинають.

Момент, що вигинає, визначається виразом:

$$M = \frac{\sigma_s}{2\sqrt{3}} b (R_H - R_B)^2. \quad (8)$$

У результаті перетворень, виконаних згідно з підходами, що викладені у роботах [10–12], отримали наступні вирази для розрахунків компонентів тензорів, які характеризують напруженодеформований стан заготовки.

Компоненти напружень для зовнішнього шару (пластична деформація), $R_H = r \geq \rho$:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_s \ln \frac{R_H}{r} = 0,867 \sigma_s \ln \frac{R_H}{r}; \\ \sigma_\varphi &= \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left(\frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 2 \right) = 0,578 \sigma_s \left(\frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 2 \right); \\ \sigma_z &= \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left(\frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 1 \right) = 0,578 \sigma_s \left(\frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Компоненти напружень для внутрішнього шару (пластична деформація), $R_H = r \leq \rho$:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_s \ln \frac{R_B}{r} = 0,867 \sigma_s \ln \frac{R_B}{r}; \\ \sigma_\varphi &= \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left(\frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 2 \right) = 0,578 \sigma_s \left(\frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 2 \right); \\ \sigma_z &= \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left(\frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 1 \right) = 0,578 \sigma_s \left(\frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Компоненти тензора напружень при пружному чистому циліндричному вигині:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{M}{K} \left[3 \ln \frac{r}{\rho} - 4 + \frac{3}{2} R_H R_B \left(\frac{1}{r^2} + \frac{5}{3\rho^2} \right) \right]; \\ \sigma_\varphi &= -\frac{M}{K} \left[3 \ln \frac{r}{\rho} + \frac{5}{2} R_H R_B \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) \right]; \\ \sigma_z &= -\frac{M}{K} \left[3 \ln \frac{r}{\rho} - 2 + \frac{1}{2} R_H R_B \left(5 \frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{r^2} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

У формулах (9–11) значення K розраховують як [10, 11]:

$$\left. \begin{aligned} K &= -3 \left(\frac{R_H^3 - R_B^3}{2} \right) \left(\ln \frac{R_H}{R_B} - \frac{1}{2} \right) + \\ &+ \frac{5}{2} R_H R_B \rho \left[\ln \frac{R_H}{R_B} - \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{R_H^2 - R_B^2}{2} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Складаючи компоненти напружень для пластичних і пружних деформацій, отримуємо вирази для залишкового напруження в місці згинання.

При $R_H = r \geq \rho$ маємо:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_s \ln \frac{R_H}{r} + \frac{M}{K} \left[3 \ln \frac{r}{\rho} - 4 + \frac{3}{2} R_H R_B \left(\frac{1}{r^2} + \frac{5}{3\rho^2} \right) \right]; \\ \sigma_\varphi &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 2 \right) + \frac{M}{K} \left[3 \ln \frac{r}{\rho} + \frac{5}{2} R_H R_B \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) \right]; \\ \sigma_z &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 1 \right) + \frac{M}{K} \left[3 \ln \frac{r}{\rho} - 2 + \frac{1}{2} R_H R_B \left(5 \frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{r^2} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

При $R_H = r \leq \rho$:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_s \ln \frac{R_B}{r} + \frac{M}{K} \left[3 \ln \frac{r}{\rho} - 4 + \frac{3}{2} R_H R_B \left(\frac{1}{r^2} + \frac{5}{3\rho^2} \right) \right]; \\ \sigma_\varphi &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 2 \right) + \frac{M}{K} \left[3 \ln \frac{r}{\rho} + \frac{5}{2} R_H R_B \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) \right]; \\ \sigma_z &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(\frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 1 \right) + \frac{M}{K} \left[3 \ln \frac{r}{\rho} - 2 + \frac{1}{2} R_H R_B \left(5 \frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{r^2} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Формули (8–14) є основою математичної моделі для розрахунку напруженено-деформованого стану та залишкових напружень у процесах гнуття.

При розрахунку ступеня зміщення листової заготовки в процесі профілювання важливо коректно визначити ступінь деформації.

Відомо, що для деяких варіантів гнуття і при профілюванні методом валкового формування деформація здійснюється в результаті чистого вигину заготовки і розтягування шарів металу на її зовнішній поверхні [13]:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left\{ \left[1 + \frac{S_0(1-k)}{R_B + S_0 k} \right] \frac{S_0}{S} \right\}, \quad (15)$$

де k – коефіцієнт зміщення нейтральної шари заготовки, що згибають;

S_0 – вихідна товщина заготовки;
 S – товщина зігнутої заготовки з урахуванням сточення в процесі профілювання [13]:

$$\Delta S = 0,0081 \cdot S_0 \sqrt{\frac{b}{R_B / S_0}}. \quad (17)$$

Величину опору матеріалу деформації при гнутті-профілюванні визначали згідно з гіпотезою єдиної кривої з випробувань зразків на розтяг. Рівняння, що описують моделі зміщення матеріалів записували згідно з даними джерела [13]:

сталі 10ХНДП:

$$\sigma_i = -3869,2 \varepsilon_i^2 + 1777,0 \varepsilon_i + 233,14; \quad (18)$$

сталь 3Гпс:

$$\sigma_i = -5527,6\epsilon_i^2 + 2273,3\epsilon_i + 26274; \quad (19)$$

сталь 09Г2:

$$\sigma_i = -762,53\epsilon_i^2 + 673,06\epsilon_i + 410,86; \quad (20)$$

сталь 10Г2ФБЮ:

$$\sigma_i = -34683\epsilon_i^3 - 16972\epsilon_i^2 + 2755,4\epsilon_i + 515,87. \quad (21)$$

Достовірність апроксимації для рівнянь (18–21) була на рівні $R^2 \geq 0,94$.

Також, для врахування властивостей реального матеріалу, нами були апроксимовані дані власних експериментальних досліджень, отриманих при випробуванні металу (сталі 08kp) гнутих профілів [14]. Графіки з рівняннями апроксимації наведені на рис. 5.

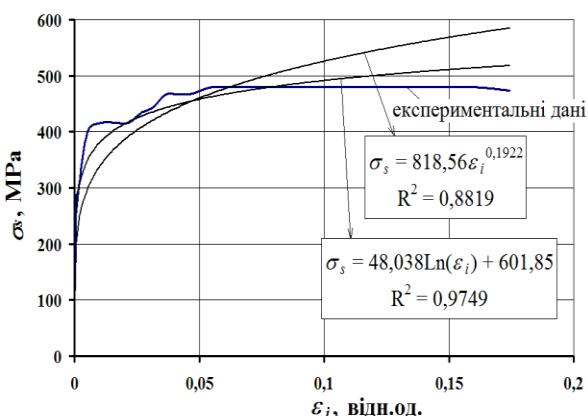


Рис. 5 – Апроксимація кривих зміщення сталі 08kp

Таким чином, отримані моделі зміщення сталі 08kp можуть бути представлені апроксимуючим ступеневим і логарифмічним рівняннями:

сталь 08kp:

$$\begin{cases} \sigma_i = 48,038\ln(\epsilon_i) + 601,085; \quad (R^2 = 0,9749), \\ \sigma_i = 818,56(\epsilon_i)^{0,1922}; \quad (R^2 = 0,8819). \end{cases} \quad (22)$$

Отримана методика може бути застосована при розрахунках напружено-деформованого стану і залишкових напруженій у процесах гнуття, що технологічно здійснюються за один чи багато переходів.

Висновки:

1. У результаті виконаного аналізу досліджень процесів гнуття встановлено, що приймально-здавальні характеристики гнутих деталей та профілів суттєво залежать від властивостей їх матеріалу, форми штампів, калібрів, заготовки, при цьому розрахунку та прогнозуванню кінцевої форми гнутого виробу приділяється недостатньо уваги. На кінцеву форму гнутого виробу суттєвий вплив має характер напружено-деформованого стану і залишкові напруження, які суттєво залежать від властивостей матеріалу заготовки.

2. Визначений порядок розрахунку характеристик напружено-деформованого стану листових заготовок при гнутті, при цьому визначене місце застосування моделей зміщення матеріалу у методиці розрахунку показників напруженій, деформацій і залишкових напруженій, які суттєво впливають на ефект пружинення заготовки.

3. Визначено, що моделі зміщення сталі 08kp, яку використовують при гнутті армуючих профілів, можуть бути апроксимовані логарифмічним і експоненціальним рівняннями; встановлений вид цих рівнянь.

Список літератури

- Применение гнутых профилей проката: справочник / И. С. Тришевский, Г. В. Донец, М. Е. Докторов и др. – М.: Металлургия, 1975. – 421 с.
- Banabic D. Sheet Metal Forming Processes, Constitutive Modeling and Numerical Simulation / D. Banabic. – Berlin: Springer-Verlag, 2010. – 318 p.
- Zemin Fu. Study on multiple-step incremental air-bending forming of sheet metal with springback model and FEM simulation / Zemin Fu, Jianhua Mo, Wenxian Zhang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 45. – P. 448–458. – doi.org/10.1007/s00170-009-1982-2
- Cedric Xia Z. Constitutive Modeling of Advanced High-Strength Steels for Springback Simulation / Z. Cedric Xia // Computational Mechanics. – Springer-Berlin, Heidelberg, 2007. – P. 299.
- Yu T. X. Influence of axial force on elastic-plastic bending and springback of a beam / T. X. Yu //Journal of Mechanical Working Technology. – Vol. 6. – 1982. – P. 5–21. hdl.handle.net/1783.1/64563
- Thippakmas S. Finite Element Analysis on V-Die Bending Process / S. Thippakmas // Finite Element Analysis. – David Moratal (Ed.). – Sciendo, 2010. – P. 407–428. – DOI: 10.5772/58224
- Nandanwar P. S. Analysis of spring back defect in right angle bending process in sheet metal forming / P. S. Nandanwar, P.S. Bajaj, P.D. Patil // Pratibha: International Journal of Science, Spirituality, Business and Technology. – Vol. 3, No. 1. – 2014. – P. 18–22.
- Experimental and numerical investigations of sheet metal circular bending / Viorel Paunoiu, Mamane Abdou Saadatou, Dumitru Nedelcu, Mircea Octavian // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. – Vol. 22. – 2015. – P. 487–496.
- Hama T. Effects of finite element type on springback simulation of a high strength steel sheet / T. Hama, M. Banu // The Annals of "DUNAREA DE JOS" University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building. – 2009. – P. 75–80.
- Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов / Ю. Н. Алексеев. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1958. – 188 с.
- Алексеев Ю. Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием / Ю. Н. Алексеев. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1969. – С. 107.
- Ильюшин А. А. Механика сплошной среды / А. А. Ильюшин. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 285 с.
- Методика определения показателя прочности холдингнутого профиля / Н. Г. Шемшурова, О. В. Ионова, Н. М. Локотушина, Е. М. Седова // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межрегионал. сб. науч. тр. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – С. 215–219.
- Кухарь В. В. Испытание армирующих профилей и определение их прочностных и геометрических характеристик / В. В. Кухарь, Н. Н. Нагибідова // Проблемы трибології = Problems of tribology. – Хмельницький ХНУ, 2016. – №1(79). – С. 30–35.

Bibliography (transliterated)

- Primenie gnutikh profilej prokata: spravochnik [Application of bent roll profiles: reference book] / S. S. Trishevskiy, G. V. Donets, M. E. Doktorov [etc.]. – Moscow: Metallurgiya [Metallurgy], 1975, 421 p.
- Banabic D. Sheet Metal Forming Processes, Constitutive Modeling and Numerical Simulation / D. Banabic. – Berlin: Springer-Verlag, 2010. – 318 p.
- Zemin Fu. Study on multiple-step incremental air-bending forming of sheet metal with springback model and FEM simulation /

- Zemin Fu, Jianhua Mo, Wenxian Zhang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 45. – P. 448–458. – doi.org/10.1007/s00170-009-1982-2
4. Cedric Xia Z. Constitutive Modeling of Advanced High-Strength Steels for Springback Simulation / Z. Cedric Xia // Computational Mechanics. – Springer-Berlin, Heidelberg, 2007. – P. 299.
 5. Yu T. X. Influence of axial force on elastic-plastic bending and springback of a beam / T. X. Yu //Journal of Mechanical Working Technology. – Vol. 6. – 1982. – P. 5–21. – hdl.handle.net/1783.1/64563
 6. Thippakmas S. Finite Element Analysis on V-Die Bending Process / S. Thippakmas // Finite Element Analysis. – David Moratal (Ed.). – Scyo, 2010. – P. 407–428. – doi: 10.5772/58224
 7. Nandanwar P. S. Analysis of spring back defect in right angle bending process in sheet metal forming / P. S. Nandanwar, P.S. Bajaj, P.D. Patil // Pratibha: International Journal of Science, Spirituality, Business and Technology. – Vol. 3, No. 1. – 2014. – P. 18–22.
 8. Experimental and numerical investigations of sheet metal circular bending / Viorel Paunoiu, Mamane Abdou Saadatou, Dumitru Nedelcu, Mircea Octavian // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. – Vol. 22. – 2015. – P. 487–496.
 9. Hama T. Effects of finite element type on springback simulation of a high strength steel sheet / T. Hama, M. Banu // The Annals of "DUNAREA DE JOS" University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building. – 2009. – P. 75–80.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методика розрахунку напруженно-деформованого стану листової заготовки при гнуttі з врахуванням зміщення матеріалу / В. В. Кухар, О. С. Аніщенко, М. М. Нагнібеда // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 36–41. – Бібліогр.: 14 назв.– ISSN 2519-2671

Методика расчета напряженно-деформированного состояния листовой заготовки при гибке с учетом упрочнения материала / В. В. Кухарь, А. С. Анисченко, Н. Н. Нагнибеда // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 36–41. – Бібліогр.: 14 назв.– ISSN 2519-2671

Method of calculation of stress-strain state of sheet blank during bending correlated to the material hardening / Kurhar, V., Anishchenko, O., Nagnibeda, M. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 36–41. – Bibl.:14. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кухар Володимир Валентинович – доктор технічних наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», професор, завідувач кафедри обробки металів тиском, м. Маріуполь, Україна; e-mail: kvv.mariupol@gmail.com

Кухарь Владимир Валентинович – доктор технических наук, профессор, ДВНЗ «Приазовский государственный технический университет», профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, г. Мариуполь, Украина; e-mail: kvv.mariupol@gmail.com

Volodymyr Kukhar – Doctor of science (D.Sc.Tech.), Professor, Chief of metalforming department, Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine; e-mail: kvv.mariupol@gmail.com

Аніщенко Олександр Сергійович – кандидат технічних наук, ст. наук. співробітник., ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», доцент кафедри обробки металів тиском, м. Маріуполь, Україна; e-mail: aas540628@gmail.com

Анищенко Александр Сергеевич – кандидат технических наук, ст. науч. сотрудник., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», доцент кафедры обработки металлов давлением, г. Мариуполь, Украина; e-mail: aas540628@gmail.com

Oleksandr Anishchenko – candidate of technical sciences (Ph. D.), senior researcher, assistant professor of metalforming department, Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine; e-mail: aas540628@gmail.com

Нагнібеда Микита Миколайович – магістрант кафедри обробки металів тиском, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна; e-mail: fox7941@gmail.com

Нагнібеда Никита Николаевич – магистрант кафедры обработки металлов давлением, ДВНЗ «Приазовский государственный технический университет», г.. Мариуполь, Украина; e-mail: fox7941@gmail.com

Mykyta Nagnibeda – master-student of metalforming department, Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine; e-mail: fox7941@gmail.com

УДК 621.879

В. В. ЛОТОУС, В. В. ДРАГОБЕЦЬКИЙ, А. А. СИМОНОВА, Е. А. НАУМОВА, А. А. ЮРКО, Н. И. СОКУР
НОВЫЙ МЕТОД УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Анализ основных направлений повышения технического уровня, рабочих и эксплуатационных характеристик деталей горного оборудования позволил сформулировать цель исследования. Последняя состоит в сопоставлении методов повышения износостойкости деталей горного оборудования, выявления наиболее эффективных физических воздействий на обрабатываемый материал и разработка нового метода упрочняющей обработки, не исключая применимости других более дешевых износостойких материалов. Разработка нового ударно-фрикционного способа упрочнения базируется на использовании различных логических средств и эвристических умозаключений. Сопоставлением методов фрикционного и взрывного упрочнения установлен новый способ фрикционно-ударной обработки. Способ упрочнения более мобилен, эффективность упрочнения в 1,2-1,3 раз выше. Впервые предложено совмещенное комбинированное воздействие на обрабатываемый материал фрикционное и ударно-волновое. Применение нового способа обработки позволило повысить износостойкость деталей горного оборудования в 1,5-1,7 раз, расширить функциональные возможности метода обработки путем его применения в процессе эксплуатации упрочняемых элементов конструкции.

Ключевые слова: упрочнение, износостойкость, горное оборудование, фрикционный метод, удар.

Аналіз основних напрямків підвищення технічного рівня, робочих та експлуатаційних характеристик деталей гірничого обладнання дозволив сформулювати мету дослідження. Остання складається в зіставленні методів підвищення зносостійкості деталей гірничого обладнання, виявлення найбільш ефективних фізичних впливів на оброблюваний матеріал і розробка нового методу зміцнюючої обробки не виключаючи застосування інших більш дешевих зносостійких матеріалів. Розробка нового ударно-фрикційного способу зміцнення базується на використанні різних логічних засобів і евристичних виводів. Зіставленням методів фрикційного й вибухового зміцнення встановлений новий спосіб фрикційно-ударної обробки. Спосіб зміцнення більш мобільний, ефективність зміцнення в 1,2-1,3 разів вище. Вперше запропоновано поєднано комбінований вплив на оброблюваний матеріал фрикційне й ударно-хвильове. Застосування нового способу обробки дозволило підвищити зносостійкість деталей гірничого обладнання в 1,5-1,7 разів, розширити функціональні можливості методу обробки шляхом його застосування в процесі експлуатації зміцнюючих елементів конструкції.

Ключові слова: зміцнення, зносостійкість, гірниче обладнання, фрикційний метод, удар.

The analysis of the main directions of increasing the technical level, working and operational characteristics of mining equipment components allowed to formulate the research goal. The latter consists in comparing the methods for increasing the wear resistance of mining equipment parts, identifying the most effective physical effects on the material being processed, and developing a new method of strengthening treatment, without excluding the applicability of other cheaper wear-resistant materials. The development of a new shock-friction method of hardening is based on the use of various logical means and heuristic inferences, deductive and inductive methods on the following aspects: technology, functionality, field of application, material and technical supply. A new method of frictional shock treatment is determined by comparing the methods of frictional and explosive hardening. The hardening method is more mobile, the hardening efficiency is 1.2-1.3 times higher. For the first time a combined effect, frictional and shock-wave on the material to be treated is proposed. The application of the new method made it possible to increase the wear resistance of mining equipment parts 1.5-1.7 times, to expand the functionality of the processing method by using it in the process of usage of the hardened structural elements.

Keywords: hardening, wear resistance, mining equipment, friction method, impact.

Введение. Для повышения износостойкости, усталостной прочности и твердости поверхностного слоя металла деталей горного оборудования, а также для формирования в этом слое внутренних напряжений определенно направленности и образования регламентированной структуры применяют упрочнения методами пластического деформирования. Среди этих методов наибольшее применение получили методы обкатки роликами или шариками, гидроабразивное упрочнение, упрочнение чеканкой, упрочнения энергией взрыва, упрочнение методами электромеханической пластической обработки [1].

Актуальность. Повышение износостойкости, срока эксплуатации деталей горного оборудования чрезвычайно актуально для предприятий, работающих в этой отрасли и для всей экономики Украины в целом.

Результаты исследований. Для выбора оптимального технического решения – упрочнение деталей горного оборудования в рамках традиционных подходов, которые носят интерактивный характер, определяем множество альтернативных решений. Основные пути повышения долговечности этих деталей [1, 2]:

– разработка сплавов с более эффективным, с точки зрения адаптивности к процессу эксплуатации, чем у стали 110Г13Л, механизмом упрочнения;
– изменение конструкции детали;
– совершенствование технологии литья, термообработки и легирования;
– совершенствование метода упрочнения энергией взрыва
– поиск альтернативных эффективных методов упрочнения.

Сталь 110Г13Л с момента ее изобретения (1882 г.) и до настоящего времени не имеет конкурентоспособных материалов, работающих в экстремальных условиях ударно-абразивного изнашивания. Однако в настоящее время по данным зарубежной и отечественной печати [2, 3] достойную замену находят чугуны средне- и высоколегированные хромом, молибденом, никелем, медью. При незначительном изменении конструкции агрегатов и узлов элементов горного оборудования повышается долговечность. Резервы повышения износостойкости чугунов в абразивной и абразивно-ударной среде далеко не исчерпаны. Большой интерес представляют ванадиевые белые чугуны, обладающие не только эксплуатационными, но и экономическими характеристиками. Кроме того эти

чугуны, отличаются высокой пластичностью ($\delta=2,5\text{--}8,0$) и прочностью ($\sigma_b=1000$ МПа). Замена стали на среднелегированный чугун «Нордит» для футеровки конусных щековых дробилок позволило увеличить срок эксплуатации в 2–9 раз.

Традиционные подходы изменения конструкции деталей горного оборудования связаны с изменением геометрии рабочих (режущих, дробящих, ударных) частей деталей и агрегатов, установкой дополнительных дробящих элементов (шипы, наконечники и т.д.). Тем не менее методы конструирования, исключающие ударное действие породы, совершенно не используются. Незначительное изменение конструкции, которое связано с применением вибропоглащающих и откольных элементов на не рабочих поверхностях деталей и в зоне их соединения с другими агрегатами. Это исключает образование лунок и валиков вокруг последних и способствует снижению скорости удаления материала при последующем абразивном воздействии.

Следующее направление нацелено на оптимизацию механических свойств деталей горного оборудования после упрочняющей обработки. Детали из стали Гадфильда (зубья ковшей экскаватора, поверхности ковшей экскаваторов, дробильные плиты и др.) упрочняются при взрывной обработке сходящимися ударными волнами, бегущей и прямой ударными волнами. При упрочнении взрывом происходит увеличение показателей прочности (твердость, временное сопротивление разрушению) при сохранении достаточно высоких показателей пластичности (относительное удлинение и сужение). При этом в зависимости от параметров нагружения твердость и пластичность, обрабатываемого материала деталей горного оборудования может изменяться в достаточно широких пределах. Т.е. возможно достижение и предельной твердости обрабатываемого материала, последующее увеличение которой приведет к разрушению, и твердости соответствующей предельной равномерной деформации. При такой твердости, остаточные напряжения близки к максимальным. Микротрешины, возникающие в процессе ударно-абразивного износа, не достигают опасной степени развития. Однако утверждение о том, что износстойкость упрочненного материала максимальна при твердости, соответствующей предельной равномерной, чисто логическое не подкрепленное математическими зависимостями. В том и другом случае при логических рассуждениях и при попытках найти оптимум твердости из зависимостей, описывающих процесс износа не учитывается то, что в процессе износа твердость увеличивается до окончания срока эксплуатации. В производственной и научной практике упрочнение в большинстве случаев относят процессы и методы обработки, которые повышают твердость поверхностных слоев деталей машин, узлов и агрегатов. И в большинстве случаев износстойкость и усталостная прочность определяется по твердости,

достигаемой в том или ином процессе упрочняющей обработки. Тем не менее, если рассматривать технологии упрочняющей обработки как процесс повышения эксплуатационных и рабочих характеристик деталей, оказывается, что в результате силового, кинематического, электромагнитного, вибрационного, фрикционного воздействия, твердость материала уменьшается, или не изменяется, а износстойкость увеличивается [1, 4, 6].

Поэтому в теоретическую зависимость, определяющую износ по массе [1, 2] следует подставить переменное значение твердости. Переменной в этой зависимости является и работа сил трения. Это связано с тем, что площадь поверхности и длина режущей части в процессе эксплуатации уменьшается.

В рассматриваемом случае минимальное значение износа по массе может быть вычислено, если задано уравнение, описывающее изменение твердости и работы трения от времени эксплуатации. Следовательно, износ по массе является функционалом, и его минимальное значение находим методами вариационного исчисления. При этом учитываем, что поверхность трения зуба или коронки зуба изменяется незначительно, поэтому работу сил трения принимаем постоянной. Кроме того, учитываем, что в зависимости от вида износа (добываемого материала) и максимальное значение твердости лежит в пределах 3500–6000 МПа. Для этих значений рассчитаны оптимальные значения исходной твердости.

Упрочнение взрывом деталей горного оборудования позволяет получить упрочнение на глубину 30÷40 мм. Другими методами упрочнения поверхностного слоя пластического деформирования достигать этого невозможно. Кроме того, при упрочнении взрывом повышается стойкость к ударно-абразивному износу, пределы прочности и текучести, возникают высокие локальные температуры, которые вызывают фазовые превращения в локальных участках. В настоящее время реализованы схемы упрочнения металлов плоской и бегущей волной при контактном взрыве, плоской и ударной волной от соударения с метаемой пластины, упрочнение сходящимися ударными волнами и комбинация этих схем [1]. По аналогии с методом фрикционного упрочнения, который разработала проф. А.Н. Евдокимова [1], одним из авторов разработан метод взрывного плакирования [8]. По этому методу метаемая пластина в отличии от процесса сварки упрочнения взрывом не только соударяется с поверхностью детали, и скользит по ней. При этом, как оказалось, происходит не только нанесение покрытия по аналогии с процессом фрикционного латунирования или меднения, но и значительное повышение твердости в 1,5÷2,2 раза обрабатываемой поверхности. По данному методу метаемая пластина устанавливается непосредственно на обрабатываемую поверхность. Нерабочая поверхность пластины делается наклонной и на нее наносится слой взрывчатого вещества. При взрыве

заряда взрывчатого вещества на пластину действует нормальная и касательная составляющая нагрузки.

В результате этого пластина прижимается к обрабатываемой поверхности и скользит по ней. В результате этого в поверхностных слоях возникают сдвиговые деформации с образованием белого слоя. В этом методе может быть реализован механизм генерации в поверхностных слоях знакопеременные деформации путем установки пакета, у которых нерабочие поверхности разнонаклонены. Это обеспечивает рядом установленным пластинам возможность перемещения в противоположные стороны. Процесс более трудоемок. Альтернативой методу фрикционного взрывного воздействия может стать метод ударно-фрикционного упрочнения.

Известно [1], что эффективный метод упрочнения поверхностных слоев – фрикционный, позволяет формировать белые слои. Последние отличаются высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью. Слои формируются при одновременном влиянии на материал высоких температур и деформаций. Скорость нагрева достигает 105–106 К/с. Поверхностные слои упрочняемого металла в течении малого промежутка времени нагреваются до температур выше точки фазовых превращений. В результате отвода тепла с высокими скоростями в глубину металла формируется специфическое структурно-напряженное состояние металла, представляющее собой высокодисперсные мартенсит и карбиды, а также остаточный аустенит. Получаемое структурное состояние соответствует состоянию материала после взрывного упрочнения.

Совершенствование процесса фрикционного упрочнения идет по следующим направлениям:

- создание знакопеременных сдвиговых деформаций;
- обеспечение прерывистого фрикционного нагружения;
- изменение рельефа фрикционных дисков.

Новым направлением в фрикционном упрочнении может стать фрикционно-упорное воздействие на обрабатываемый материал. В этом случае происходит дополнительный наклеп поверхностного слоя. Для проверки эффективности предложенного метода упрочнения инструмент диск с конической боковой поверхностью устанавливается на шпиндель основной головки модернизированного сверлильного станка. Вращение медного диска сопровождалось ударами об обрабатываемую поверхность. Рассмотрев варианты технических решений сужаем это множество. После этого осуществляется генерация вариантов, их оценка и сравнение. Оценка и сравнение базируется на использовании логических средств и умозаключений, дедуктивных, интерактивных и индекативных методов. Кластеризация вариантов производится с использованием определенной или введенной меры сходства по следующим аспектам: техника, функциональные возможности, область применения.

С точки хранения технического аспекта выбор варианта строится на реализации требуемого действия и получаемых свойств объектов (детали горного оборудования) с использованием, в большинстве случаев, известных физических явлений, эффектов, факторов и способов. Требуемые действия связаны с изменением условий трения поверхностных и объемных свойств объекта. Это может быть достигнуто путем реализации эффекта Джонсона-Рабека, явления Крагельского, эффекта Байшингера, термоэлектрических и терромагнитных, а также внутреннего и фотограммного эффектов. Кроме того, для этого возможно использование механических и акустических колебаний, воздействие излучений и кавитации, реализации фазовых переходов и деформированием. С

точки зрения функциональных возможностей и материально-технического обеспечения в условиях горного производства наиболее приемлемы методы упрочнения взрывного и фрикционного. С точки зрения меры сходства при взрывном и фрикционном упрочнении или воздействии образуется поверхностный слой практически с одинаковой структурой, стойкой к ударно-абразивному износу.

Для обеспечения условий для знакопеременного деформирования использовали два кривошиппоползунных механизма. Апробирование процесса было проведено на коронках зубьев ковшей экскаватора (рис. 1) изготовленных из высокопрочной нержавеющей стали с исходной твердостью НВ 330–350. После ударно-фрикционного упрочнения твердость повысилась до НВ 500–510. Срок эксплуатации коронок увеличился на 40–45%.



Рис. 1 – Коронки зубьев ковшей экскаватора

Компенсировать незначительную по сравнению с взрывным упрочнением толщину упрочненного слоя возможно путем дополнительного упрочнения в перерывах между сменами.

Выводы. Усовершенствован эффективный метод упрочнения поверхностных слоев деталей горного оборудования путем совмещения ударного и фрикционного воздействия на обрабатываемый материал, позволяющий увеличить твердость последнего в 1,5–1,7 раза и обеспечить возможность упрочнения деталей установленных на оборудование в процессе эксплуатации.

Метод ударно-фрикционного нагружения по эффективности не уступает методу упрочнения взрывом, более мобилен, производителен и удобен в эксплуатации.

Список літератури

1. Евдокимов В.Д. Технология упрочнения машиностроительных материалов / В.Д. Евдокимов, Л. П. Клименко, А.Н. Евдокимова – К.: ИД «Профессионал», 2006. – 352 с.
2. Сорокин Г.М. Новые критерии повышения долговечности машин / Г. М. Сорокин // Вестник машиностроения. – 2008. – № 5. – С. 19–23.
3. Драгобецкий В.В. Некоторые аспекты использования процессов сварки и упрочнения взрывом в металлообработке / В.В.Драгобецкий // Технология машиностроения: журнал. – Российская федерация, 2003. – Вып. 5 (23). – С. 10–12.
4. Lotous V. New explosive welding techniques / V. Lotous, V. Dragobetskii // MMI Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудування», 2013. – № 67 (23.04.2013).
5. Драгобецкий В.В. Упрочнение зубьев ковшей экскаваторов с использованием пластической деформации взрывом / В.В. Драгобецкий, А.А. Шаповал, Д. В. Мосыпан, В.В.Лотоус // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2015. – №2. – С. 38–42.
6. Лотоус В.В. Новый метод взрывного упрочнения элементов горного оборудования / В.В. Лотоус, В.В. Драгобецкий, // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 2/2012 (10). – С. 68–73.
7. Наумова Е.А Совершенствование технологий взрывного компактирования порошковых смесей карбидов и кобальта / Е.А. Наумова, В.В. Лотоус, Г.Л. Дубров, В.В. Драгобецкий, О. В. Гнатенко // Вісник НТУ «ХПІ». 2013. № 42 (1015). – С. 131–135.
8. Борисевич В.К. Многофакторность физических явлений при взрывной металлообработке // В. К. Борисевич, В. В. Драгобецкий, О.В. Троцко // Научно-технический журнал «Авиационно-космическая техника и технология». – Харьков «ХАИ». – № 11, 2007. – С. 62–72.
9. Драгобецкий В.В. Новые триботехнологии плакирования с применением взрывного нагружения / В. В. Драгобецкий, О.В.Троцко, Д.Л. Пирогов // Материалы VIII Міжнародної науково-технічної конференції «AVIA-2007». – Київ, 2007. – том 2. – 32.60–32.63 с.
10. Шаповал А. А. Обеспечение высоких эксплуатационных характеристик биметаллов, сваренных взрывом / А. А. Шаповал, Д. В. Мосыпан, В. В. Драгобецкий // Металлург, 2016. – № 3 – С. 86–89.

Bibliography (transliterated)

1. Evdokimov V.D. Tehnologija uprochnenija mashinostroitel'nyh materialov [Technology hardening of engineering materials] / V.D. Evdokimov, L. P. Klymenko, A.N. Evdokimova – Kiev: ID «Professional», 2006. – 352 p.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Новий метод упрочнення деталей горного обладнання / В. В. Лотоус, В. В. Драгобецкий, А. А. Симонова, Е. А. Наумова, А. А. Юрко, Н. И. Сокур // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів_у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 42–46. – Біблиогр.: 10 назв.– ISSN 2519-2671

Новий метод зміщення деталей гірничого обладнання / В. В. Лотоус, В. В. Драгобецький, А. А. Симонова, О. О. Наумова, О. А. Юрко, М. І. Сокур // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів_у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 42–46. – Біблиогр.: 10 назв.– ISSN 2519-2671

A new method of strengthening mining equipment parts / V. V. Lotous, V. V. Dragobeckii, A. A. Symonova, O. O. Naumova, O. A. Yurko O.A., M. I. Sokur // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 42–46. – Bibl.:10. – ISSN 2519-2671

Поступила (received) 08.11.2017

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лотоус Віктор Вікторович – голова правління ВАТ «Полтавський ГОК», м. Горишині Плавні; тел.: (05348) 7-43-68; e-mail: pgok@ferrexpo.com

Лотоус Віктор Вікторович – председатель правления ОАО «Полтавский ГОК», г. Горишиные Плавни; тел.: (05348) 7-43-68; e-mail: pgok@ferrexpo.com

Lotous Viktor Viktorovich – Chairman of the Board of Poltava ore dressing integrated plant, pubjsc, Gorishni Plavni; tel.: (05348) 7-43-68; e-mail: pgok@ferrexpo.com

Драгобецький Володимир Вячеславович – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, завідуючий кафедрою технології машинобудування; тел.: (05366) 3-11-00; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Драгобецький Владислав Вячеславович – доктор технических наук, профессор, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, заведующий кафедрой технологии машиностроения; тел.: (05366) 3-11-00; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Dragobeczkii Volodymyr Viacheslavovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Chief of the Department of Manufacturing Technology; tel.: (05366) 3-11-00; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Симонова Анастасія Андріївна – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри технології машинобудування; тел.: (05366) 3-11-00; e-mail: nsymonova@gmail.com

Симонова Анастасия Андреевна – кандидат технических наук, доцент, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, доцент кафедры технологии машиностроения; тел.: (05366) 3-11-00; e-mail: nsymonova@gmail.com

Symonova Anastasiya Andriivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Associate Professor at the Department of Manufacturing Technology; tel.: (05366) 3-11-00; e-mail: nsymonova@gmail.com

Наумова Олена Олександрівна – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, інженер кафедри технології машинобудування; тел.: (05366) 3-11-00; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Наумова Елена Александровна – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, инженер кафедры технологии машиностроения; тел.: (05366) 3-11-00; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Naumova Olena Oleksandrivna – Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Engineer at the Department of Manufacturing Technology; tel.: (05366) 3-11-00; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Юрко Олексій Акакійович – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; тел.: (05366) 3-11-00; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Юрко Алексей Акакиевич – доктор технических наук, профессор, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; тел.: (05366) 3-11-00; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Yurko Oleksii Akakievich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University; tel.: (05366) 3-11-00; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Сокур Микола Іванович – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, професор кафедри маркетингу; тел.: (05366) 3-71-13; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Сокур Николай Иванович – доктор технических наук, профессор, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, профессор кафедры маркетинга; тел.: (05366) 3-71-13; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Sokur Mykola Ivanovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Professor at the Department of Marketing; tel.: (05366) 3-71-13; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua

УДК 621.7

В. В. ПИМАНОВ, А. В. САВЧЕНКО, Р. Л. РУСАКОВ

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РОТАЦІОННОГО ВЫДАВЛІВАННЯ ПОЛÝХ ИЗДЕЛИЙ НА ОПРАВКЕ ПАРНЫМИ РОЛИКАМИ

В программном комплексе DEFORM-3D проведено численное моделирование для заготовки из стали 10, процесса ротационного выдавливания полых изделий на оправке парными роликами для двух схем: с угловой и поперечной подачей роликов. Расчетным путем определено зависимость усилия от величины вдавливания роликов в заготовку, распределение ресурса пластичности и напряженно-деформированное состояние материала в объеме заготовки в процессе вдавливания роликов и при продольном проходе вдоль оси вращения заготовки. Кроме этого определено определено характер формообразования канавки при вдавливании роликов в заготовку.

Ключевые слова: ротационное выдавливание, формообразование, напряженно-деформированное состояние, обработка металлов давлением, интенсивность напряжений, интенсивность деформаций, энергосиловые параметры.

В программному комплексе DEFORM-3D проведено чисельне моделювання для заготовки із сталі 10, процесу ротаційного видавлювання порожнистих виробів на оправці парними роликами для двох схем: з кутовою та поперечною подачею роликів. Розрахунковим шляхом встановлено залежність зусилля від величини вдавлювання роликів у заготовку, розподіл ресурсу пластичності та напружено-деформований стан матеріалу в об'ємі заготовки у процесі вдавлювання роликів та повздовжнього проходу в здовж вісі обертання заготовки. Крім того, виявлено характер формоутворення канавки при вдавлюванні роликів в заготовку.

Ключові слова: ротаційне видавлювання, формоутворення, напружено-деформований стан, обробка металів тиском, інтенсивність напруженінь, інтенсивність деформацій, енергосилові параметри.

Methods of rotational extrusion with paired rollers on holders by straight rolling and back extrusion are used in producing of tubular and hollow products. In order to intensify the process and to prevent holders bending two or more rollers are used. Definition of roller introduction technological parameters in the process of rotational extrusion is necessary for production mode determination. For this purpose, numerical modeling of hollow products rotational extrusion with paired rollers on holder for workpiece from steel 10 in program complex DEFORM-3D was carried out. Numerical modeling was carried out for two schemes: with angular and cross feed of rollers. For analysis of rotational extrusion process, it was divided into two stages: rollers introduction on depth of 0,5 mm in a workpiece and rotational extrusion (rollers passing along the axis of workpiece rotation). By calculated way effort dependence from rollers introduction into a workpiece, resource of plasticity distribution (damage) and strain-stress state of material in a workpiece volume in the process of rollers indentation and lengthwise rollers passing along the axis of workpiece rotation was defined. Besides, character of groove formation was defined in the process of rollers introduction. In case of angular rollers feed the groove is formed with an influx from the one side, while in case of cross feed of rollers, the influx is formed from both sides of groove, that leads to strain decreasing for one passing.

Keywords: rotational extrusion, shaping, stress-strain state, metal forming, stress intensity, strain intensity, power parameters.

Введение. В условиях современного производства в различных отраслях машиностроения возникает необходимость не только в усовершенствовании технологий изготовления изделий, но и сокращения времени на подготовку производства.

Выбор той или иной технологии зависит от серийности производства. В частности, для получения полых осесимметричных изделий используют технологии холодной объемной штамповки (ХОШ). Это рационально только при крупносерийном и массовом изготовлении деталей. При определенных условиях и масштабах производства используют ротационное выдавливание, которое превосходит по экономичности и производительности штамповку на прессах, и, кроме этого, позволяет сократить время на подготовку производства [1].

На сегодняшний день актуальными есть технологии с локальным деформированием [2–4] к которым относятся и технологии ротационного выдавливания [1, 4]. Для таких условий деформирования характерны допустимые степени деформации зачастую недостижимые для методов ХОШ. Это позволяет сократить количество промежуточных отжигов, что экономично выгодно для деталей, изготавливаемых за большое количество переходов [3–5]. Благодаря упрочнению в процессе ротационного выдавливания за счет холодной деформации, кроме улучшения структуры, волокна приобретают ориентацию в направлении сдвига металла в результате чего значительно повышается

усталостная прочность и предел прочности при растяжении [5].

При получении трубчатых и полых изделий используют методы ротационного выдавливания на оправках прямой раскаткой и обратным выдавливанием. Для интенсификации процесса и избегания прогиба оправок, используют от двух и более роликов [5, 6].

Постановка задачи. Определение технологических параметров внедрения роликов в процессах ротационного выдавливания необходимо для установления режимов обработки.

Для анализа процесса ротационного выдавливания было предложено 2 расчетных схемы выдавливания парными роликами (см. рис. 1). На рис. 1а приведена расчетная схема ротационного выдавливания с угловой подачей роликов [6]. Заготовка 2 установлена на вращающейся оправке 3 и фиксируется с донной стороны заготовки прижимом 4, который вращается вместе с заготовкой и оправкой с одинаковой скоростью $\omega=600$ об/мин. В этом способе внедрение роликов 1 осуществляется путем поворота на угол φ , который определяет величину внедрения. Скорость поворота роликов $v=0,5$ об/мин.

Расчетная схема с поперечной подачей роликов показана на рис. 1, б. Также, как и предыдущей схеме, заготовка 3 установлена на вращающейся оправке 2 и фиксируется с донной стороны заготовки прижимом 4 который вращается вместе с заготовкой и оправкой с одинаковой скоростью $\omega=600$ об/мин. Внедрение роликов 1 реализуется путем поперечного перемещения их перпендикулярно к оси вращения заготовки со скоростью $S=0,5$ мм/с.

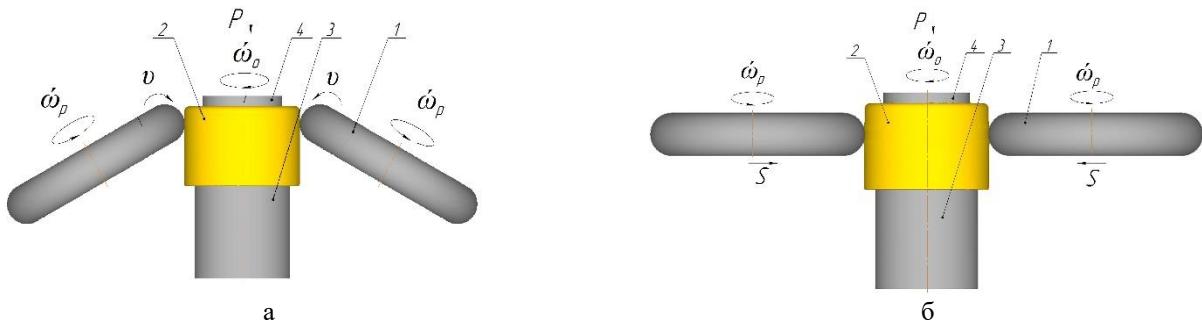


Рис. 1 – Розрахункові схеми ротаційного виведення парними роликами:
а – угловая подача роликов, б – поперечная подача роликов

Расчетная схема с поперечной подачей роликов показана на рис. рис. 1, б. Также, как и предыдущей схеме, заготовка 3 установлена на вращающейся оправке 2 и фиксируется с донной стороны заготовки прижимом 4 который вращается вместе с заготовкой и оправкой с одинаковой скоростью $\omega=600$ об/мин. Внедрение роликов 1 реализуется путем поперечного перемещения их перпендикулярно к оси вращения заготовки со скоростью $S=0,5$ мм/с.

После внедрения роликов осуществлялось поперечное перемещение роликов вдоль оси вращения заготовки со скоростью 0,1мм/с.

Расчетный анализ выполняли путем численного моделирования в программном комплексе Deform – 3D [7]. Расчет проводили для полой заготовки из стали 10. Механические свойства в отожженном состоянии взяты из справочника [8]. Эскиз заготовки приведен на рис. 2

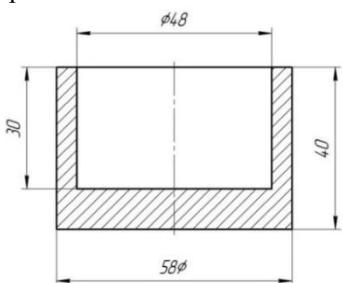


Рис. 2 – Ескіз заготовки

Для анализа процесса ротационного выдавливания процесс был разделен на два этапа: внедрение роликов на 0,5 мм в заготовку и ротационное выдавливание (перемещение роликов вдоль оси вращения заготовки).

Анализ полученных результатов. Расчетным путем для процесса внедрения роликов в заготовку и процесса ротационного выдавливания было получено напряженно-деформированное состояние в заготовке, а также определены усилия внедрения роликов.

Зависимость усилия внедрения роликов от их перемещения без вращения заготовки показано на рис. 3. Максимальные усилия составили 62 кН при угловой подаче роликов и 39 кН при поперечной подаче роликов.

Данные зависимости возможно использовать для определения усилия в процессе вращения заготовки.

Степень использования ресурса пластичности Ψ в объеме заготовки показана на рис.4 и 5. Величина Ψ

не превышает 0,2, что говорит о возможности внедрения на заданную глубину без разрушения материала.

На рис. 6 и 7 приведено распределение интенсивности напряжений σ_i в объеме заготовки во время внедрения роликов и продольного их перемещения. Максимальные значения достигают 670 МПа в месте контакта инструмента с заготовкой.

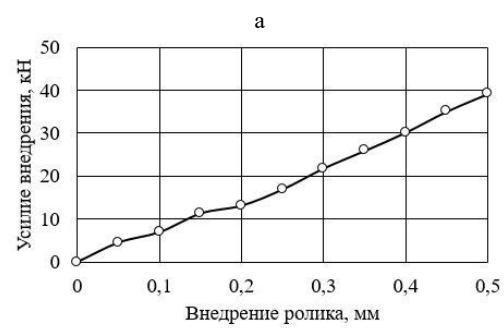
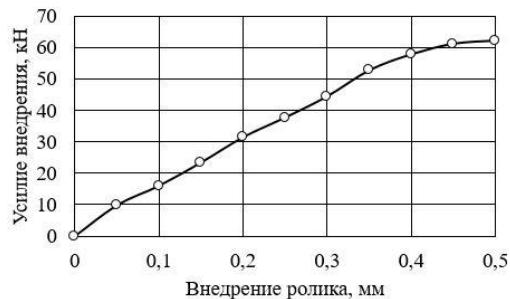


Рис. 3 – Залежності усилій внедрення роликов від їх переміщення: а – при угловій подачі роликов, б – при поперечній подачі роликов

Распределение интенсивности напряжений характеризует очаг деформации. Как видно из рис. 5 а и 6 а при угловой подаче роликов очаг деформации значительно распространяется фактически на всю толщину стенки заготовки, в то время как при поперечной подаче, очаг деформации проходит менее чем на половину толщины стенки.

Интенсивность деформаций ε_i характеризует проработку металла холодной пластической деформацией. Распределение ε_i в объеме заготовки после внедрения роликов отображена на рис. 8 и 9. Максимальные значения достигают 0,5 при угловом внедрении и 0,25 при поперечном внедрении.

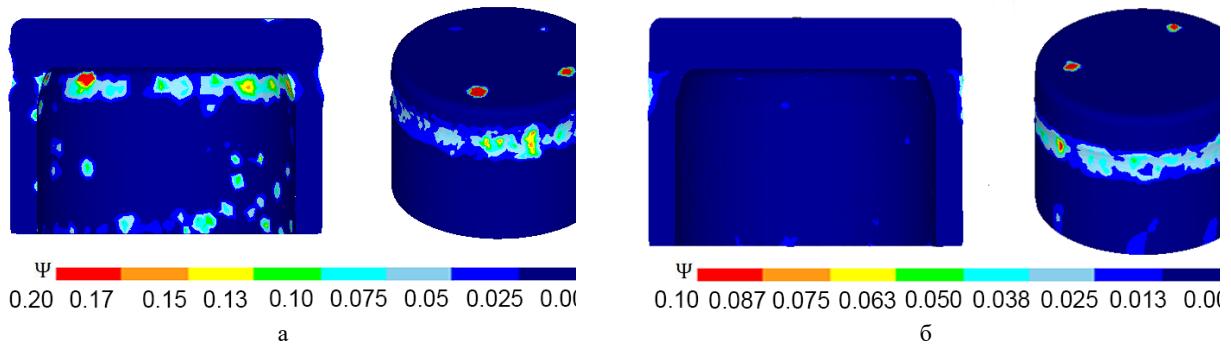


Рис. 4 – Степень использования ресурса пластичности Ψ в объёме заготовки после внедрения роликов:
а – угловая подача роликов, б – поперечная подача роликов

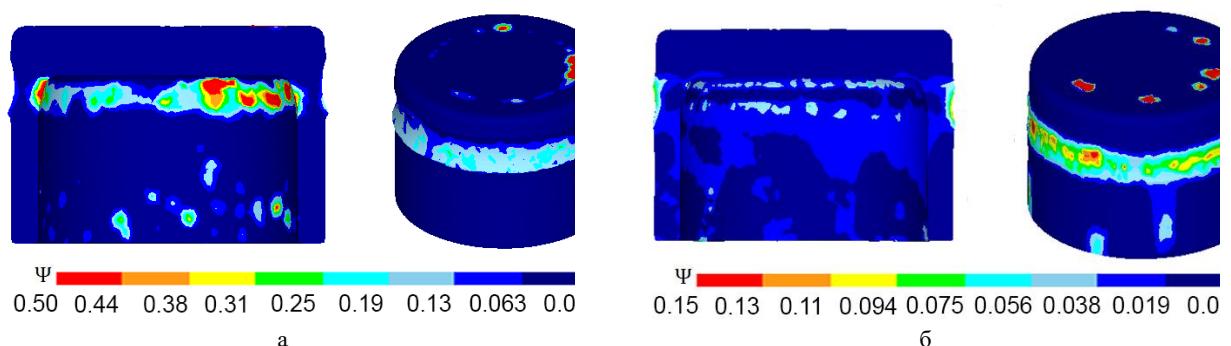


Рис. 5 – Степень использования ресурса пластичности Ψ в объеме заготовки после продольной подачи роликов: а – угловая подача роликов, б – поперечная подача роликов

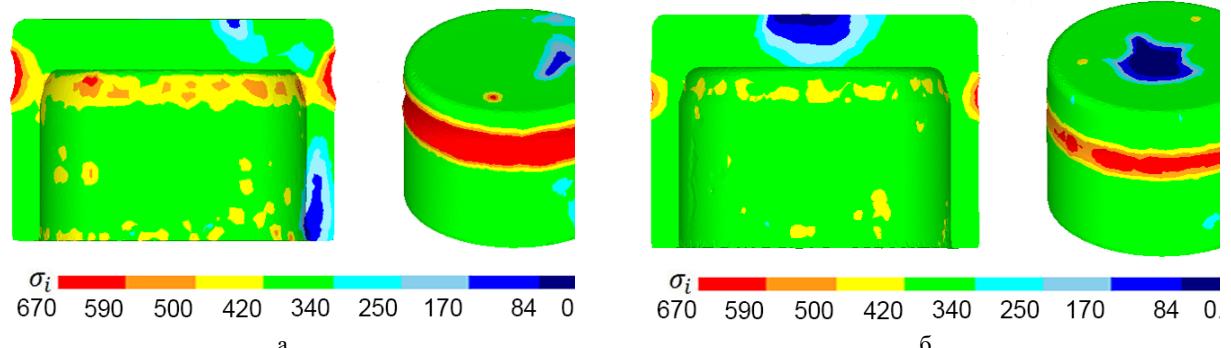


Рис. 6 – Распределение интенсивности напряжений σ_i в объёме заготовки после внедрения роликов:
 а – угловая подача роликов, б – поперечная подача роликов

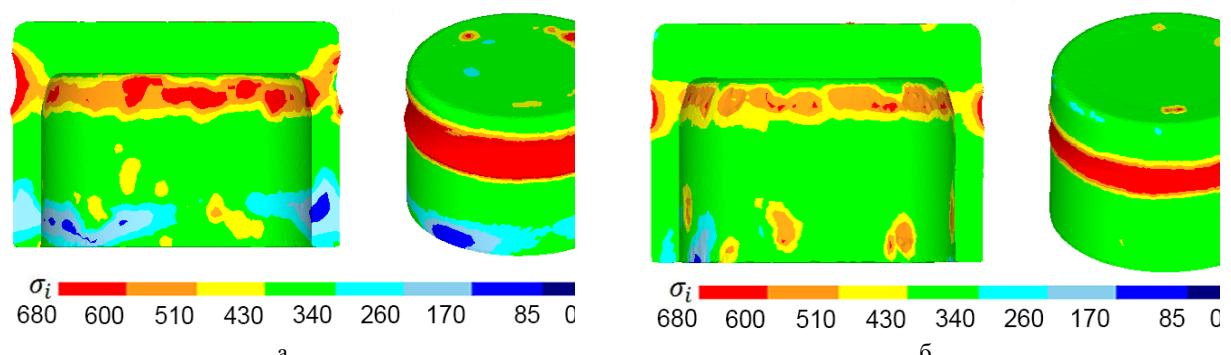


Рис. 7 – Распределение интенсивности напряжений σ_1 в объёме заготовки после продольной подачи роликов:
а – угловая подача роликов, б – поперечная подача роликов

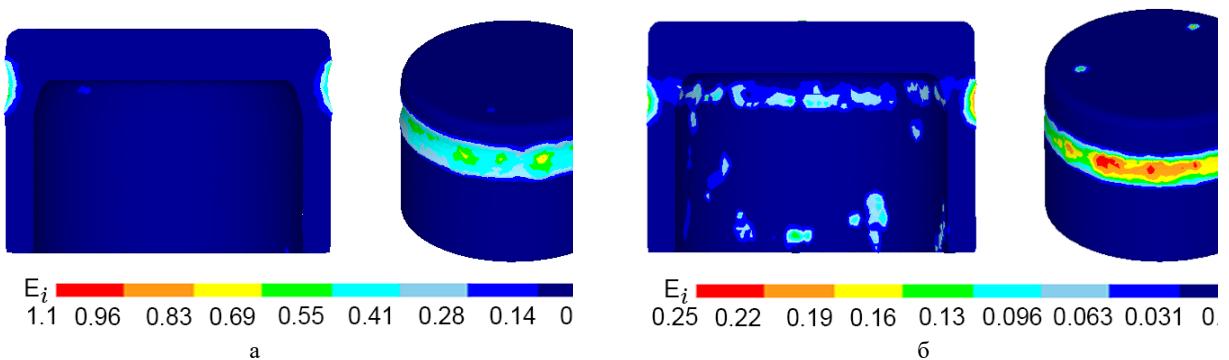


Рис. 8 – Распределение интенсивности деформации ε_i в объеме заготовки после внедрения роликов:
а – угловая подача роликов, б – поперечная подача роликов

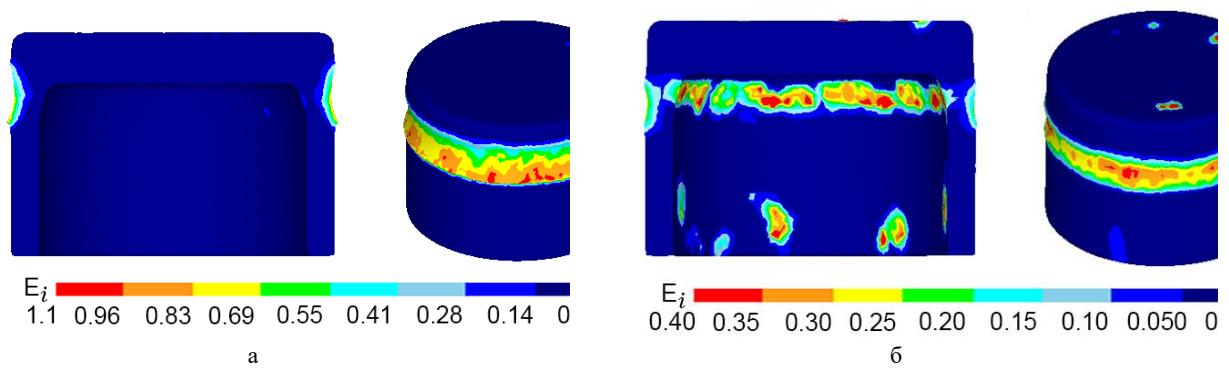


Рис. 9 – Распределение интенсивности деформации ε_i в объеме заготовки после продольной подачи роликов:
а – угловая подача роликов, б – поперечная подача роликов

Кроме этого, в процессе внедрения роликов определено характер формообразования лунки. В случае внедрения роликов угловой подачей лунка образуется с наплывом металла с одной стороны, в то время как при поперечной подаче наплыв образуется с двух сторон лунки, что приводит к уменьшению деформации за один проход роликов.

Выводы. Было проведено численное моделирование процесса ротационного выдавливания на оправке парными роликами полой заготовки из стали 10, при двух способах подачи роликов: угловая и поперечная подачи. Определены зависимости усилий внедрения роликов от их перемещения. В результате моделирования расчетным путем было определено распределение ресурса пластичности и напряженно-деформированное состояние в объеме деформированной заготовки. Как видно из результатов моделирования, процесс ротационного выдавливания с использованием угловой и поперечной подачи имеет определенные отличия. Угловая подача роликов вызывает появление больших напряжений и, как следствие, больших деформаций в месте контакта роликов с заготовкой. Особенно сильно это различие заметно в распределении интенсивности деформаций ε_i . Кроме этого, в процессе внедрения роликов определено характер формообразования лунки. В случае внедрения роликов угловой подачей лунка образуется с наплывом металла с одной стороны, в то время как при поперечной подаче наплыв образуется с двух сторон лунки, что приводит к уменьшению деформации за один проход роликов.

Список литературы:

- Гредитор М. А. Давильные работы и ротационное выдавливание / М. А. Гредитор // М.: «Машиностроение», 1971, С. 239.
- Чумадин А. С. Новое в листовой штамповке / А. С. Чумадин, Д. А. Батурина // URL: <http://www.ritm-magazine.ru/public/novoe-v-listovoy-shtampovke> (дата обращения: 12.11.2017).
- Бешчеков В. Г. Орбитальная штамповка / Владимир Глебович Бешчеков // URL: <http://www.ritm-magazine.ru/public/orbitalnaya-shtampovka> (дата обращения: 12.11.2017).
- Гожий С.П. Перспективы развития штамповки с обкатыванием / С.П. Гожий, А.В. Клиско // Вісник НТУУ "КПІ". Машинобудування. – 2011. – № 61, т. 1. – С. 81–86.
- Уик Ч. Обработка металлов без снятия стружки / Ч. Уик // М.: Мир, 1965. – 549 с
- Патент на корисну модель UA 109120 МПК В 21 D 22/16, опубліковано 10.08.2016, Бюл. №15 «Спосіб ротаційного видавлювання порожніх осесиметричних виробів».
- Deform-3D – мощная система моделирования технологических процессов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.thesis.com.ru/software/deform>.
- Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин // 2-е изд.– М.: Металургия, 1973. – 224 с.

Bibliography (transliterated)

1. Hredytor M. A. Davyl'nie raboty v rotatsyonnoe vydavlyvaniye [Crushing works and rotational extrusion] / M. A. Hredytor // Moscow: «Mashynostroeny», 1971. – P. 239.
2. Chumadyn A. S. Novoe v lystovoy shtampovke [New in sheet stamping] / A. S. Chumadyn, D. A. Baturyn // URL: <http://www.ritm-magazine.ru/public/novoe-v-listovoy-shtampovke> (data obrashcheniya: 12.11.2017).
3. Beshchekov V. H. Orbytal'naya shtampovka [Orbital stamping] / Vladymyr Hlebovych Beshchekov // URL: <http://www.ritm-magazine.ru/public/orbitalnaya-shtampovka>

- magazine.ru/public/orbitalnaya-shtampovka (data obrashchenyya: 12.11.2017).
4. Hozhy S.P. Perspektyvy razvitiya shtampovky s obkativaniem [Prospects for the development of punching with rolling] / S.P. Hozhy, A.V. Klysko // Visnyk NTUU "KPI". Mashynobuduvannya. – 2011. – No 61, vol. 1. – P. 81–86.
 5. Uyk Ch. Obrabotka metallov bez snyatyya struzhky [Metalworking without chip removal] / Ch. Uyk // Moscow: Myr, 1965. – 549 p/
 6. Patent na korysnu model' UA 109120 MPK B 21 D 22/16, opublikovano 10.08.2016, Byul. No 15 «Sposib rotatsiynoho

vydavlyuvannya porozhnystykh osesymetrychnykh vyrobiv» [Method of rotary extrusion of hollow axial symmetric products].

7. Deform-3D – a powerful system of modeling of technological processes [Electronic resource]. – Rezhym dostupa: <http://www.thesis.com.ru/software/deform>.
8. Tret'yakov A.V. Mekhanicheskiye svoystva metallov y splavov pri obrabotke davleniem [Mechanical properties of metals and alloys in pressure treatment] / A.V. Tret'yakov, V.Y. Zyuzin // 2-e yzd. – Moscow: Metalurhyya, 1973/ – 224 p.

Поступила (received) 27.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз процесу ротаційного видавлювання порожнистих виробів на оправці парними роликами / В. В. Піманов, А. В. Савченко, Р. Л. Русаков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 47–51. – Бібліогр.: 8 назв.– ISSN 2519-2671

Анализ процесса ротационного выдавливания полых изделий на оправке парными роликами / В. В. Піманов, А. В. Савченко, Р. Л. Русаков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 47–51. – Бібліогр.: 8 назв.– ISSN 2519-2671

Analysis of hollow cylindrical products rotational extrusion on holder with paired rollers / V. V. Pimanov, A. V. Savchenko, R. L. Rusakov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 47–51. – Bibl.:8. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Піманов Валерій Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; асистент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (097) 642-04-54; e-mail: pimanov@ukr.net

Піманов Валерий Владимирович – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев; ассистент кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (097) 642-04-54; e-mail: pimanov@ukr.net

Pimanov Valery Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, National Technical University "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kiev; Assistant of the Department of mechanics of plasticity of materials and resource-saving processes; tel.: (097) 642-04-54; e-mail: pimanov@ukr.net

Савченко Артем Валентинович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», студент; тел.: (095) 917-28-68; e-mail: SavchenkoArtem1994@gmail.com

Савченко Артём Валентинович – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», студент; тел.: (095) 917-28-68; e-mail: SavchenkoArtem1994@gmail.com

Savchenko Artem Valentynovich – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», student; tel.: (095) 917-28-68; e-mail: SavchenkoArtem1994@gmail.com.

Русаков Роман Леонідович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», студент.

Rusakov Roman Leonidovich – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», студент.

Rusakov Roman Leonidovich – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», student.

УДК 620.179.16: 620.179.17

С.Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, Н.М. ЮДАНОВА

МЕТОДИ І ЗАСОБИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ МЕТАЛОВИРОБІВ ТРУБЧАТОГО, СТРИЖНЕВОГО ТА ПЛАСТИНЧАТОГО ТИПУ (ОГЛЯД Ч. 2)

Наведено огляд зарубіжних робіт спрямованих на дослідження процесів контролю та діагностики зразків типу труб, стрижнів, листів тощо. Виконано аналіз робіт з Японії, Сингапура, Росії, Сполучених Штатів Америки, Франції, Германії, Італії, Китаю, Литви та ін. Основними напрямками досліджень зарубіжних фахівців, визначеними в межах аналізу, є: застосування фазованих решіток, використання хвиль Релея та Лемба, ефекту Допплера, а також бездротового зв'язку. Важливими аспектами досліджень є використання оптичних датчиків, а також засобів компенсації товщини захисних шарів. Важливим аспектом є також покращення співвідношення сигнал-шум за допомогою різних засобів: збільшення кількості детектуючих елементів, використання FOD-схеми та ін. Важливим аспектом досліджень є дослідження, що стосуються трубчастих зразків, в особливості в місцях згину, таких як повний U-образний згин. Такі зразки широко задіяні в нафтovій промисловості, газовій промисловості, на різних електростанціях та інших трубопроводах. Загалом дослідження засвідчують ефективність електромагнітно-акустичного метода при його використанні в дослідженні, контролі та діагностиці трубчастих, стрижневих, листових та інших металовиробів.

Ключові слова: електромагнітно-акустичний контроль, трубчастий виріб, стрижневий виріб, листовий виріб, огляд, контроль, діагностика, ультразвук, хвилі Релея.

Приведен обзор зарубежных работ направленных на исследование процессов контроля и диагностики образцов типа труб, стержней, листов и тому подобное. Выполнен анализ работ по Японии, Сингапуру, России, Соединенных Штатов Америки, Франции, Германии, Италии, Китаю, Литвы и др. Основными направлениями исследований зарубежных специалистов, определенными в рамках анализа, являются: применение фазированных решеток, использование волн Рэлея и Лэмба, эффекта Доплера, а также беспроводной связи. Важными аспектами исследований является использование оптических датчиков, а также средств компенсации толщины защитных слоев. Важным аспектом является также улучшение соотношения сигнала-шум с помощью различных средств: увеличение количества детектирующих элементов, использование FOD-схемы и др. Важным аспектом исследований является исследование, касающиеся трубчатых образцов, в особенности в местах сгиба, таких как полный U-образный изгиб. Такие образцы широко задействованы в нефтяной промышленности, газовой промышленности, на различных электростанциях и других трубопроводах. В общем исследования свидетельствуют эффективность электромагнитно-акустического метода при его использовании в исследовании, контроле и диагностике трубчатых, стержневых, листовых и других металлоизделий.

Ключевые слова: электромагнитно-акустический контроль, трубчатый изделие, стержневой изделие, листовой изделие, обзор, контроль, диагностика, ультразвук, волны Рэлея.

The review of foreign works aimed at studying the processes of control and diagnostics of samples such as pipes, rods, sheets and the like is given. The analysis of works on Japan, Singapore, Russia, the United States of America, France, Germany, Italy, China, Lithuania, etc. The main research areas of foreign experts identified in the analysis are: the use of phased arrays, the use of Rayleigh and Lamb waves, the effect Doppler, as well as wireless communication. Important aspects of research are the use of optical sensors, as well as means of compensating the thickness of protective layers. An important aspect is also the improvement of the signal-to-noise ratio by various means: an increase in the number of detecting elements, the use of the FOD scheme, etc. An important aspect of the research is the study of tube samples, especially in bending regions such as full U-bend. Such samples are widely used in the oil industry, gas industry, at various power stations and other pipelines. In general, the effectiveness of the electromagnetic-acoustic method in its use in the study, control and diagnostics of tubular, rod, sheet and other metal products is indicative. General development is being aimed at growing attributes of sensitivity, flaw type distinction, noise filtering, sensor cheapening, production value and ease of use increase. Furthest developments are achieved by German, American and Japanese scientists in collaboration and single handedly. The research of electromagnetic-acoustic method in order to improved it are those of actuality and importance.

Keywords: electromagnetic-acoustic control, tubular product, core product, sheet product, overview, control, diagnostics, ultrasound, Rayleigh waves.

Актуальність теми. Суттєву долю в продукції, що випускається та експлуатується, складають вироби типу труб, стрижнів, листів тощо. Як правило, їх якість контролюється ультразвуковими методами. При цьому використовують нормальні та поверхневі хвилі. Використання такого типу хвиль призводить до значних вимог до засобів, що їх реалізують. Це обумовлено недостатніми теоретичними і практичними дослідженнями у цьому напрямку.

Тому необхідно розробляти нові підходи і засоби для забезпечення якості виробів типу труб, стрижнів, листів тощо. Особливо це стосується виробів з незначними розмірами.

Основна частина. Роботи з дослідження та розробки засобів контролю зразків типу труб, стрижнів, листів тощо ведуть у багатьох країнах світу. Так у роботі [1] автори виконали дослідження з використанням поздовжніх стрижневих хвиль і показали можливість виявлення дефектів, що становлять 12% поперечного перерізу U-образного коліна або 1,5% перетину прямої труби. Ці ж автори пропонують [2] використовувати властивість

дисперсії поздовжніх стрижневих хвиль, які зазвичай вважають фактором, що заважає контролю товщини стінки тонкостінної труби. У трубі збуджується широкосмуговий імпульс хвилі звукового діапазону, симетричний в часовій області. Про стонування стінки судять по зміні симетрії прийнятого імпульсу. Дисперсія поздовжніх стрижневих хвиль, що поширюються в дроті, призводить до погрішення співвідношення сигнал-шум і розмивання імпульсу хвилі в часовій області.

Для компенсації ефекту дисперсії японські дослідники [3] пропонують досить складний механізм, заснований на зміні фази кожної частотної компоненти прийнятого імпульсу з урахуванням дисперсійної кривої таким чином, щоб фазові швидкості всіх компонент сигналу точно збігалися з фазовою швидкістю компоненти основної частоти. Показана ефективність методу на різних відстанях поширення хвилі.

В роботі [4] для дефектоскопії дроту автори пропонують замість коротких високочастотних зондуючих імпульсів поздовжньої стрижневий хвилі

використовувати низькочастотні, сформовані з використанням фазової затримки для кожної частотної компоненти. Затримки вибираються відповідно до дисперсійної кривої.

Італійські дослідники [5] в середовищі Matlab розробили програмне забезпечення для розрахунку дисперсійних кривих хвиль напружені в хвилеводах з ізотропних та анізотропних матеріалів. При обчисленні використовується метод кінцевих елементів, в результаті чого задача зводиться до двовимірної і істотно зменшується час розрахунку. Для перетинів у вигляді кола і багатошарового кільца (для кожного з шарів можна визначати матеріал) можливий розрахунок поздовжніх, вигинистих і крутільних хвиль. Для багатошарових пластин розраховуються дисперсійні криві SH-хвиль і хвиль Лемба. Можливий розрахунок хвилеводів з більш складною геометрією.

В роботі [6] для моделювання процесу поширення нормальніх хвиль в композитних пластинах і багатошарових структурах, які можуть мати анізотропні властивості, пропонується використовувати чисельний метод моделювання локальних взаємодій.

Португальські фахівці провели теоретичні та експериментальні дослідження [7] умов збудження, прийому і поширення хвиль Лемба в пластинах товщиною 3 мм з прорізами глибиною від 0,5 до 2,5 мм. Випромінювач і приймач розташовувалися в імерсійному і контактному варіантах по різні боки прорізу. Встановлено, що від ступеня контакту залежить загасання хвиль, але не залежить вид дисперсійних кривих.

Китайські вчені опублікували [8] принципи побудови перетворювача для збудження моди крутільний хвилі в сталевій трубі. Перетворювач заснований на п'єзоелементах однакової товщини, які розташовані на бічній стінці труби таким чином, щоб вони лежали один навпроти одного. П'єзоелементи вібрували в протифазі, тим самим створюючи крутільний момент. В експериментах крутільна хвilia збуджувалася в діапазоні частот 40–230 кГц.

У Литві йдуть дослідження [9] щодо застосування фазованих решіток в далекодіючому ультразвуковому контролі для збудження бажаної моди з мінімальними амплітудами заважаючих мод. Розглядаються хвилі в пластинах (Лемба, нульові симетричні і антисиметричні, SH-хвилі). Відзначається, що внаслідок великої довжини хвилі, в порівнянні з використовуваної в традиційному ультразвуковому контролі, елементи фазованої решітки можуть розглядатися як точкові і впливають на граничні умови при розповсюджені хвилі. Параметри решітки (розташування і орієнтація елементів, амплітуди і фази (затримки) коливань, відстані між елементами решітки) повинні підбиратися індивідуально для кожного об'єкта.

Теоретичні основи збудження нормальніх хвиль від осесиметричного джерела в конструкціях з пластин і метод розрахунку спектрів збуджуваних мод через функцію Ханкеля наводять американські

вчені [10]. В результаті вдалося створити перетворювач у вигляді кільцевої фазованої решітки з повністю електронним управлінням для збудження моди потрібного номера і частоти. В якості прикладів застосування розглядаються томографія під водою, мультимодова передача сигналу для розрізнення дефектів, нова технологія ультразвукового вібраційного модального аналізу для виявлення пошкоджень.

Автори роботи [11] також досліджують можливості використання фазованих решіток для збудження бажаної моди хвилі Лемба в пластині. Придатність фазованої решітки автори бачать в можливості вибору потрібної моди засобами електроніки та здійснення контролю з почерговим використанням декількох мод (наприклад, при пошуку відображені від дефектів при наявності корозії). Для представлення результатів контролю використовується перетворення Фур'є.

Складним завданням в методі далекодіючого ультразвуку є визначення типу, розмірів і орієнтації виявленого дефекту. Для її вирішення пропонуються різні методи фокусування. Так, дослідник в роботі [12] пропонує одночасно збуджувати симетричну і антисиметричну моди, які розповсюджуються у вигляді групи хвиль з певною швидкістю (наприклад, крутільні і згинальні), що утворюють крутільну моду. Такий підхід дозволяє сконцентрувати енергію хвилі в заданій області на окружності труби. В експериментах використовується система і датчик у вигляді фазованого масиву, що складається з 44 рівномірно розподілених по колу незалежних модулів, кожен з яких має по три перетворювача, віддалених один від одного на однакову відстань паралельно осі труби. Датчики розбиті на 4 групи, що розбивають перетин труби на квадранти. Збудження згинальної крутільної моди виконується як по всьому колу, так і для кожного з квадрантів. Відбиття від дефекту мають максимальну амплітуду, якщо він розташований у відповідному квадраті, а при збудженні хвилі в інших квадрантах відображення від дефекту слабке або відсутнє.

В Італії [13] ведуться роботи зі створення методу визначення типу, розташування і розмірів дефекту шляхом аналізу дефектограми з використанням алгоритмів нейронних мереж. В експериментах використаний прилад з електромагнітно-акустичним датчиком, що збуджує в трубі крутільне коливання. Результати розпізнавання містять значну кількість помилок. Автори вважають за необхідне розширити базу для навчання нейронної мережі.

Нідерландські вчені [14] пропонують метод «томографії часу поширення» нормальніх хвиль для визначення товщини стінки труб і виявлення корозії. Метод передбачає використання двох багатоканальних перетворювачів (випромінювача і приймача), що встановлюються на протилежних кінцях труби. Перетворювачі містять масив датчиків, розташованих рівномірно по поверхні труби. Сигнал, що випромінюється одним датчиком, реєструється групою приймаючих датчиків. При аналізі шляху

проходження хвилі в об'єкті за спеціальним ітераційним алгоритмом з використанням адаптивної сітки проводиться корекція дисперсії з урахуванням номінальних і акустично вимірюваних розмірів труби. Використання декількох мод дозволяє позбутися від зон зниженої чутливості і контролювати будь-які ділянки труби. Стверджується, що при правильному виборі моди можливий контроль труб, заповнених рідинами.

Метод автоматичного усунення ефекту дисперсії з урахуванням неточної розстановки датчиків для систем моніторингу стану споруд пропонують дослідники [15]. Для усунення дисперсії і уточнення координат дефектів в пластині можливе застосування методів «обернення часу» [16]. Один і той же ПЕП при зміні частоти коливань може збуджувати різні моди нормальних хвиль, здатні взаємодіяти з дефектами різних типів і орієнтації.

В роботі [17] автори пропонують використовувати ефект «настроювання на моду» для реалізації багатомодового контролю. Новий підхід полягає в тому, що для економії часу контролю і пам'яті для зберігання сигналу використовується не безліч вимірів на різних частотах з використанням імпульсів з вузьким спектром (що дозволяє розрізняти в прийнятому сигналі короткі за часом відображення від дефектів і дна), а один вимір з використанням широкосмугового імпульсу з лінійною частотною модуляцією. Прийнятий сигнал можна використовувати безпосередньо, так як він містить інформацію, яка розмита в часовій області, тому необхідна його обробка з виділенням безлічі вузкосмугових сигналів таких частот, на яких добре простежуються моди нормальних хвиль (тобто видно короткі за часом імпульси). Технологія випробувана експериментально з масивом просторово розподілених ПЕП на алюмінієвій пластині зі штучним дефектом. Далі [18] автори стверджують, що прийнятий сигнал містить всю необхідну інформацію для оцінки параметрів дефектів і немає необхідності вдаватися до використання інших методів для більш точного контролю та виявлення дефектних ділянках.

У доповіді вчених з Сінгапуру [19] повідомляється про успішне виявлення поздовжніх тріщин в трубі з використанням крутильних хвиль. Хвилі Лемба, що поширяються в поздовжньому напрямку, виявилися слабко чутливими до таких дефектів. Про положення і орієнтацію дефекту судять за різницею в часі реєстрації зазначеніх хвиль. Для їх збудження використовувалися п'єзоелектричні перетворювачі (макроволоконний композитний перетворювач), орієнтовані під кутом 45° до осі труби. Принципи роботи таких датчиків описані в [20] і [21]. Експериментальні дослідження з використанням контактного датчика з гнутою плівкою з п'єзоелектричними волокнами для прийому крутильній моди наводяться також в роботі [22].

У доповіді [23] пропонується технічне рішення для бездротового зв'язку з віддаленим датчиком з безліччю п'єзоелементів, що збуджують і приймають

імпульси нормальних хвиль. Передача енергії та інформації сигналу між віддаленим датчиком і системою моніторингу здійснюється за допомогою лазерного випромінювання.

У доповіді [24] в подібній бездротовій системі замість звичайних п'єзоелементів для збудження поздовжніх і крутильних нормальних хвиль в трубопроводі використовується безліч перетворювачів, що накладаються на об'єкт контролю та зменшують вплив заважаючих вигинистих мод. Прийом нормальних хвиль здійснюється оптоволоконної гратами Брегга, що закріплюється на об'єкти.

В статті [25] японськими вченими розглядається питання про можливість застосування оптичних датчиків, заснований на ефекті Доплера, в контролі композитного ламінату хвильами Лемба. Оптоволоконні датчики використовуються для прийому нормальних ультразвукових хвиль. Зареєстровані сигнали потім піддаються фільтрації. Збудження хвилі Лемба в об'єкті контролю виконується звичайним п'єзоелектричним датчиком. Показано, що такі датчики володіють більш хорошим співвідношенням сигнал-шум, більш прості у виготовленні і завдяки круглої спіральної формі можуть сприймати будь-які типи нормальних хвиль в пластинах. У статті [26] ці ж автори пропонують систему, що сама калібрується, на основі декількох датчиків для моніторингу стану склеєних листів ламінату з використанням нормальних хвиль. Збільшення тривалості затримки прийнятого датчиком сигналу прямо пропорційно зменшенню ширини склеючого епоксидного шару. Оптичні датчики мають ряд переваг: гнуточість, міцність, теплостійкість, несприйнятливість до електромагнітних перешкод, довговічність, несхильність до корозії. Однак вони: вимагають наявності спеціального обладнання для реєстрації сигналів. Показано, що використання напівпровідникових лазерних інтерферометрів інфрачервоного діапазону дозволяє зменшити недоліки, характерні для систем з гелій-неоновим лазером: високе затухання, висока вартість і низька стабільність. У поєданні з FOD датчиком напівпровідниковий інтерферометр володіє кращим співвідношенням сигнал-шум. Подібним методом (з використанням інтерферометра) дослідники з Швейцарії і Великобританії [27] виявляють ушкодження (тріщини, розшарування, малі поверхневі дефекти металу, локальну відсутність герметизуючої речовини) в багатошарових структурах аерокосмічної техніки: Використовуються високочастотні нормальні хвилі, що поширяються по всій товщині структури.

Для завдань моніторингу споруд корейськими фахівцями [28] пропонується автоматизована система, що поєднує моніторинг далекодіючим ультразвуком з вимірюванням електромеханічного імпедансу. У системі є алгоритм компенсації впливу температури на механічний імпеданс і параметри поширення нормальних хвиль. Експериментальні

дослідження проведені в діапазоні температур від -20 до +70 ° С на металевих зразках з тріщиною.

Дослідники в роботі [29] обговорюють безконтактні методи виявлення дефектів в залізничних коліях. Поздовжні дефекти краще виявляються при збудженні в поперечному перерізі рейки високочастотних стоячих пружин хвиль. Для випромінювання використовується широкосмуговий випромінювач (від 0,25 до 2 МГц), який посилає пружну хвиллю в головку або в шийку рейки. Широкосмуговий приймач розташований з протилежного боку. Коли в бездефектної ділянці рейки виникає стояча хвilia, спостерігається пік резонансної частоти (в діапазоні 0,8-0,9 МГц), а в дефектній ділянці резонансний пік відсутній. Для оцінки типу і розміру дефектів використовуються, методи спектрального вейвлет-аналізу сигналів, зареєстрованих в поздовжньому, вертикальному і поперечному напрямках. Для створення автоматизованої системи контролю передбачається використання алгоритмів розпізнавання.

Застосування нормальних хвиль для ультразвукового контролю рейкової колії на великих відстанях докладніше розглянуто в статті вчених з Великобританії [30]. Методом кінцевих елементів і експериментально досліджено взаємодію різних мод з дефектами різної геометрії. Про тип виявлених дефектів пропонується судити за характерною трансформацією використовуваної хвилі в інші моди на дефектній ділянці.

У статті [31] розглядаються дві системи безконтактного контролю рейок: гібридна з лазерним введенням ультразвуку і прийомом отриманого сигналу через повітря для контроля головки рейки на поперечні тріщини, і система, в якій введення ультразвуку і прийом сигналу здійснюються через повітря. Остання використовується для контроля головки і шийки рейки на поздовжні тріщини. При безконтактному ультразвуковому контролі основною проблемою є низький рівень відношення сигнал / шум. Наприклад, при використанні гібридної системи контролю для впевненого виділення дефектів на рівні шуму необхідно осереднення отриманого сигналу по 300 накопиченим значенням, що не реалізовується в реальних умовах. Використання вейвлет-аналізу з подальшим видаленням високочастотних складових (власне шум) і стробування дозволяє ефективно фільтрувати шуми при обох схемах контролю. Для гібридної схеми така процедура дозволила повністю виключити необхідність накопичення сигналу. При цьому залежно від коефіцієнтів відбиття і проходження, від глибини тріщини що отримані по усередненню по 300 вимірам сигналу і розраховані за одиничним виміром із застосуванням вейвлета відповідної форми, збігалися.

Далекодіючий ультразвук застосовується в нафтодобувній і хімічній промисловості. Наприклад, для контроля труб по всій довжині на наявність корозії. Для уточнення місця розташування дефекту вздовж труби і по колу перетину автори роботи [32] пропонують технологію фокусування. Однак для

поліпшення оцінки розмірів дефекту потрібні подальші дослідження, а вимірювання товщини стінки труби на дефектному ділянці рекомендують виконувати традиційними методами контролю. Така ж рекомендація міститься у висновках дослідження [33] в порівнянні достовірності традиційного і далекодіючого ультразвукового контролю. Так, для виявлення дефекту у вигляді круглого поглиблення діаметром 50 мм з імовірністю 90% в сталевій трубі діаметром 152,4 мм, довжиною 6 м і товщиною стінки 7,1 мм при звичайному ультразвуковому контролі потрібно провести вимірювання в 1000 точок, розташованих у вигляді квадратної сітки з кроком 54 мм. Якщо діаметр дефекту близький за величиною до товщини стінки труби, то крок сітки повинен бути зменшений до 15 мм, а число контролюваних точок, відповідно, збільшено до 14000. У практиці ультразвукового контролю зазвичай обмежуються 50 точками, що для дефекта діаметром 50 мм дає можливість виявлення близько 4%. Метод з використанням нормальних хвиль для 100% контролю вимагає установки датчиків тільки в двох точках з різних кінців труби. У розглянутій трубі дефект діаметром 50 мм і глибиною 50% товщини стінки труби чітко видно на зображені зареєстрованого сигналу. Рівень шуму -43 дБ, рівень бракування -37 дБ, рівень відбитого від дефекту сигналу -26 дБ. Автори оцінюють ймовірність виявлення дефекту нормальними хвиллями в 99%. Крім того, в статті показано, що далекодіючим ультразвуком успішно виявляються дефекти в трубах, які перебувають під ізоляцією і в важкодоступних місцях (наприклад, на великій висоті), зменшення числа точок контролю в цих випадках може дати значний економічний ефект. За коефіцієнтом відображення метод далекодіючого ультразвуку чутливий не стільки до абсолютних розмірів локальних дефектів на стінці труби, скільки до втрат площи перетину. Тому для уточнення результатів контролю ділянки об'єкта з виявленими дефектами має сенс додатково контролювати іншими методами, наприклад, традиційним ультразвуковим.

В інституті ім. Патона [34] розвивають метод низькочастотного дальнодалекодіючого ультразвуку стосовно до трубопроводів. Конструкція трубопроводів містить ряд симетричних та асиметричних відбивачів. До симетричних часто відносяться відбивачі, які є частиною конструкції трубопроводу: зварні шви, фланці, опори, патрубки. Їх положення визначено в технічній документації, тому відображення від них можуть служити опорними точками при аналізі дефектограм. Дефекти, як правило, є асиметричними відбивачами, і в процесі відображення нормальної хвилі від них відбувається трансформація хвилі в іншу моду. Корозія в трубі може являти собою як асиметричний, так і симетричний відбивач. Як і в більшості сучасних робіт, рекомендується використовувати симетричні бездисперсійні моди: поздовжні і крутильні. Датчики закріплені на антені з регульованим зусиллям притиску, що одягається на трубопровід діаметром 80...240 мм. Антена дозволяє закріплювати до 16 перетворювачів. Частотний діапазон збуджуваних

нормальних хвиль 16...250 кГц. Автори показують, що метод далекодіючого ультразвуку не дає достовірних відомостей про товщину стінки труби і рекомендують використовувати даний метод для виявлення місць розташування та оцінки ступеня корозійних уражень, а товщинометрії в місцях виявленіх дефектів виконувати методом локального традиційного ультразвукового контролю.

В роботі [35] наводяться відомості про успішне застосування нормальних хвиль для контролю труб міської опалювальної мережі міста Брешія (Італія). У трубах (довжиною 8–14 м, діаметром 88–220 мм, з товщиною стенок 3,5–5 мм з термоізоляцією і без неї) виявляються природні дефекти типу корозії і штучні у вигляді серії наскрізних отворів, рівномірно розташованих по окружності труби. Для контролю використана система, яка використовує крутильне моду. Найбільш підходящі частоти вибиралися для кожного виду труби з діапазону 28–75 кГц. Розміри дефектів як зміна площи поперечного перерізу оцінювалися за коефіцієнтом загасання. Стверджується, що узгодження результатів контролю з реальними параметрами дефектів задовільний.

Про позитивні результати контролю труб на морський нафтогазовий платформі повідомляється в доповіді [36]. Дальність контролю труб з вигинами, бітумним покриттям і сирою нафтою всередині досягла 12 метрів, з яких 7 метрів – нижче рівня моря (також з бітумним покриттям). Всі фланци, вигини і зварні шви відображаються в прийнятому сигналі. Методом далекодіючого ультразвуку виявлені всі ділянки зовнішньої корозії, що були виявлені при візуальному огляді. В одній з труб знайдені внутрішні дефекти, в результаті чого вона була замінена.

У спільній доповіді [37] іспанських і португальських вчених описана процедура контролю теплообмінників нормальними ультразвуковими хвилями. Існуючий в США режим інспектії атомних електростанцій наказує проводити періодичний контроль труб з розрахунком, що розвиток дефектів є повільним і лінійним. Практика, проте, показує, що втомні тріщини і тріщини від корозії під напругою можуть рости в трубі значно швидше, що зумовлює необхідність переходу від періодичних локальних інспектій до постійному моніторингу. У доповіді [38] описується досвід спільного використання методу акустичної емісії і методу далекодіючого ультразвуку в системі моніторингу стану трубної секції (труби парогенератора і замурованих труб).

В даний час хвильовий акустичний контроль застосовується переважно в дефектоскопії труб і моніторингу стану трубопроводів в нафтовій і газовій галузях промисловості [39].

В роботі [40] розглянуті умови збудження поздовжньої і крутильної нормальних хвиль, що поширяються по колу в кільцевих елементах. Для таких хвиль побудовані дисперсійні криві і досліджені оптимальні умови виявлення і визначення місця розташування радіальних тріщин. Японські фахівці в роботі [41] наводять дисперсійні криві для крутильних хвиль в мідних трубах і показують, що їх можна застосовувати як для прямих труб, так і для U-образних колін. Крутильні хвилі збуджуються

спеціально розробленими електромагнітно-акустичними перетворювачами. Для виявлення дефектів в U-подібному коліні частота випромінювання імпульсів крутильний хвилі вибирається таким чином, щоб довжина хвилі була менше радіуса кривизни коліна.

У статті [42] наведено огляд способів безконтактного введення і прийому ультразвукових хвиль, застосування яких в промисловості виправдано і необхідно. В статті перераховані коротко переваги і недоліки розглянутих методів: лазерне збудження і лазерний прийом ультразвуку – можливість роботи дистанційно, обмежена чутливість приймача, велика вартість; лазерне збудження і прийом за допомогою електромагнітно-акустичного перетворювача (ЕМАП). ЕМАП порівняно недорогий. Можливо також виконувати діагностику на зразках з чисто ЕМАП збудженням і прийомом. При цьому стверджується, що ЕМА метод має обмежену дистанційність в порівнянні з першим методом. Збудження і прийом за допомогою ЕМАП має порівняно легшу реалізацію, порівняно меншу вартість, у порівнянні з лазерним. Автори вважають, що збуджувати ультразвук за допомогою ЕМАП важко, оскільки потрібна велика близькість до об'єкту (до 1мм).

Висновки:

1. Використання ультразвукових хвиль нормального типу, в тому числі крутильних, дає можливість контролювати вироби довжиною до декількох десятків метрів. При цьому не потрібна додаткова підготовка поверхні об'єкта. Можливо контролювати об'єкти, що йдуть під землю (в стіні) або знаходяться під водою. Метод має високу продуктивність контролю при виявленні внутрішніх і поверхневих дефектів різної орієнтації.

2. До недоліків традиційних методів слід віднести наступне:

- Необхідність налаштування обладнання на використання хвилі певного типу і порядку в залежності від матеріалу, форми і розмірів об'єкта контролю.

- Невисока роздільна здатність на низьких частотах.

- Складність оцінки розмірів і форми дефекту.

- Неможливість визначити фактичну товщину стінки труби.

- Не виявляються поодинокі непрямі дефекти малих в поздовжньому і поперечному напрямку розмірів (групи таких дефектів, розташовані поруч, виявляються).

3. Для реалізації ефективності методів контролю та діагностики виробів трубчатого, стрижневого та листового типу доцільно використовувати безконтактні методи збудження та прийому ультразвукових імпульсів. З них найбільш перспективним є електромагнітно-акустичний метод.

Список літератури

1. Yamasaki, T. Flaw Detection in Copper Tubes Using Longitudinal Wave by Electromagnetic Acoustic Transducers / T. Yamasaki, D. Kawabe, T. Ohtani, M. Hirao // Transactions of the Jap. Soc. of Mechanical Engineers. A, 70 (690), 2004. – P. 238–245.
2. Yamasaki, T. Detection of Wall Thickness Reduction in Steel Pipes Using Optimum Excitation Signal with Electromagnetic Acoustic

- Transducers / T. Yamasaki, D. Kawabe, T. Ohtani, M. Hirao // Transactions of the Jap. Soc. of Mechanical Engineers. A, 67 (659), 2001. – P. 1255–1260.
3. Yamasaki, T. Compensation for Dispersion of Longitudinal Wave in Wires / T. Yamasaki, S. Tamai, M. Hirao // J. Jap. Soc. ND Insp. 48(6), 1999. – P. 362–368.
 4. Yamasaki, T. Waveform Distortion of Longitudinal Wave in Wire by Velocity Dispersion / T. Yamasaki, S. Tamai, M. Hirao // Transactions of the Jap. Soc. of Mechanical Engineers. A, 65 (636), 1999. – P. 1728–1733.
 5. Marzani, A. A Software for the Computation of Acoustic Waves in Cylindrical, Plate and Arbitrary Cross-Section Waveguides [Электронный ресурс] / A. Marzani, . P. Bocchini, E. Viola, P. Bartoli, S. Coccia; S. Salamone, F. Lanza di Scalea // Atti della 13a Congresso Nazionale sulle prove non-destructive Monitoraggio e diagnostica AIPnD, Roma, Italia, 15-17 Ottobre, 2009. – Pp. 1–9. – CDID56. – URL: <http://www.ndt.net/article/aipnd2009/files/orig/56.pdf> (дата обращения: 29.04.2011).
 6. Nadella, K.S. Numerical Simulation of Guided-Wave Propagation in Composite Plates and Sandwich Structures / K.S. Nadella, C.E.S. Cesnik // Health Monitoring of Structural and Biological Systems. 6–10 March, 2011. – P. 192.
 7. Santos, M.J. Practical Considerations on Ultrasonic Guided Wave Propagation: Immersion and Contact Methods / M.J. Santos, A.R. Ferreira, J.M. Perdigao // Materials Evaluation 62 (4), 2004. – P. 443–449.
 8. Zenghua, L. A New Type Transducer for Torsional Guided Wave Generation and Its Application to Defect Detection in Pipes / L. Zenghua, W. Bin, H. Cunfu, W. Xiuyan, Y. Shiming // Insight 49 (1), 2007. – P. 41–43.
 9. Mazeika, L. Investigation of the Transducer Arrays for Long Range Ultrasonics [Электронный ресурс] / L. Mazeika, R. Kazys, A. Maciulevicius // 10th European Conference on Non-Destructive Testing. Moscow, 2010, June 7–11. – 1 CD-ROM. – Paper Code: 1.3.9. – URL: [file:///F:/ECNDT%20-%202010%20\(CDI%20Reports\)/reports/l_03_09.pdf](file:///F:/ECNDT%20-%202010%20(CDI%20Reports)/reports/l_03_09.pdf).
 10. Rose, J.L. Phased Annular Array Transducers for Ultrasonic Guided Wave Applications / J.L. Rose, F. Yan, C. Borigo, Y. Liang, H. Kannajosyula, J.P. Koduru, C.J. Lissenden // Health Monitoring of Structural and Biological Systems. 6–10 March, 2011. – P. 181.
 11. Prager, J. Flaw Detection with Guided Waves Using Phased Array Technique [Электронный ресурс] / J. Prager, C. Hoever, G. Brekow, M. Kreutzbruck // IOtbEuropean Conference on Non-Destructive Testing. Moscow, 2010, June 7–11. – 1 CD-ROM. – Paper Code: 1.3.32. – URL: [file:///F:/ECNDT%20-%202010%20\(CDI%20Reports\)/reports/l_03_32.pdf](file:///F:/ECNDT%20-%202010%20(CDI%20Reports)/reports/l_03_32.pdf).
 12. Rose, J.L. Ultrasonic Guided Waves: An Introduction to the Technical Focus Issue / J.L. Rose // Materials Evaluation 61 (1), 2003. – P. 65.
 13. Bertoncini, F. 3D Characterization of Defects in Guided Wave Monitoring of Pipework Using a Magnetostrictive Sensor [Электронный ресурс] / F. Bertoncini, G. Oprea, M. Raugi, F. Turcu // 10th European Conference on Non-Destructive Testing. Moscow, 2010, June 7–11. – 1CD-ROM. – Paper Code: 1.3.33. – URL: [file:///F:/ECNDT%20-%202010%20\(CDI%20Reports\)/reports/l_03_33.pdf](file:///F:/ECNDT%20-%202010%20(CDI%20Reports)/reports/l_03_33.pdf).
 14. Volker, A.W.F. Experimental Results of Guided Wave Travel Time Tomography [Электронный ресурс] / A.W.F. Volker, J.G.P. Bloom // 10th European Conference on Non-Destructive Testing. Moscow, 2010, June 7–11. – 1 CD-ROM. – Paper Code: 1.3.35. – URL: [file:///F:/ECNDT%20-%202010%20\(CDI%20Reports\)/reports/l_03_35.pdf](file:///F:/ECNDT%20-%202010%20(CDI%20Reports)/reports/l_03_35.pdf).
 15. Croxford, A.J. Autofocus for Guided Wave SHM in the Presence of Dispersion • / A.J. Croxford, A.J. Hunter // Health Monitoring of Structural and Biological Systems. 6–10 March, 2011. – P. 18 V, II.
 16. Liu, S. Defect Detection Using Time Reversal Imaging Technique / A.J. Croxford, A.J. Hunter // Health Monitoring of Structural and Biological Systems. 6–10 March, 2011, – P. 181.
 17. Michaels, J.E. Multi-Mode and Multi-Frequency Guided Wave Imaging Via Chirp Excitations / J.E. Michaels, S.J. Lee, J.S. Hall, T.E. Michaels // Health Monitoring of Structural and Biological Systems. 6–10 March, 2011. – P. 179.
 18. Michaels, T.E. Chirp Generated Acoustic Wavefield Images / T.E. Michaels, J.E. Michaels, S J . Lee, X. Chen // Health Monitoring of Structural and Biological Systems. 6–10 March, 2011. – P. 180.
 19. Cut, L. Torsional– Guided Waves for Monitoring Cylindrical Structures Using Piezoelectric Macro-Fiber Composite / L. Cui, Y. Liu, C.K. Soh // Health Monitoring of Structural and Biological Systems. 6–10 March, 2011. – P. 179:•
 20. Sodano, H.A. Macro-Fiber Composites for Sensing, Actuation and Power Generation [Электронный ресурс] // Digital Library and Archives [сайт]. – 2003. – URL: http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-08012003-105114/unrestricted/Complete_Thesis.pdf (дата обращения: 3.05.2011). – 140 p.
 21. Lloyd, J.M. Electrical Properties of Macro Fiber Composite Actuators and Sensors [Электронный ресурс] // Digital Library and Archives [сайт]. – 2004. – URL: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07092004-123926/unrestricted/Thesis.pdf> (дата обращения: 3.05.2011). – 116 p.
 22. Tanaka, Y. Development of Contact-Type Sensor Using Piezoelectric Film for Guided Wave Measurement / Y. Tanaka, E. Tamoto, Y. Fujimoto // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 33 (3-4), 2010. – P. 1237–1244.
 23. Park, H. Development of a Non-Contact PZT Excitation and Sensing Technology Via Laser / H. Park, H. Sohn, C Yun, J. Chung, M. Lee // Health Monitoring of Structural and Biological Systems. 6–10 March, 2011. – P. 110.
 24. Lee, H. Pipeline Monitoring Using an Integrated MFC/FBG System / H. Lee, H. Sohn, H.W. Park // Health Monitoring of Structural and Biological Systems. 6–10 March, 2011. – P. 122.
 25. Z, F. Guided Wave and Damage Detection in Composite Laminates Using Different Fiber Optic Sensors / F. Li, H. Murayama, K. Kageyama, T. Shirai // Sensors 9 (5), 2009. – P. 4005–4021.
 26. Z, F. A Fiber Optic Doppler Sensor and Its Application in Debonding Detection for Composite Structures / F. Li, H. Murayama, K. Kageyama, G. Meng, I. Ohsawa, T. Shirai // Sensors 10 (6), 2010.
 27. Semoroz, A. Monitoring of Hidden Damage in Multi-Layered Aerospace Structures Using High-Frequency Guided Waves / A. Semoroz, B. Masserey, P. Fromme // Health Monitoring of Structural and Biological Systems. 6–10 March, 2011. – P. 176.
 28. An, Y. Integrated Impedance and Guided Wave Based Damage Detection Under Temperature Variation / Y. An, H. Sohn // Health Monitoring of Structural and Biological Systems. 6–10 March, 2011. – P. 122.
 29. Lanza di Scalea, F. Ultrasonic NDE of railroad tracks: air-coupled cross-sectional inspection and long-range inspection / F. Lanza di Scalea, J. McNamara // Insight 43 (6), 2003. – P. 394–401.
 30. Wilcox, P. Guided Wave Testing of Rail / P. Wilcox, M. Evans, B. Pavlikovic, D. Alleyne, K. Vine, P. Cawley, M. Lowe // Insight 45 (6). – 2003. – P. 413–420.
 31. McNamara, J. Improvements in Noncontact Ultrasonic Testing of Rails by the Discrete Wavelet Transform / J. McNamara, F. Lanza di Scalea // Materials Evaluation 62 (3), 2004. – Pp. 365–372.
 32. Cawley, P. Long Range Guided Wave Inspection – Current Defect Sizing Capabilities and Future Prospects [Электронный ресурс] / P. Cawley, J. Ma // 10th European Conference on Non-Destructive Testing. Moscow, 2010, June 7–11. – 1 CD-ROM. – Paper Code: 1.3.30. – URL: [file:///F:/ECNDT%20-%202010%20\(CDI%20Reports\)/abstracts/l_03_30.pdf](file:///F:/ECNDT%20-%202010%20(CDI%20Reports)/abstracts/l_03_30.pdf).
 33. Evans, M. Reliability of Guided Wave Ultrasonic Testing: [Электронный ресурс] / M. Evans, T. Vogt // IOthEuropean Conference on Non-Destructive Testing. Moscow, 2010, June 7–11. – 1CD-ROM. – Paper Code: 1.3.31. – URL: [file:///F:/ECNDT%20-%202010%20\(CDI%20Reports\)/reports/l_03_3T.pdf](file:///F:/ECNDT%20-%202010%20(CDI%20Reports)/reports/l_03_3T.pdf).
 34. Троицкий, В.А. Ультразвуковой контроль протяженных и труднодоступных участков трубопроводов / В.А. Троицкий, А.И. Бондаренко // Остаточный-ресурс и проблемы модернизации систем магистральных и промысловых трубопроводов. Международная научно-техническая конференция. Киев, 12–13 апреля, 2011. – С. 41–47.
 35. Nardoni, G. Guided Wave Experience in the Requalification of the Heating Network of Brescia City (Italy) [Электронный ресурс] / G. Nardoni, M. Certo // 10th European Conference on Non-Destructive Testing. Moscow, 2010, June 7–11. – 1 CD-ROM. – Paper Code: 1.3.34. – URL: [file:///F:/ECNDT%20-%202010%20\(CDI%20Reports\)/reports/l_03_34.pdf](file:///F:/ECNDT%20-%202010%20(CDI%20Reports)/reports/l_03_34.pdf).

36. Song, IV.-J. An Ultrasonic Guided Wave Technique for Damage Testing in a Ship Hull / W.-J. Song, J.L. Rose, H. Whitesel // Materials Evaluation 61 (1), 2003. – P. 94–98.
37. Boynard, C. Used of Ultrasonic Guided Waves on Inspecting Heat Exchangers Made with Ferromagnetic Material Tubes [Электронный ресурс] / C. Boynard, M. Carvalho, I.Real, A.G. Montejano, S.Perez, A.Soto // 10th European Conference on Non-Destructive Testing. Moscow, 2010, June 7-11. – 1 CD-ROM. – Paper Code: 1.3.37. – URL: file:///F:/ECNDT – 2010 (CD1 Reports)/abstracts/l_03_37.pdf.
38. Meyer, R.M. Combined Acoustic Emission and Guided Wave Monitoring of Fatigue Crack Growth on a Full Scale Pipe Specimen / R.M. Meyer, S. Cumblidge, P. Ramuhallin B. Watson, S.R. Doctor, L.J. Bond // Health Monitoring of Structural and Biological Systems. 6-10 March, 2011. – P. 194.
39. Edwards, G. Long Range Ultrasonic Testing — New Markets for New Technology [Электронный ресурс] // Long Range. Ultrasonic
- Monitoring of Engineering Assets [сайт]. – URL: http://www.lrcm.eu.com/publications/lрут_new_markets_forL_new_technology.pdf (дата обращения: 1.05.2011).
40. Prager, J. Flaw Detection with Guided Waves Using Phased Array Technique [Электронный ресурс] / J. Prager, C. Hoever, G. Brekow, M. Kreutzbruck // 10th European Conference on Non-Destructive Testing. Moscow, 2010, June 7-11. – 1 CD-ROM. – Paper Code: 1.3.32. – URL: file:///F:/ECNDT%20-%202010%20(CD1%20Reports)/reports/l_03_32.pdf.
41. Yamasaki, T. Flaw Detection in Copper Tubes Using Torsional Wave by Electromagnetic Acoustic Transducers / T. Yamasaki, D. Kawabe, T. Ohtani, M. Hirao // J. Jpn. Soc. ND Insp. 52 (2), 2003. – P. 89–94.
42. Palmer, S.B. Industrially Viable Non-Contact Ultrasound / S.B. Palmer, S. Dixon // Insight 45 (3), 2003. – P. 211–217.

Надійшла (received) 15.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методи і засоби ультразвукового контролю металовиробів трубчатого, стержневого та пластинчатого типу (Огляд ч.2) / С.Ю. Плеснєцов, Н.М. Юданова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів_у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 52–58. – Бібліогр.: 42 назви.– ISSN 2519-2671

Методы и средства ультразвукового контроля металлоизделий трубчатого, стержневого и пластинчатого типа (Обзор ч.2) / С.Ю. Плеснєцов, Н.Н. Юданова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів_у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 52–58. – Бібліогр.: 42 назви.– ISSN 2519-2671

Methods and means of ultrasonic control of metal products of tubular, rod and plate type (Review p.2) / S.Yu. Plesnetsov, N. N. Yudanova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 52–58. – Bibl.: 42. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плеснєцов Сергій Юрійович – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры «Компьютерные и радиоэлектронные системы контроля и диагностики», тел.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com

Плеснєзов Сергій Юрійович – кандидат технических наук, Национальний технический университет «Харьковский политехнический институт», старший викладач кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», тел.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com

Plesnetsov Sergey Yuriyovich – PhD, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer of the Department "Computer and Radioelectronic Systems for Testing and Diagnostics", tel.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com

Юданова Ніна Миколаївна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры «Компьютерные и радиоэлектронные системы контроля и диагностики», тел.: (057) 707-63-80; e-mail: krskd.kpi@gmail.com

Юданова Ніна Миколаївна – Национальний технический университет «Харьковский политехнический институт», старший викладач кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», тел.: (057) 707-63-80; e-mail: krskd.kpi@gmail.com

Yudanova Nina Nikolaevna – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer of the Department "Computer and Radioelectronic Systems for Testing and Diagnostics", tel.: (057) 707-63-80; e-mail: krskd.kpi@gmail.com

УДК 621.771.63

Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ, А. Н. ХРИСТИЧЕНКО, Е. Н. ХРИСТИЧЕНКО

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ФОРМОВКОЙ В ВАЛКАХ

В ряде отраслей экономики Украины широко применяются профили переменного сечения типа швеллеров, изготовленных листовой штамповкой. Основным их преимуществом является возможность получения равнопрочных конструкций применительно к конкретным условиям работы при наименьшем расходе металла. Наиболее перспективным способом получения профилей переменного сечения представляется профилирование в валках профилегибочного стана. Установлено, что после того, как угол подгиба достигает величины 90° , временной интервал формовки участка переменной ширины резко возрастает. Это приводит к увеличению зазора в калибре валков, при котором невозможно отформовать место изгиба на участке переменной ширины. Получена зависимость, обеспечивающая расчет разновременного смещения подвижных элементов верхнего и нижнего валков, что обеспечивается индивидуальными приводами механизма смещения каждого из них. Полученные аналитические зависимости могут быть использованы в качестве исходных при разработке технологических приемов, направленных на сведение к минимуму неравномерности деформаций по сечению профиля («смягчение» режима формовки, создание дополнительных продольных деформаций в местах изгиба) и, в конечном итоге, на повышение качества готовых профилей переменного сечения.

Ключевые слова: профили переменного сечения, профилирование в валках, участок переменной ширины, временной интервал формовки, смещение подвижных элементов валков.

У ряді галузей економіки України широко застосовуються профілі змінного перетину (типу швелерів), виготовлених листовим штампуванням. Основною їх перевагою є можливість отримання рівноміцьких конструкцій стосовно до конкретних умов роботи при найменшій витраті металу. Найбільш перспективним способом отримання профілів змінного перетину представляється профілювання в валках профілегібального стану. Встановлено, що після того, як кут підгинання досягає величини 90° , часовий інтервал формування ділянки змінної ширини різко зростає. Це призводить до збільшення зазору в калібрі валків, при якому неможливо відформувати місце згину на ділянці змінної ширини. Отримано залежність, яка забезпечує розрахунок різочасного зміщення рухомих елементів верхнього та нижнього валків, що забезпечується індивідуальними приводами механізму зсуву кожного з них. Отримані аналітичні залежності можуть бути використані в якості вихідних при розробці технологічних прийомів, спрямованих на зведення до мінімуму нерівномірності деформацій по перетину профілю («пом'якшення» режиму формування, створення додаткових поздовжніх деформацій в місцях згину) і, в кінцевому підсумку, на підвищення якості готових профілів змінного перетину.

Ключові слова: профілі змінного перерізу, профілювання в валках, ділянка змінної ширини, часовий інтервал формування, зміщення рухомих елементів валків.

In a number of branches of the Ukrainian economy, profiles of variable cross-section type of channels, manufactured by sheet punching, are widely used. Their main advantage is the possibility of obtaining equally strong structures with reference to specific operating conditions at the lowest metal consumption. The most promising way of obtaining profiles of variable cross-section is represented by profiling in the rolls of the roll forming mill. It is established that after the angle of the bend reaches 90° , the time interval for forming a section of variable width increases sharply. This leads to an increase in clearance in the caliber of the rolls, in which it is not possible to mold the bending point in a section of variable width. A dependence providing the calculation of the simultaneous displacement of the moving elements of the upper and lower rolls is obtained, which is provided by individual drives of the mechanism of displacement of each of them. The obtained analytical dependencies can be used as initial ones in the development of technological methods aimed at minimizing the unevenness of deformations along the section of the profile ("softening" the molding regime, creating additional longitudinal deformations at bending points) and, ultimately, improving the quality of the finished profiles variable section.

Keywords: variable cross-section profiles roll forming, variable-width section, time interval of forming, displacement of rolling elements of rolls.

Введение. Потребность автомобилестроения в гнутых профилях переменного сечения в настоящее время обеспечивается технологиями листовой штамповки, поскольку их отличительной особенностью является наличие участков, на которых кромки профиля не параллельны его продольной оси. Использование профилей переменного сечения позволяет получать конструкции требуемой равнопрочности применительно к конкретным условиям работы при наименьшей металлоёмкости.

Актуальность темы. В ряде отраслей экономики Украины (автомобилестроении, сельскохозяйственном машиностроении, строительстве и др.) в настоящее время широко применяются профили переменного сечения типа швеллеров, изготовленных листовой штамповкой. Так, например, большую часть потребности компаний «АвтоКрАЗ» и предприятий, выпускающих автоприцепы, составляют профили типа швеллеров, в которых участки постоянной ширины с узкой и широкой стенкой соединены между собой участком с переменной шириной стенки по длине. Основным их

преимуществом является возможность получения равнопрочных конструкций применительно к конкретным условиям работы при наименьшем расходе металла. Расширение области применения профилей переменного сечения сдерживается в основном из-за отсутствия эффективного и производительного способа их изготовления, который мог бы быть применен взамен использующихся технологических процессов (штамповка или вырезка части стенки горячекатаного швеллера с последующей сваркой).

Наиболее перспективным способом получения профилей переменного сечения представляется профилирование в валках профилегибочного стана, так как этот процесс является наименее трудоемким и наиболее производительным из всех перечисленных.

Для удовлетворения существующей потребности в профилях переменного сечения выполнен анализ технологической возможности их производства формовкой в валках, что позволит существенно повысить производительность

производства и снизить затраты на технологический передел.

Методика выполнения исследований.

Теоретический анализ выполнен с использованием уравнений течения вязких механики сплошных сред (получено поле скоростей перемещений металла в очаге деформации) [1–4], а также зависимостей для расчета кулачковых механизмов [5].

Результаты исследований.

Кинематический анализ формовки профилей переменного сечения. Постановка задачи.

Для опробования возможности производства профилей переменного сечения формовкой в валках выбран профилегибочный стан 2-5x50-670, который был дооборудован специально сконструированными валками, элементы которых могут смещаться в осевом направлении при профилировании, а также механизмами их смещения [6–8]. Исследования, выполненные на заготовке толщиной 3 мм, показали принципиальную возможность промышленного производства таких профилей.

Вместе с тем, исследования позволили также выявить ряд особенностей процесса формообразования, которые могут затруднить промышленное освоение разработанной технологии:

- при толщине заготовки более 3 мм смещение формующих элементов валков было затруднено, происходило несвоевременно, что вызвало переформовку профиля и в ряде случаев – заклинивание валков;

- по мере увеличения суммарного угла подгиба полок α_c сопротивление смещению формующих элементов резко возрастало, валки заклинило, и их смещение не происходило.

Указанные трудности можно объяснить тем, что по существующей технологии смещение верхнего и нижнего формующих элементов начинается одновременно – в момент, когда граничное сечение I (рис. 1) между участком с узкой стенкой и участком со стенкой переменной по длине ширины переходит через осевую плоскость валков.

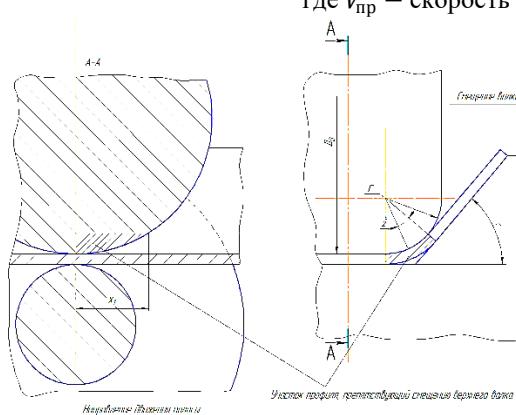


Рис. 2 – Схема для определения длины участка контакта верхнего валка с местом изгиба профиля за осевую плоскостью валков

Выражение (2) не учитывает момент начала контакта участка переменного сечения профиля с нижним валком и справедливо только для случаев, когда выполняется условие $\alpha_c < 90^\circ - \gamma$ и контакт

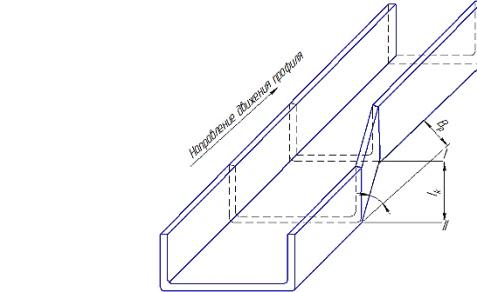


Рис. 1 – Общий вид профиля

Как видно из рис. 2, контакт верхнего валка с местом изгиба продолжается за осевую плоскостью валков на участке длиной:

$$x_1 = \sin \frac{\alpha_c}{2} \sqrt{(D_b - 2r \sin^2 \frac{\alpha_c}{2}) \cdot 2r}, \quad (1)$$

где D_b – катающий диаметр верхнего валка;

r – внутренний радиус формовки в данном переходе;

α_c – суммарный угол подгиба в данном переходе.

На этом участке место изгиба узкой части профиля препятствует перемещению верхнего валка, что может привести к заклиниванию. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости разновременного смещения верхнего и нижнего формующих валков:

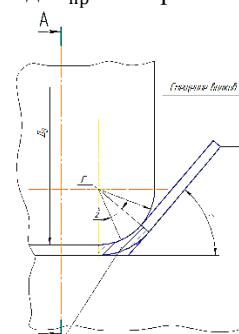
- смещение нижнего валка следует начинать в момент прохождения сечения I через осевую плоскость валков;

- смещение верхнего валка следует начинать в момент, когда внутренняя часть места изгиба профиля в сечении I прекращает контакт с верхним валком.

Тогда, с учетом (1) время смещения верхнего валка по отношению к нижнему можно определить по зависимости:

$$t_1 = \frac{\sin \frac{\alpha_c}{2} \sqrt{(D_b - 2r \sin^2 \frac{\alpha_c}{2}) \cdot 2r}}{V_{\text{пр}}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{пр}}$ – скорость профилирования.



профиля с нижним валком не препятствует смещению верхнего (γ – угол конусности профиля, см. рис. 1).

Если $\alpha_c \geq 90^\circ - \gamma$, то профиль вступает в контакт с нижним валком своей наружной поверхностью в

граничном сечении II между участком со стенкой переменной ширины и участком с широкой стенкой (рис. 1) в то время, когда сечение I ещё не достигло осевой плоскости валков (рис. 3) и размеры калибра соответствуют узкой части профиля. Такой контакт препятствует заходу профиля в калибр и тормозит его движение. В результате смещение валков, момент начала которого запрограммирован заранее из условия непрерывности процесса и не может быть перенесен при его торможении, в действительности начинается не после перехода сечения I через осевую плоскость валков, а ещё до его входа в калибр, что приводит к переформовке профиля, а в ряде случаев к заклиниванию валков.

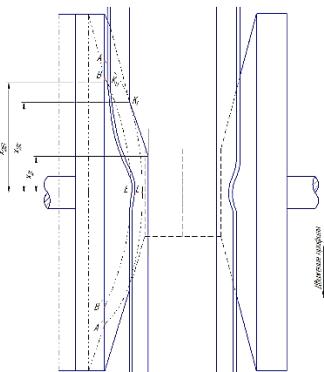


Рис. 3 – Схема для определения соприкосновения сечения II с конической поверхностью нижнего вала: D_H – катающий диаметр нижнего вала; B_p – перепад ширины стенки

Во избежание указанных выше неблагоприятных факторов необходимо начинать смещение подвижного элемента нижнего вала в момент, когда профиль соприкоснётся с ним своей наружной поверхностью в сечении II. Точки касания лежат на гиперболах, образованных (условно) при пересечении конической поверхности нижнего вала горизонтальными плоскостями. Наименее удалена от осевой плоскости валков точка касания K_c на гиперболе ACA' – на уровне стенки профиля; наиболее удалена точка K_n на гиперболе BEV' – на уровне кромки.

С учетом геометрии профиля и конического уравнения гиперболы

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2 - c^2} = 1, \quad (3)$$

где a – половина расстояния между вершинами; c – половина расстояния между фокусами гиперболы, положение сечения II по отношению к осевой плоскости валков в момент его соприкосновения на уровне стенки с подвижным элементом нижнего вала (в точке K_c) определяется по формуле:

$$x_{2II} = \operatorname{tg} \alpha_c \sqrt{B_p (B_p + D_H \cdot \operatorname{ctg} \alpha_c)}, \quad (4)$$

где D_H – катающий диаметр нижнего вала; B_p – перепад ширины стенки.

При больших суммарных углах подгибы α_c (более 80°) расстояние между проекциями точек одного сечения, находящихся на кромке и в месте изгиба, весьма незначительно, поэтому расчёт по

формуле (4) с достаточной степенью точности можно применять и для кромки.

Поскольку момент начала смещения подвижного элемента верхнего вала определяется в зависимости от положения сечения I, необходимо найти положение этого сечения в момент соприкосновения сечения II с подвижным элементом нижнего вала. Расстояние между сечениями I и II равно $B_p \operatorname{ctg} \gamma$. С учетом (4) расстояние от сечения I до осевой плоскости валков:

$$x_{2I} = \operatorname{tg} \alpha_c \sqrt{B_p (B_p + D_H \cdot \operatorname{ctg} \alpha_c)} - B_p \cdot \operatorname{ctg} \gamma. \quad (5)$$

На основании (1) и (5) время запаздывания начала смещения подвижного элемента верхнего вала по отношению к нижнему в клетях, где $\alpha_c \geq 90^\circ - \gamma$ определяется по зависимости

$$t_2 = \frac{1}{V_{\text{пп}}} \left[\sin \frac{\alpha_c}{2} \sqrt{(D_B - 2r \sin^2 \frac{\alpha_c}{2}) \cdot 2r} + \operatorname{tg} \alpha_c \sqrt{B_p (B_p + D_H \cdot \operatorname{ctg} \alpha_c)} - B_p \operatorname{ctg} \gamma \right]. \quad (6)$$

Отдельного рассматривания требует взаимодействие профиля с подвижными элементами в последней клети, где полки швеллера окончательно подгибаются до суммарного угла $\alpha_c = 90^\circ$. Как видно из рис. 4, смещению элемента верхнего вала в последней клети препятствует вся внутренняя поверхность как места изгиба, так и полки профиля. Из геометрических соотношений длина этой поверхности:

$$x_1' = \sqrt{(b - c)(D_B - b + S)}, \quad (7)$$

где b – высота полки;

S – толщина заготовки.

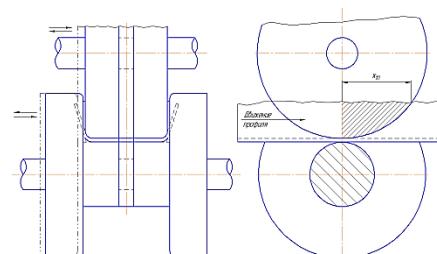


Рис. 4 – Схема для определения длины участка профиля, препятствующего смещению верхнего вала в последней клети

Очевидно, что в момент соприкосновения наружной поверхности профиля в сечении II с нижним валком граничное сечение I удалено от осевой плоскости валков на расстояние:

$$x_2' = \sqrt{(0,5D)^2 - (0,5D_H)^2}, \quad (8)$$

где D – диаметр бокового элемента нижнего вала.

С учетом изложенного, время запаздывания смещения верхнего вала по сравнению со смещением нижнего

$$t_3 = \frac{\sqrt{(b-c)(D_B-b+S)} + \sqrt{(0,5D)^2 - (0,5D_H)^2}}{V_{\text{пп}}}. \quad (9)$$

Таким образом, в результате теоретического анализа получены зависимости (2), (6) и (9), по

которым могут быть определены моменты начала работы механизмов поперечного смещения формующих элементов валков при любых соотношениях геометрических размеров профиля и валков, режимах формовки и скоростях профилирования.

По формулам (2), (6), (9) были проведены расчёты, в качестве исходных данных для которых приняты параметры профиля, изготовленного затем на профилегибочном стане 2-5x50-670: $S=4$ мм, $b=90$ мм, $B_p=50$ мм, $\gamma=8^\circ$, $r=10$ мм, $V_{\text{пр.}}=30$ мм/сек.

Профили, отформованные на стане 2-5x50-670 при разновременном смещении валков, были более высокого качества, чем полученные с применением их одновременного смещения. При смещении подвижные элементы валков не заклинивались, процесс отличается высокой стабильностью. Усилие смещения уменьшилось в среднем на 45%.

По результатам расчётов построены графики зависимости требуемого интервала между начальными моментами смещения нижнего и верхнего валков от суммарного угла подгиба α_c (рис. 5).

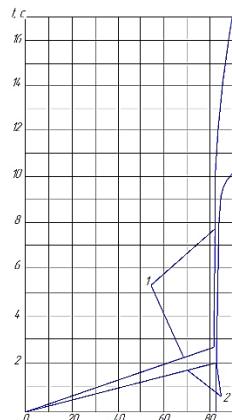


Рис. 5 – Изменение интервала между начальными моментами смещения элементов верхнего и нижнего валков в зависимости от суммарного угла подгиба: 1 – $D_B=700$ мм; 2 – $D_B=375$ мм

Исследование деформированного состояния подгибаемых элементов профилей переменного сечения при формовке со смещением валков.

Поскольку наиболее типичным видом профилей переменного сечения являются профили, имеющие три характерных участка по длине: два с постоянной толщиной стенки и параллельными полками, различающиеся лишь шириной стеки, и третий с непараллельными полками и переменной шириной стенки, при теоретическом анализе рассматриваем формообразование профиля от узкого конца к широкому. На участке переменного сечения валки смещаются к кромке формующей полки, при этом обеспечивается параллельность другой полки продольной оси профиля по всей его длине (рис. 6).

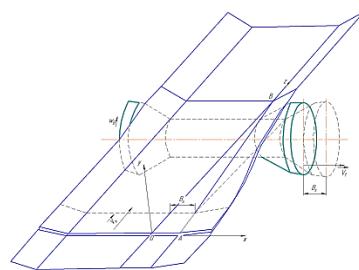


Рис. 6 – Схема очага деформации при формовке участка переменного сечения

Процесс образования места изгиба при подгибке полок профиля не отличается от процесса, подробно исследованного в работах по теории профилирования. Поэтому в данной работе исследовано деформированное состояние металла только подгибаемых элементов. В качестве метода исследования выбран метод механики сплошных сред с использованием поля скоростей перемещений. Принимаем, что если совокупность материальных точек первоначально располагается в плоскости, перпендикулярной продольной оси профиля, то в процессе деформирования она остается в этой же плоскости (гипотеза плоских сечений), а точки не меняют своего взаимного положения: так, если до деформации они располагались на перпендикуляре к плоскости, проходящей по середине толщины заготовки, то в процессе деформации они останутся на этой же прямой, которая будет нормальной к середине поверхности деформируемого элемента (постулат Кирхгофа-Лява).

Процесс подгиба рассматриваем в декартовой системе координат. Начало координат 0 располагаем таким образом, что плоскость x_0y совпадает с плоскостью поперечного сечения профиля на границе участка плавного перехода, ось $0x$ проходит по середине поверхности стенки, а ось $0z$ – через место изгиба узкой части профиля и направлена в сторону движения полосы (рис. 6). Для упрощения анализа считаем, что произвольные сечения подгибаемого элемента в процессе формовки переходят из начального положения в конечное путем поворота вокруг прямой AB , проходящей через место изгиба участка переменного сечения и расположенной по отношению к продольной оси $0z$ под тем же углом γ , что и кромка исходной заготовки.

При рассмотрении перехода произвольно выбранного сечения подгибаемого элемента из одного положения в другое (рис. 7), согласно принятым гипотезам, скорость произвольной точки M (x_0, y_0) данного сечения подгибаемого элемента определяется следующим образом:

$$[\vec{V}_M] = \omega(z) \cdot [\vec{r}_i], \quad (10)$$

где $\omega(z)$ – функция изменения угловой скорости поворота сечения в плоскости x_0y ;

$[\vec{r}_i]$ – радиус-вектор, определяющий положение рассматриваемой точки в плоскости x_0y .

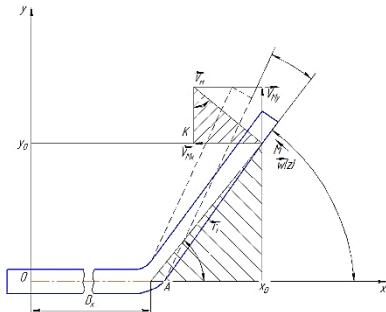


Рис. 7 – Расчетная схема к определению поля скоростей перемещения

Поскольку угол поворота сечения подгибаемого элемента в процессе формовки равен углу подгиба α , который изменяется вдоль очага деформации, можно записать:

$$\omega(z) = \alpha(z). \quad (11)$$

Согласно расчетной схеме рис. 7 модуль радиуса-вектора:

$$[r_{i0}] = \sqrt{(x_0 - +y_0^2}. \quad (12)$$

Однако следует учитывать, что в процессе формовки происходит дополнительное изменение координат точек подгибаемого элемента и действительная его ширина на участке переменного сечения меньше рассматриваемой по принятой расчетной схеме в силу непараллельности линии изгиба и продольной оси профиля (рис. 8). Поэтому реальная величина радиуса-вектора произвольной точки подгибаемого элемента

$$[r_i] = [r_{i0}] + \Delta r_i, \quad (13)$$

где Δr_i – изменение модуля радиуса-вектора в процессе подгибы, мм.

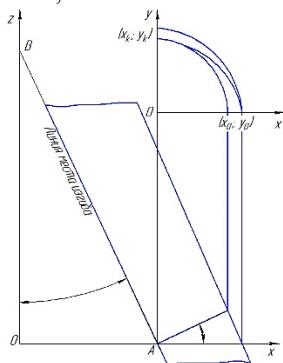


Рис. 8 – Схема для определения изменения $[r_i]$ в процессе подгибы

Для перехода любой точки подгибаемого элемента из начального положения (x_0, y_0) в конечное (x_k, y_k) , приняв линейную зависимость изменения величины радиуса-вектора от угла подгибы, можно записать (рис. 8):

$$\Delta r_i = \left[\frac{2}{\pi} (1 - \cos \gamma) \sqrt{(x_0 - B_x)^2 + y_0^2} \right] \alpha(z). \quad (14)$$

Определим проекции скорости \vec{V} на координатные оси X, Y в общем виде:

$$V_{Mx} = \omega(z) \vec{[r_i]} \sin \beta; V_{My} = \omega(z) \vec{[r_i]} \cos \beta, \quad (15)$$

где β – угол между радиусом – вектором и осью 0x, определяемый через координаты начального положения точки M.

Подставляя (11) и (13) в (15), с учетом (12) и (14), получим:

$$V_{Mx} = -[\alpha(z)] \left[1 - \frac{2(1 - \cos \gamma)}{\pi} \right] y_0;$$

$$V_{My} = -[\alpha(z)] \left[1 - \frac{2(1 - \cos \gamma)}{\pi} \right] (x_0 - B_x). \quad (16)$$

В первом приближении зависимость $\alpha(z)$ является линейной, то есть все точки подгибаемого элемента перемещаются в процессе формовки по прямой. При этом текущее значение угла подгибы:

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_2 - \alpha_1), \quad (17)$$

где α_1, α_2 – угол подгибы в начале и в конце участка деформирования, град;

L – длина очага деформации, мм.

Учитывая соответствие между исходными и текущими координатами $x \leftrightarrow x_0, y \leftrightarrow y_0, z \leftrightarrow z_0$, определяемое известным уравнением (13), условие отсутствия скорости в направления оси Oz (решается плоская задача), а также выражение (17), поле скоростей материальных точек в процессе подгибы полок при профилировании участка переменного сечения запишем следующим образом:

$$V_x = - \left[\alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_2 - \alpha_1) \right]^2 \left[1 - \frac{2(1 - \cos \gamma)}{\pi} \right] y_0; \\ V_y = \left[\alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_2 - \alpha_1) \right]^2 \left[1 - \frac{2(1 - \cos \gamma)}{\pi} \right] (x_0 - B_x); \\ V_z = 0 \quad (18)$$

На основании расчета по формулам (18) построено поле скоростей перемещений частиц металла при подгибе полке на участке с переменным сечением (рис. 9). Значение V_x и V_y рассчитаны для точек, расположенных на наружной поверхности полки профиля ($h=90$ мм, $\gamma=8^\circ$, $B_x=50$ мм) при подгибе с $\alpha_1=36^\circ$ до $\alpha_2=52^\circ$.

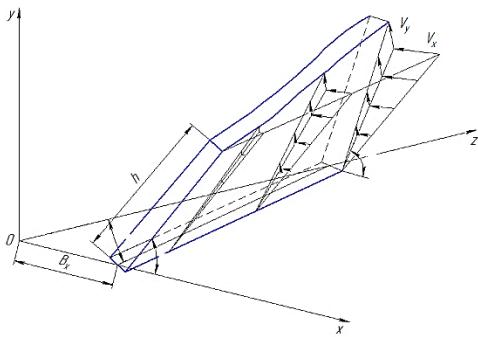


Рис. 9 – Поле швидкостей переміщень при формуванні участка змінного сечення

Аналіз отриманих епюр розподілення складових швидкостей переміщень показав їх зголошуваність з кінематичними представленнями о переміщенні частин в процесі формоутворення профілів змінного сечення. Характер розподілення горизонтальної складової V_x і вертикальної складової V_y одинаков, але лише різниця, що значення V_y зростають в кінці процеса більш інтенсивно, ніж V_x . Так V_x , так і V_y лінійно залежать від координат y , x і не лінійно залежать від z . Лінійна залежність пояснюється принятій схемі переміщення елемента профіля в процесі погибки, згідно якої відбувається тільки поворот сечення навколо точки на лінії згину; не лінійна – наявністю в вираженнях (18) квадратичної залежності α від z . Однак остання функція мало впливає на зміну складових швидкостей переміщення, яке близько до лінійного.

Ісследование деформированного состояния металла проводим по полученному полю скоростей перемещений (18). Используя связь скоростей деформаций со скоростями перемещений в декартовой системе координат (14), получаем:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{xx} &= \frac{V_x}{\partial x} = 0; \quad \dot{\varepsilon}_{yy} = \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0; \quad \dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0; \\ \dot{\varepsilon}_{xy} &= \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} = 0; \\ \dot{\varepsilon}_{yz} &= \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} = 2 \left[\alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{L} \cdot \left[1 - \frac{2(1 - \cos\gamma)}{\pi} \right] (x_0 - B_x); \\ \dot{\varepsilon}_{zx} &= \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} = -2 \left[\alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{L} \cdot \left[1 - \frac{2(1 - \cos\gamma)}{\pi} \right] y_0. \end{aligned} \quad (19)$$

Для расчета деформаций, согласно принятым предпочтениям, определяем связь текущих координат произвольной точки М (x , y , z) с начальными (x_0 , y_0 , z_0):

$$\begin{aligned} x &= (x_0 - B_x) \cos\Delta\alpha(z) - y_0 \sin\Delta\alpha(z) + B_x - \frac{B_x}{L} z \\ y &= (x_0 - B_x) \sin\Delta\alpha(z) + y_0 \cos\Delta\alpha(z) \\ z &= z_0 \end{aligned} \quad (20)$$

Из интегральных соотношений между компонентами деформаций $\dot{\varepsilon}_{xx}$, $\dot{\varepsilon}_{yy}$, $\dot{\varepsilon}_{zz}$, $\dot{\varepsilon}_{xy}$, $\dot{\varepsilon}_{yz}$, $\dot{\varepsilon}_{zx}$ и

скоростями деформаций, с учетом $\Delta\alpha(z) = \Delta\alpha \cdot t$, после преобразований получим:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{xx} &= 0; \quad \dot{\varepsilon}_{yy} = 0; \quad \dot{\varepsilon}_{zz} = 0; \quad \dot{\varepsilon}_{xy} = 0; \\ \dot{\varepsilon}_{yz} &= 2 \left[\alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{L} \cdot \left[1 - \frac{2(1 - \cos\gamma)}{\pi} \right] \cdot \left[(x_0 - B_x) \frac{\sin\Delta\alpha}{\Delta\alpha} + \frac{y_0}{\Delta\alpha} (\cos\Delta\alpha - 1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{L - z}{L} B_x \right]; \\ \dot{\varepsilon}_{zx} &= -2 \left[\alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{L} \left[1 - \frac{2(1 - \cos\gamma)}{\pi} \right] \cdot \left[\frac{\cos\Delta\alpha - 1}{\Delta\alpha} (B_x - x_0) + \frac{y_0}{\Delta\alpha} \sin\Delta\alpha \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

Аналітическое выражение (21) характеризует распределение в подгибаемом элементе сдвиговых деформаций, наличие которых соответствует принятой расчетной схеме и рабочей гипотезе. Эти деформации линейно зависят от начальных координат точки. В определенных сечениях участка плавного перехода они достигают максимальных значений:

$$\text{при } z = L \left[\frac{x_0 - B_x}{B_x} \sin\Delta\alpha - \frac{y_0}{B_x \Delta\alpha} (1 - \cos\Delta\alpha) - \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} + 1 \right] \quad (\varepsilon_{yz})_{max} = \frac{\alpha_1 (2x_0 \Delta\alpha - y_0 \Delta\alpha^2) (\pi - \gamma^2)}{\pi L}; \quad (22)$$

при $z=L$

$$(\varepsilon_{zx})_{max} = \frac{\alpha_2 \Delta\alpha^2 (B_x - x_0 - \frac{y_0}{\Delta\alpha} (\pi - \gamma^2))}{\pi L}. \quad (23)$$

Анализ выражений (22), (23) показывает, что сдвиговые деформации для любой точки подгибаемых элементов принимают максимальное значение не одновременно. Расстояние между плоскостями, соответствующим этим значениям, определяется по зависимости:

$$\Delta z = L \left[\frac{x_0 - B_x}{B_x \Delta\alpha} \sin\Delta\alpha - \frac{y_0}{B_x \Delta\alpha} (1 - \cos\Delta\alpha) - \frac{\alpha_1}{\Delta\alpha} \right]. \quad (24)$$

С ужесточением режима формовки это расстояние увеличивается. Оно является минимальным у места изгиба и максимальным – у кромки профиля.

Выводы.

1. Установлено, что после того, как угол погибки достигает величины 90° , временной интервал формовки участка переменной ширины резко возрастает. Это приводит к увеличению зазора в калибре валков, при котором невозможно отформовать место изгиба на участке переменной ширины. Получена зависимость, обеспечивающая расчет разновременного смещения подвижных элементов верхнего и нижнего валков, обеспечивается индивидуальными приводами механизма смещения каждого из них.

2. Полученные аналитические зависимости могут быть использованы в качестве исходных при разработке технологических приемов, направленных на сведение к минимуму неравномерности деформаций по сечению профиля («смягчение» режима формовки, создание дополнительных продольных деформаций в местах изгиба) и, в конечном итоге, на повышение качества готовых профилей переменного сечения.

Список літератури

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – Москва: Наука, 1983. – 540 с.
2. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. / 3-е изд. – Москва: Изд-во МГУ, 1990. – 285 с.
3. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением: учебное пособие для вузов. – Москва: Металлургия, 1983. – 285 с.
4. Тришевский, И.С. Теоретические основы процесса профилирования: монография / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов. – Москва: Металлургия, 1980. – 287 с.
5. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Наука, 1988. – 640 с.
6. Тришевский И.С. Производство деталей из гнутых профилей / И.С. Тришевский, В.С. Марынин, В.А. Хмель. – Киев: Техника, 1985. – 127 с.
7. Тришевский И.С. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката: монография / И.С. Тришевский, В.И. Мирошниченко, В.П. Стукалов. – Киев: Техника, 1980. – 168 с.
8. Тришевский И.С. Производство гнутых профилей. Оборудование и технология: монография / И.С. Тришевский, А.Б. Юрченко, В.С. Марынин. – Москва: Металлургия, 1982. – 384 с.

Bibliography (transliterated)

1. Sedov L.I. Mekhanika sploshnoy sredy. – Moscow: Nauka. 1983. – 540 p.
2. Ilyushin A.A. Mekhanika sploshnoy sredy. / 3-e izd. – Moscow: Izd-vo MGU. 1990. – 285 p.
3. Gun G.Ya. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov obrabotki metallov davleniem: uchebnoye posobiye dlya vuzov. – Moscow: Metallurgiya. 1983. – 285 p.
4. Trishevskiy, I.S. Teoreticheskiye osnovy protsessa profilirovaniya: monografiya / I.S. Trishevskiy, M.E. Doktorov. – Moscow: Metallurgiya. 1980. – 287 p.
5. Artobolevskiy I.I. Teoriya mekhanizmov i mashin: Ucheb. dlya vuzov. – 4-e izd., pererab. i dop. – Moscow: Nauka. 1988. – 640 p.
6. Trishevskiy I.S. Proizvodstvo detaley iz gnutykh profiley / I.S. Trishevskiy, V.S. Marin, V.A. Khmel. – Kiev: Tekhnika. 1985. – 127 p.
7. Trishevskiy I.S. Kalibrovka valkov dlya proizvodstva gnutykh profiley prokata: monografiya / I.S. Trishevskiy, V.I. Miroshnichenko, V.P. Stukalov. – Kiev: Tekhnika. 1980. – 168 p.
8. Trishevskiy I.S. Proizvodstvo gnutykh profiley. Oborudovaniye i tekhnologiya: monografiya / I.S. Trishevskiy, A.B. Yurchenko, V.C. Marin. – Moscow: Metallurgiya. 1982. – 384 p.

Поступила (received) 13.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз можливості виробництва профілів змінного сечения формовкою в валках / Ю.А. Плеснєцов, А.Н. Христиченко, Е.Н. Христиченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 59–65. – Бібліогр.: 8 назв.– ISSN 2519-2671

Аналіз можливості виробництва профілів змінного сечения формуванням в валках / Ю.О. Плеснєцов, А.М. Христиниченко, Є.М. Христиниченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 59–65. – Бібліогр.: 8 назв.– ISSN 2519-2671

Analysis of the possibility of producing sections of variable cross-section by forming in rolls / Yu. A. Plesnetsov, A.N. Khristichenko, E.N. Khristichenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 59–65. – Bibl.: 8. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плеснєцов Юрій Олександрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри обробки металів тиском, тел.: (097) 902-29-18; e-mail: plesnetsov@gmail.com

Плеснєцов Юрій Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой обработки металлов давлением, тел.: (097) 902-29-18; e-mail: plesnetsov@gmail.com

Plesnetsov Yury Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Head of the department of metal forming, tel.: (097) 902-29-18; e-mail: plesnetsov@gmail.com

Христиченко Анастасія Миколаївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри обробки металлов давлением, тел.: (097) 026-17-38; e-mail: Anast733@mail.ru

Христиченко Анастасия Николаевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры обработки металлов тиском, тел.: (097) 026-17-38; e-mail: Anast733@mail.ru

Khrustichenko Anastasia Nikolaevna – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», student of the department of metal forming, tel.: (097) 026-17-38; e-mail: Anast733@mail.ru

Христиченко Єлизавета Миколаївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри обробки металлов давлением, тел.: (050) 969-72-14; e-mail: Lizax.2014@gmail.com.

Христиченко Елизавета Николаевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры обработки металлов давлением, тел.: (050) 969-72-14; e-mail: Lizax.2014@gmail.com

Khrustichenko Elizaveta Nikolaevna – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», student of the department of metal forming, tel.: (050) 969-72-14; e-mail: Lizax.2014@gmail.com

УДК 621.777.4

А.М. ПОТЯТИНИК, В.М. ГОРНОСТАЙ, С.Ф. САБОЛ

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОГО ЗВОРОТНЬОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ З РОЗДАЧОЮ

Досліджено можливість отримання порожнистих виробів зворотним видавлюванням з роздачою. Визначено параметри (конструктивні та технологічні) які суттєво впливають на процес формоутворення виробу з необхідними розмірами та якістю кінцевого виробу. Сформульовано подальші етапи дослідження за допомогою чисельних експериментів для визначення впливу параметрів (ступінь деформування, кут конуса матриці, коефіцієнт роздачі, швидкість деформування та швидкість переміщення матриці) процесу зворотного видавлювання для розробки раціональних технологічних процесів отримання виробів.

Ключові слова: : порожнистий виріб, холодне зворотне видавлювання з роздачою, метод скінчених елементів, зусилля видавлювання, питомі зусилля, напруження, деформації, форма і розміри виробів.

Исследована возможность получения полых изделий обратным выдавливанием с раздачей. Определены параметры (конструктивные и технологические) существенно влияют на процесс формообразования изделия с необходимыми размерами и качеством конечного изделия. Сформулированы дальнейшие этапы исследований с помощью численных экспериментов для определения влияния параметров (степень деформации, угол конуса матрицы, коэффициент раздачи, скорость деформирования и скорость перемещения матрицы) процесса обратного выдавливания для разработки рациональных технологических процессов получения изделий.

Ключевые слова: полый изделие, холодное обратное выдавливание с раздачей, метод конечных элементов, усилия выдавливания, удельные усилия, напряжения, деформации, форма и размеры изделий.

The analysis of existent methods of receipt of hollow wares the cold squeezing out is conducted. Advantages and lacks of these methods are certain. Possibility of receipt of hollow wares the reverse squeezing out is investigational with distribution. Parameters (structural and technological) are certain that substantially influence on the process of формообразования of good with necessary sizes and quality of eventual good. The tensely deformed state in the volume of purveyance, distribution of specific efforts on a working instrument and effort of process of squeezing out of cavity with distribution is certain. Distribution of degree of the use of resource of plasticity is presented in the volume of purveyance. The further stages of researches are set forth by means of numeral experiments for determination of influence of parameters (degree of deformation, cone of matrix angle, coefficient of distribution, speed of deformation and speed of moving of matrix) of process of the reverse squeezing out for development of rational technological processes of receipt of wares.

Key words: hollow product, cold reverse extrusion with distribution, finite element method, extrusion force, specific forces, stress, deformation, shape and size of products.

Вступ. Процеси отримання виробів холодним об'ємним штамуванням використовуються в багатьох галузях промисловості. Особливої уваги заслуговує військовий промисловий комплекс, а саме виготовлення боєприпасів [1]. Таке виробництво потребує високопродуктивних та маловитратних технологій, які дозволяють отримати високоточні вироби або напівфабрикати з підвищеними експлуатаційними властивостями [2, 3]. Для високопродуктивного виготовлення точних порожнистих виробів із сталей і кольорових металів широко використовують холодне видавлювання. Порівняльний аналіз різних способів виконано в роботі [4], як найбільш перспективний спосіб отримання виробів холодним видавлюванням є холодне зворотне видавлювання з роздачою.

Метою роботи є визначити вплив різних параметрів (конструктивних та технологічних) на процес зворотного видавлювання порожнистих виробів з роздачою.

Застосування метода скінчених елементів (МСЕ) для теоретичного аналізу процесів холодного видавлювання дозволяє встановлювати дані для проектування технології і штампового оснащення, які не потребують доопрацювання експериментальними роботами [5, 6]. В роботі використана скінченно-елементна програма DEFORM. Метал заготовок вважався пружно-пластичним зі зміненням,

деформуючий інструмент – абсолютно жорстким. Використання такої моделі металу дозволяє визначити кінцеві форму і розміри виробів, а також виконати моделювання процесів виймання пuhansona із здеформованої заготовки та виштовхування її із матриці після видавлювання.

Постановка задачі. На рис.1 показано розрахункову схему процесу (де: 1 – матриця, 2 – пuhanсон, 3 – виштовхувач, 4 – заготовка). Вихідна заготовка із сталі 20 діаметром 40 мм та висотою 50 мм з наступними властивостями: умовна межа текучості $\sigma_{0,2} = 380 \text{ MPa}$, модуль Юнга $2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ [3] та коефіцієнт Пуассона 0,3, яка отримується різанням в штампах з прутка. Враховано вплив тертя по Кулону з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,08$. Швидкість деформування складала $V_o = 2 \text{ mm/сек}$. Пuhanсон починає рухатися зі швидкістю V_0 (вихідне положення рис. 1, а). Після занурення пuhansona в заготовку матриця починає рухатися з такою ж швидкістю що й пuhanсон, що дозволяє реалізувати схему зворотного видавлювання порожнистої виробу з роздачою. Шляхом чисельного експерименту в програмному комплексі DEFORM-3D було проведено чисельний експеримент зворотного видавлювання порожнини з роздачою.

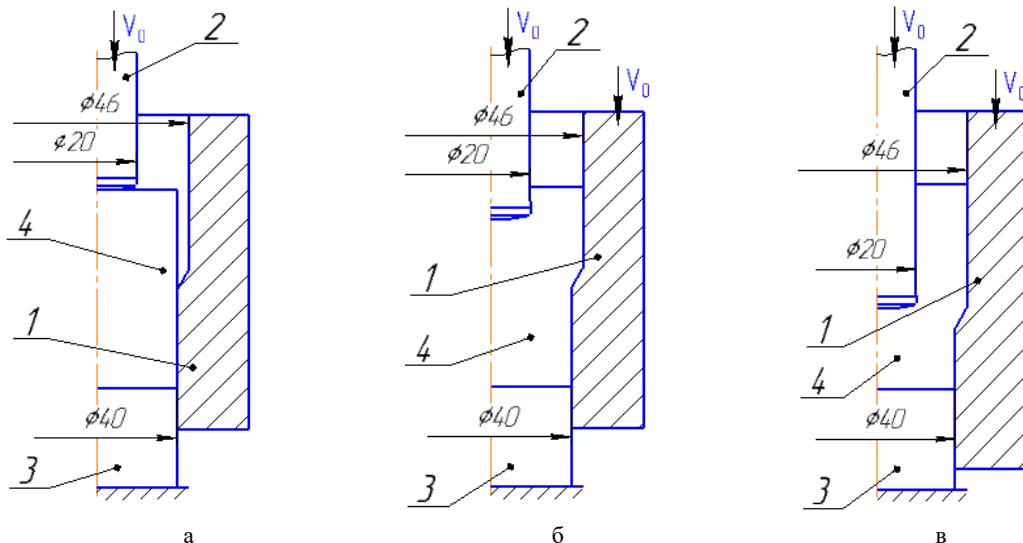


Рис. 1 – Розрахункова схема зворотного видавлювання з роздачою: 1 – матриця, 2 – пuhanсон, 3 – виштовхувач, 4 – заготовка а – вихідне положення пuhanсона; б – формоутворення виробу 5; в – кінцеве положення пuhanсона

Моделювання виконували в пружно-пластичній постановці. На рис. 2а зображена схема на початку зворотного видавлювання з роздачою. Заготовка 1 встановлена в матриці 2 на виштовхувачі 3. При переміщенні пuhanсона 4 виконується формоутворення виробу 5 (рис. 2, б). Моделюванням для кожної схеми видавлювання встановлена послідовність видалення готових виробів із матриць після видавлювання. На рис. 2в наведене положення виймання пuhanсона з виробу. Після зворотного

видавлювання з роздачою, при русі пuhanсона 1 вгору, виріб 2 спочатку залишається в матриці до тих пір поки калібруючий поясок торця пuhanсона торкнеться торця виробу (рис. 2, в). При подальшому переміщенні пuhanсона 1 виріб 2 залишається на пuhanсоні і повністю виходить із матриці (рис. 2, г). Тут також необхідний пристрій в штампі для знімання виробу із пuhanсона. Готовий виріб наведено на рис. 2, д.

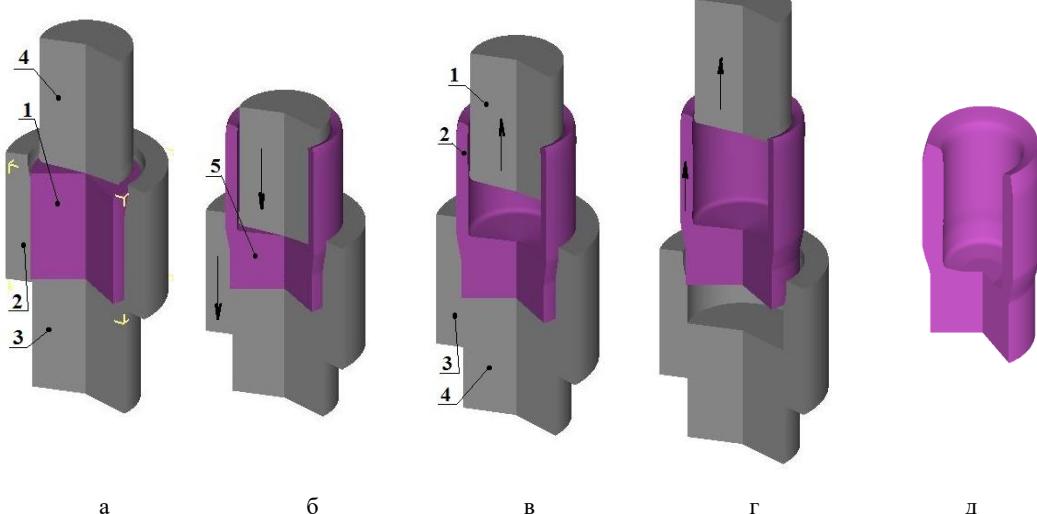


Рис. 2 – Етапи формоутворення порожнистого виробу холодним видавлюванням з роздачою:
а – початок зворотного видавлювання з роздачою; б – формоутворення виробу 5; в – калібруючий поясок торця пuhanсона торкається торця виробу; г – виріб 2 залишається на пuhanсоні і повністю виходить із матриці; д – готовий вироб

Результати досліджень. На рис. 3 зображені розрахункові залежності зусилля зворотнього видавлювання з роздачою (рис. 3, а) від переміщення деформуючого інструменту та розподілу нормальних напружень на поверхнях контакту заготовки з деформуючим інструментом при максимальній величині зусилля видавлювання (рис. 3, б, в). Зусилля

спочатку зростає до моменту виходу металу в зазор між матрицею і калібруючим пояском пuhanсона, а в подальшому залишаються постійними. Найбільше значення зусилля (1920 кН). Максимальні питомі напруження що діють на матриці склали 760 МПа та досягають свого максимального значення на конічній поверхні матриці. Найбільші питомі напруження на

пуансоні виникають на максимальному радіусі пуансона та досягають значення 800 МПа.

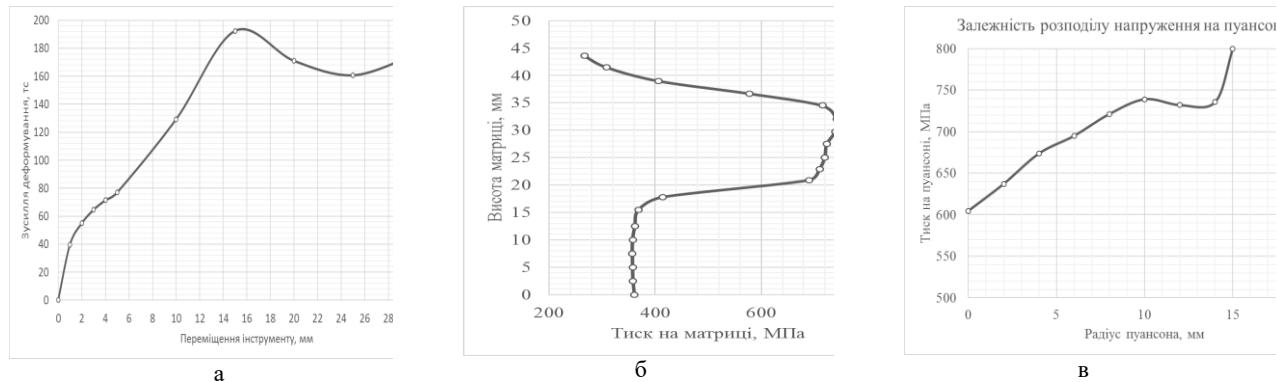


Рис. 3 – Залежність зусилля видавлювання: а – від переміщення пуансона; б – від висоти матриці; в – від радіусу пуансона

На рис. 4 представлено розподіл напружень в об'ємі заготовки в навантаженому стані при максимальному зусиллі процесу зворотного видавлювання порожнини з роздачою. На рис. 4, а показано розподіл інтенсивності напружені в об'ємі заготовки. З якого можна оцінити змінення та кількісне його значення в стінки та донній частині кінцевого виробу. При зворотному видавлюванні

порожнини з роздачою важливо визначити такі параметри процесу (максимально можливу ступінь деформування, кут конуса матриці, коефіцієнт роздачі, швидкість деформування та швидкість переміщення матриці [4]), які б дозволили отримувати виріб за найменшою кількістю переходів з необхідними властивостями.

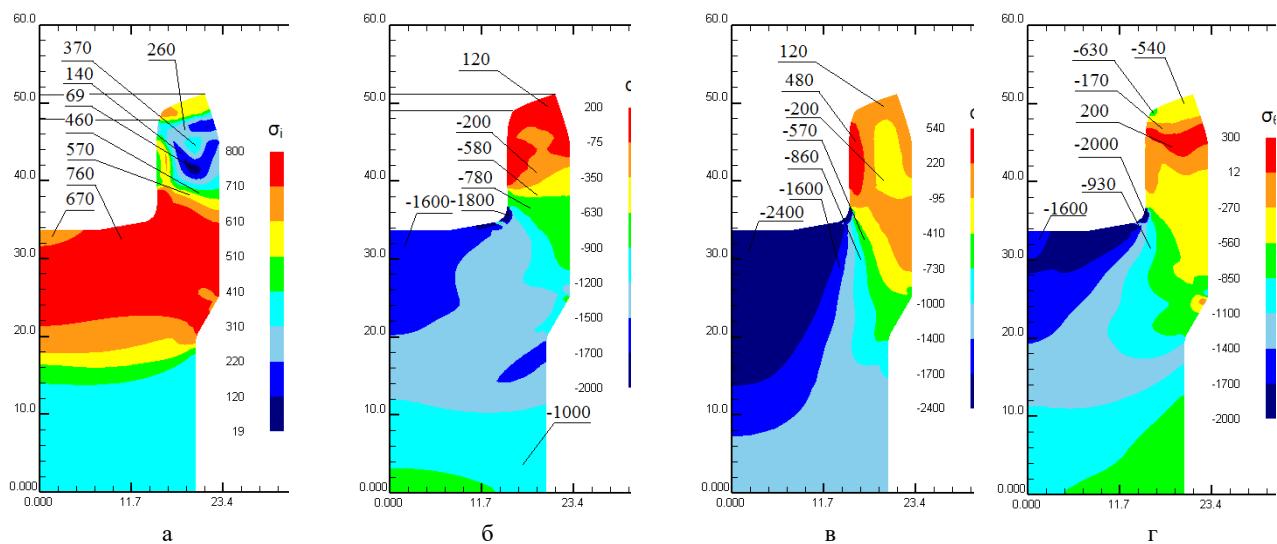


Рис. 4 – Розподіл напружень в об'ємі заготовки: а – інтенсивність напружень σ_i ; б – напруження σ_r ; в – напруження σ_z ; г – напруження σ_θ

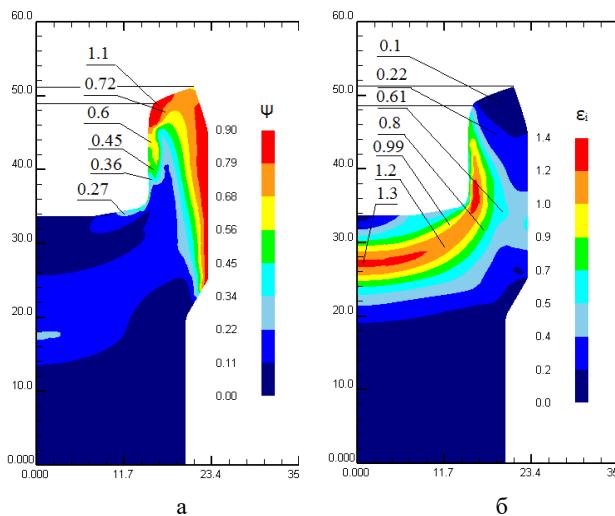


Рис. 5 – Визначення критичних параметрів процесу видавлювання: а – ступінь використання пластичності; б – розподіл інтенсивності деформацій ε_i в об'ємі заготовки

На рис. 5, а представлено розподіл ступеня використання ресурсу пластичності, з якого видно що при певних параметрах процесу спостерігається критичні значення ступеня використання пластичності, що може привести до виникнення тріщини на поверхні, що контактує зі стінкою матриці. Пропрацювання структури матеріалу оцінюємо за розподілом інтенсивності напружень ε_i див. рис. 5, б.

Виходячи з вище наведеного в подальшому необхідно визначити: 1 – співвідношення швидкостей переміщення пuhanсону та матриці, які дозволяють отримати вироби за мінімальну кількість переходів, 2 – оптимальний кут конуса матриці який дозволить зменшити питомі напруження на робочому інструменті, 3 – максимально можливу ступінь деформації за один перехід при мінімальних питомих напруженнях на інструменті для підвищення стійкості штампового оснащення.

Висновок. Досліджено можливість отримання порожнистих виробів зворотнім видавлюванням з роздачею. Визначено параметри які суттєво впливають на цей процес. Сформульовано подальші етапи досліджень за допомогою чисельних експериментів для встановлення впливу параметрів (ступінь деформування, кут конуса матриці, коефіцієнт роздачі, швидкість деформування та швидкість переміщення матриці) процесу зворотного видавлювання.

Список літератури

- Холодная объемная штамповка. Справочник. / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М: Машиностроение, 1973. – 496 с.
- Ковка и штамповка. Справочник. В 4-х т.; т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
- Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин // 2-е изд. – М.: Металургия, 1973 – 224 с.
- Калюжний В.Л. Аналіз схем холодного видавлювання віссесиметричних порожнистих виробів / Калюжний В.Л., Потятиник А.М. // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Луцьк 2017. – Випуск №59. – С. 137–143.
- Калюжный В.Л. Сравнительный анализ процессов обратного выдавливания и прямого выдавливания с раздачей изделий с полостью постоянного диаметра / В.Л. Калюжный, Л.И. Алиева, И.П. Куликов // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2013. – №4(37). – С. 87–92.
- Калюжный В.Л. Определение усилий извлечения пuhanсона из сдеформированной заготовки и выталкивания заготовки из матрицы при холодном выдавливании полых изделий с разной степенью деформации / В.Л. Калюжный, Л.И. Алиева, В.Н. Горностай // Усовершенствование процессов и оборудования для обработки давлением в металлургии и машиностроении: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2016. – №1(42). – С. 90–100.
- Deform-3D – мощная система моделирования технологических процессов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.thesis.com.ru/software/deform>.

Bibliography (transliterated)

- Kholodnaya ob'emnaya shtampovka. Spravochnyk. / Pod red. H.A. Navrotskoho. – Moscow. Mashynostroenye, 1973. – 496 p.
- Kovka y shtampovka. Spravochnyk. V 4 vol.; vol. 3. Kholodnaya ob'emnaya shtampovka / Pod red. H.A. Navrotskoho. – Moscow: Mashynostroenye, 1987. – 384 p.
- Tret'yakov A.V. Mekhnicheskiye svoystva metallov y splavov pry obrabotke davleniem / A.V. Tret'yakov, V.Y. Zyuzin // 2-e yzdr. – Moscow: Metalurhyya, 1973. – 224 p.
- Kalyuzhnyy V.L. Analiz skhem kholodnogo vydavlyuvannya visesymetrychnykh porozhnystykh vyrubiv / Kalyuzhnyy V.L., Potyatynik A.M. // Naukovyi notatky. Mizhvuziv's'kyi zbirnyk. Lut's'k, 2017. – Vyp. No 59. – P. 137–143.
- Kalyuzhnyy V.L. Sravnitel'nyy analiz protsessov obratnogo vydavlyvannya y ryamoho vydavlyvannya s razdashchey yzdelyy s polost'yu postoyanno dyametra / V.L. Kalyuzhnyy, L.Y. Alyeva, Y.P. Kulykov // Obrabotka materyalov davleniem: sb. nauch. trudov. – Kramatorsk: DHMA, 2013. – № 4(37). – P. 87–92.
- Kalyuzhnyy V.L. Opredelenye usylyy yzvlecheniya puansona yz sdeformirovannoy zahotovky u vytalkyvannya zahotovky yz matrytsy pry kholodnom vidavlyvanny polikh yzdelyy s raznoy stepen'yu deformatsyy / V.L. Kalyuzhnyy, L.Y. Alyeva, V.N. Hornostay // Usovershenstvovany protsessov y oborudovannya dlya obrabotky davleniem v metallurhyy y mashynostroenyy: sb. nauch. trudov. – Kramatorsk: DHMA, 2016. – № 1(42). – P. 90–100.
- Deform-3D – moshchnaya sistema modelyrovannya tekhnolohicheskikh protsessov [Elektronniy resurs]. – Rezhym dostupa: <http://www.thesis.com.ru/software/deform>.

Надійшла (received) 15.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз впливу параметрів процесу холодного зворотнього видавлювання порожнистих виробів з роздачою / А.М. Потятиник, В.М. Горностай, С.Ф. Сабол // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 66–70. – Бібліогр.: 7 назв.– ISSN 2519-2671

Анализ влияния параметров процесса холодного обратного выдавливания с раздачей / А.Н. Потятынук, В.Н. Горностай, С.Ф. Сабол // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 66–70. – Бібліогр.: 7 назв.– ISSN 2519-2671

Analysis of the influence of the parameters of the cold reverse extrusion process with distribution / A.M. Potiatynuk, V.M. Hornostai, S.F. Sabol // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 66–70. – Bibl.: 7. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Потятиник Андрій Миколайович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського, тел.: (095) 3671932, e-mail: Qdx@ukr.net

Потятиник Андрей Николаевич – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» имени Игоря Сикорского, тел.: (095) 3671932, e-mail: Qdx@ukr.net

Potiatynuk Andrii Mykolaiovych – fellow, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute" them. Igor Sikorsky, tel.: (095) 3671932, e-mail: Qdx@ukr.net

Горностай Вадим Миколайович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені 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» имени 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» імені 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» имени 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

УДК 621.771.01

P. Я. РОМАНЮК, К. О. ЛЕВЧУК, Ю. А. ГАСИЛО

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ЕПЮР КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ТОНКОЛИСТОВІЙ ПРОКАТЦІ

Проаналізовано відомі в теорії прокатки моделі тертя в осередку деформації Кулона та Зібеля. Як показують дослідження, вони дають суттєві похибки при прогнозуванні розподілу контактних напружень при тонколистовій прокатці. Запропонована модель тертя, яка відрізняється лінійним переходом від максимальних значень напружень тертя до мінімальних. Ця модель дозволяє з достатньою точністю отримати теоретичний розподіл по осередку деформації нормальних контактних напружень та напружень тертя і визначити середнє нормальнє контактне напруження при гарячій та холодній тонколистовій прокатці.

Ключові слова: модель тертя, епюра, контактні напруження, осередок деформації, кут нейтрального перетину, тонколистова прокатка.

Проанализированы известные в теории прокатки модели трения в очаге деформации Кулона и Зибеля. Как показывают исследования, они дают существенные погрешности при прогнозировании распределения контактных напряжений при тонколистовой прокатке. Предложена модель трения, которая отличается линейным переходом от максимальных значений напряжений трения к минимальным. Эта модель позволяет с достаточной точностью получить теоретическое распределение по очагу деформации нормальных контактных напряжений и напряжений трения и определить среднее нормальное контактное напряжение при горячей и холодной тонколистовой прокатке.

Ключевые слова: модель трения, эпюра, контактные напряжения, очаг деформации, угол нейтрального сечения, тонколистовая прокатка.

Rollings models of a friction known in the theory in the byte of deformation Kulon and Zibel are analyses. As show explorations, they give essential lapses at forecasting of distribution contact voltages at thin sheet rolling. It leads not to exact definition of an average normal contact voltage, forces, the moment, power of deformation. The sample piece developed in works Vasileva, is grounded on Newton's law, therefore can be applied at cold thin sheet rolling with lubrications. In the given work the sample piece of a friction which differs linear transition from the maximum values of pressure of a friction to the minimum is offered. It consists of 3 sections, on two of which is carried out Kulon's regularity between contact voltages, and the third section is presented by a linear function. Thanks to it the gradient junction from the maximum values pressure of a friction to minimum is carried out, that allows with sufficient accuracy to gain theoretical distribution on the byte of deformation normal contact voltages and pressure of a friction and to define an average normal contact voltage at hot and cold thin sheet rolling in conditions when the differential equation of the Karman is carried out. Usability of a sample piece is proved by comparison of theoretical orthographic epures contact voltages builted with use of given dependence, and experimental, gained by means of known methods in the scientific literature.

Keywords: model of friction, orthographic epure, contact voltages, byte of deformation, angle of neutral cross-section, thin sheet rolling.

Вступ. При моделюванні контактних напружень p_x та t_x в процесі прокатки використовується диференційне рівняння рівноваги Т. Кармана. Для його вирішення необхідно знати залежність між нормальними контактними напруженнями та напруженнями тертя.

З цією метою в [1, 2] наведено кулонівська та зібелівська моделі тертя, а також формули за якими можна побудувати розподіл контактних напружень

по довжині зони контакту, використовуючи ці залежності.

Однак, як показують різні дослідження, зокрема, приведені в [3], отримані епюри кількісно не відповідають експериментальним, а є завищеними. Це пояснюється утворенням піку на графіку p_x , оскільки напруження t_x різко змінюють знак в нейтральному перетині осередку деформації γ (рис. 1).

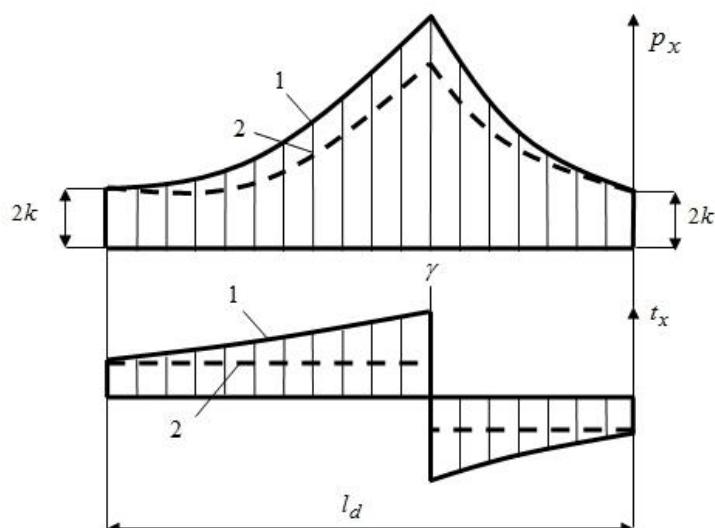


Рис. 1 – Епюри розподілу контактних напружень при моделях тертя: 1 – Кулона та 2 – Зібеля

В роботах [3, 4] запропонована модель тертя, яка є наближеною до закону Ньютона, тому може застосовуватися при холодній тонколистовій прокатці зі змащенням. Як показують дослідження, наведені в цих роботах, застосування цієї моделі дає достовірні дані з розподілу контактних напружень та визначення енергосилових параметрів деформації.

В дослідженнях [5, 6] розроблена нова залежність між контактними напруженнями, яка може використовуватися у випадках тонколистової прокатки (гарячої та холодної), коли справедливе рівняння Т. Кармана.

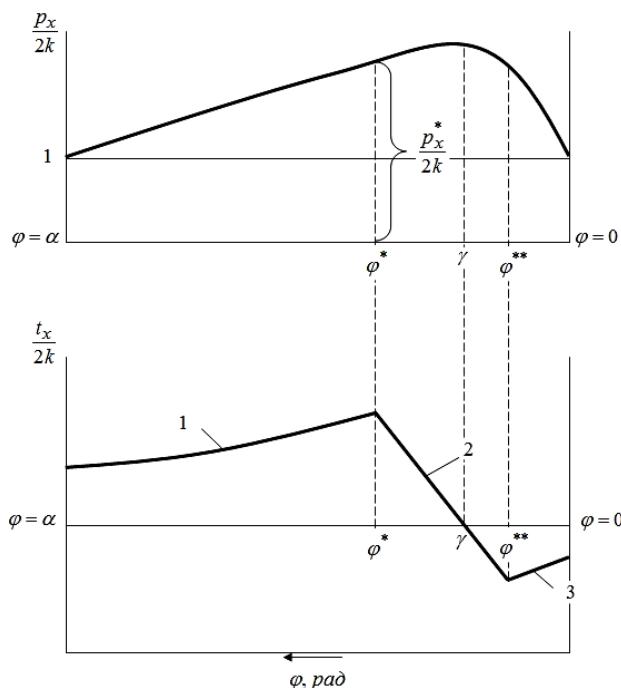


Рис. 2 – Модель тертя з урахуванням лінійного переходу від максимальних значень напружень тертя до мінімальних

де f_y – коефіцієнт тертя в зонах ковзання осередку деформації;

φ^* – кут, що відповідає перетину переходу від моделі $\frac{t_x}{2k} = f_y \frac{P_x}{2k}$, яка діє в зоні відставання, до кривої, яка описує зону лінійного переходу або прилипання (1);

$\frac{P_x^*}{2k}$ – безрозмірний тиск в перетині φ^* .

Коефіцієнт тертя f_y попередньо приймається, а потім при ітерації його значення уточнюється.

В загальному випадку запропонована модель тертя має наступний вигляд:

$$\frac{t_x}{2k} = \begin{cases} f_y \frac{P_x}{2k}, & \text{при } \alpha_y > \varphi > \varphi^*; \\ f_y \frac{P_x^*}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}, & \text{при } \varphi^* > \varphi > \varphi^{**}; \\ -f_y \frac{P_x}{2k}, & \text{при } \varphi^{**} > \varphi > 0, \end{cases} \quad (2)$$

де φ^{**} – кут, що відповідає перетину переходу від моделі $\frac{t_x}{2k} = -f_y \frac{P_x}{2k}$, яка діє в зоні випередження, до кривої, яка описує зону прилипання (1).

Вираз (2) дозволяє забезпечити лінійний перехід від позитивних значень напружень тертя до негативних.

Перетини φ^* та φ^{**} обираються ітераційним шляхом за допомогою ЕОМ при виконанні наступних умов:

– величина напружень тертя в безрозмірній формі не повинна перевищувати 0,5, тобто:

$$-0,5 \leq \frac{t_x}{2k} \leq 0,5$$

– середній коефіцієнт тертя, визначений по епюрам контактних напружень за формулою:

$$f_{cp} = \frac{\int_0^{\alpha_y} \frac{t_x}{2k} d\varphi}{\int_0^{\alpha_y} \frac{P_x}{2k} d\varphi}, \quad (3)$$

повинен дорівнювати коефіцієнту тертя f_y , який є в осередку деформації, тобто визначений за допомогою відомих емпіричних формул [1, 2, 3].

Дослідження Я. Д. Василева показують, що при тонколистовій прокатці, коли $\frac{l_d}{h_{cp}} > 3 - 4$, доцільно

використовувати для розрахунку середнього коефіцієнту тертя, наприклад, наступну формулу [3]:

$$f_{cp} = \frac{t_{cp}}{P_{cp}} \frac{\left(\frac{h_\gamma}{h_1} - \frac{h_\gamma}{h_0} \right)}{\left[\left(1 - \frac{h_\gamma}{h_0} \right) \left(1 - \frac{l_{on}}{l} \right) + S \frac{l_{on}}{l} \right]}. \quad (4)$$

Послідовність побудови епюр нормального контактного напруження (рис. 2) наступна:

1. Підставляємо вираз $\frac{t_x}{2k} = \pm f_y \frac{p_x}{2k}$ в диференційне рівняння рівноваги Т. Кармана та, розв'язуючи його методом послідовних наближень Рунге-Кутта для зон відставання та випередження (з урахуванням знаку), отримуємо криві розподілу нормального контактного напруження (зони 1 та 3).

2. Для з'єднання цих зон лінійною функцією точно вирішуємо рівняння Т. Кармана. Підставляючи вираз (1) в рівняння рівноваги, маємо:

$$\frac{dp_x}{2k} = \begin{cases} f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma} \\ 1 - \frac{f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\operatorname{tg} \varphi} \end{cases} \frac{dh_x}{h_x}.$$

Попередньо визначимо dh_x :

$$h_x = h_1 + R\varphi^2;$$

$$dh_x = 2R\varphi d\varphi.$$

Приймаємо $\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$, тоді:

$$\frac{dp_x}{2k} = \begin{cases} f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma} \\ \varphi \end{cases} \frac{dh_x}{h_x}. \quad (5)$$

Проінтегруємо обидві частини виразу (5):

$$\frac{p_x}{2k} = \int \left(1 - \frac{f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\varphi - \gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\varphi} \right) \frac{dh_x}{h_x} d\varphi = \int \frac{dh_x}{h_x} d\varphi -$$

$$- \int \frac{f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\varphi}{\varphi^* - \gamma}}{\varphi} \frac{dh_x}{h_x} d\varphi + \int \frac{f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\gamma}{\varphi^* - \gamma}}{\varphi} \frac{dh_x}{h_x} d\varphi.$$

Отримуємо остаточно:

$$\frac{p_x}{2k} = \ln|h_x| - f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{1}{\varphi^* - \gamma} \ln|h_x| +$$

$$+ 2f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{\gamma}{\varphi^* - \gamma} \frac{1}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \operatorname{arctg} \frac{\varphi}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} + c_1. \quad (6)$$

Постійну c_1 знайдемо з відомої граничної умови в перетині φ^* .

При $\varphi = \varphi^*$, $p_x = p_x^*$ та $h_x = h_x^*$, тоді:

$$c_1 = -\ln|h_x^*| + f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{1}{\varphi^* - \gamma} \ln|h_x^*| - 2f_y \frac{p_x^*}{2k} \times$$

$$\times \frac{\gamma}{\varphi^* - \gamma} \frac{1}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \operatorname{arctg} \frac{\varphi^*}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} + \frac{p_x^*}{2k}.$$

Підставляючи c_1 в (6) остаточно отримуємо:

$$\frac{p_x}{2k} = \ln \left| \frac{h_x}{h_x^*} \right| \left(1 - f_y \frac{p_x^*}{2k} \frac{1}{\varphi^* - \gamma} \right) + 2f_y \frac{p_x^*}{2k} \times$$

$$\times \frac{\gamma}{\varphi^* - \gamma} \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left(\operatorname{arctg} \frac{\varphi}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} - \operatorname{arctg} \frac{\varphi^*}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \right) + \frac{p_x^*}{2k}.$$

Значення кута нейтрального перетину отримуємо з відомої граничної умови в перетині φ^{**} .

При $\varphi = \varphi^{**}$, $p_x = p_x^{**}$ та $h_x = h_x^{**}$, тоді:

$$\varphi^{**} \left(\frac{p_x^{**}}{2k} - \frac{p_x^*}{2k} - \ln \left| \frac{h_x^{**}}{h_x^*} \right| \right) + f_y \frac{p_x^*}{2k} \ln \left| \frac{h_x^{**}}{h_x^*} \right|$$

$$\gamma = \left[\begin{array}{l} 2f_y \frac{p_x^*}{2k} \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left(\operatorname{arctg} \frac{\varphi^{**}}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} - \operatorname{arctg} \frac{\varphi^*}{\sqrt{\frac{h_1}{R}}} \right) + \frac{p_x^{**}}{2k} - \\ - \frac{p_x^*}{2k} - \ln \left| \frac{h_x^{**}}{h_x^*} \right| \end{array} \right].$$

Таким чином, при вихідних умовах h_1 , R , f_y та a_y , задаючи попередньо перетини φ^* та φ^{**} , отримуємо епюри нормального контактного напруження, а потім і напруження тертя, використовуючи вираз (2).

Далі визначаємо значення середнього коефіцієнту тертя по епюрам за формулами (3) або (4). Якщо отриманий коефіцієнт тертя не відповідає необхідному значенню, змінюємо перетини φ^* та φ^{**} .

Використовуючи ЕОМ, побудова епюр контактних напружень за приведеним алгоритмом є нескладною і проводиться, як правило, за 6–10 ітерацій.

Слід зазначити, що урахування натягів (передній та задній) здійснюється підстановкою їх безрозмірних значень в граничні умови при вирішенні диференційного рівняння Т. Кармана:

– в перетині входження в осередок деформації

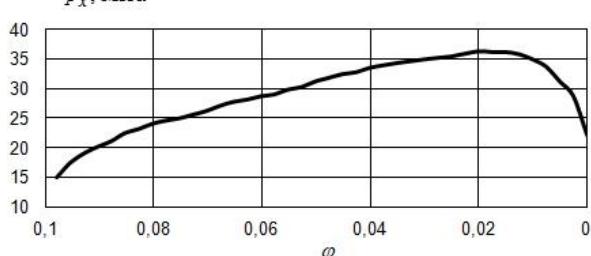
$$\frac{P_x}{2k} = 1 - \frac{q_0}{2k};$$

– в перетині виходу металу з валків

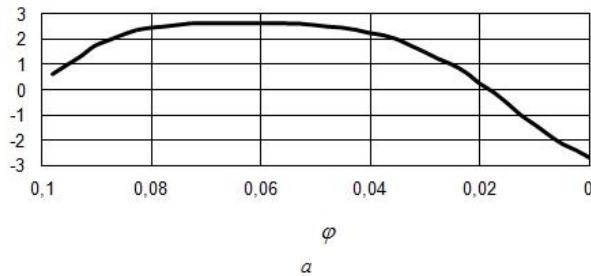
$$\frac{P_x}{2k} = 1 - \frac{q_1}{2k},$$

де $\frac{q_0}{2k}$ та $\frac{q_1}{2k}$ – відповідно питомі задній та передній натяги в безрозмірних значеннях.

p_x, MPa



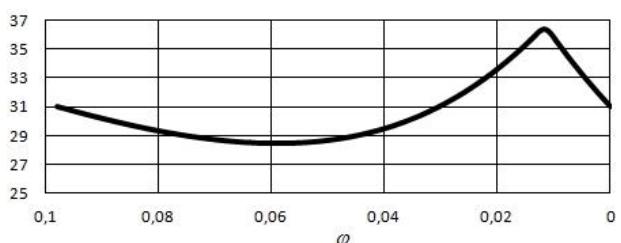
t_x, MPa



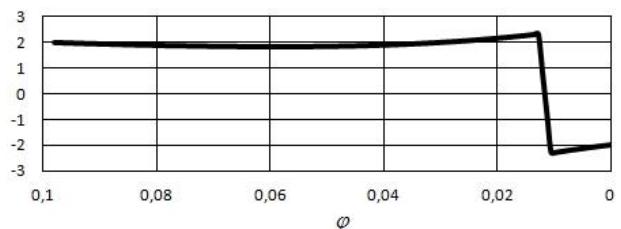
a

Для визначення доцільності використання моделі тертя (2) для прогнозування розподілу контактних напружень, проведемо порівняння експериментальних епюр з теоретичними, побудованими з використанням запропонованої залежності (рис. 3). Умови, за якими були отримані експериментальні епюри контактних напружень, наведено в табл. 1 [7]. В цих дослідах натяги були відсутні.

p_x, MPa



t_x, MPa



b

Рис. 3 – Порівняння епюр контактних напружень: а – експериментальні, б – теоретичні

Таблиця 1 – Умови, за якими були отримані експериментальні епюри контактних напружень

Товщина зразків, мм		Ширина зразків b , мм	Діаметр валків D , мм	Кут захвату α_y , рад	Параметр форми $\frac{l_d}{h_{cp}}$	Середній коефіцієнт тертя в осередку деформації f_{cp}	Матеріал зразків
h_0	h_1						
2	1	50	208	0,098	7	0,064	свинець

З наведених графіків випливає, що якісно вони відрізняються, оскільки при теоретичній побудові приймаються наступні припущення: усереднюється напруження текучості по дузі контактту та на границях осередку деформації нормальне контактне напруження дорівнює примусовій межі текучості (при деформації без натягів). Але кількісно теоретичний розподіл p_x та t_x є задовільним і різниця при визначенні середнього нормального контактного напруження у порівнянні з експериментальною епюрою не перевищує 5 %.

Аналогічні висновки можна зробити і при моделюванні контактних напружень з натягами [6].

Тому запропонована модель може використовуватися для прогнозування розподілу контактних напружень при гарячій та холодній тонколистовій прокатці.

Висновки. Відомі в теорії моделі тертя Кулона і Зібеля дають значні похибки при моделюванні розподілу контактних напружень при холодній тонколистовій прокатці та визначенні середнього

нормальногоконтактного напруження. Це пояснюється утворенням піку на графіку контактних нормальних напружень, оскільки напруження тертя різко змінюють знак в нейтральному перетині осередку деформації.

Запропонована модель тертя, яка усуває ці недоліки. Вона складається з 3 ділянок, на двох з яких виконується кулонівська закономірність між контактними напруженнями, а третя ділянка описується лінійною функцією, завдяки чому здійснюється плавний переход від максимальних значень напружень тертя до мінімальних, що дозволяє більш точно (з похибкою не більше 5–10 %) визначити значення середнього нормального контактного напруження при гарячій та холодній тонколистовій прокатці в умовах, коли справедливе рівняння Т. Кармана.

Список літератури

- Грудев А. П. Теория прокатки / А. П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.

2. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
3. Василев Я. Д. Теорія поздовжньої прокатки / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
4. Василев Я. Д. Определение контактных напряжений при тонколистовой прокатке / Я. Д. Василев, Д. В. Коноводов, А. В. Дементиенко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: тематич. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2002. – С. 277–283.
5. Максименко О. П. Оценка устойчивости процесса прокатки по эпюрам контактных напряжений / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – №2. – С. 110–114.
6. Романюк Р. Я. Підвищення поздовжньої сталості процесу тонколистової прокатки на основі розвитку теоретичних положень щодо контактної взаємодії полоси з валками: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.05 “Процеси та машини обробки тиском” / Р. Я. Романюк. – Дніпропетровськ, 2012. – 19 с.
7. Клименко П. Л. Контактные напряжения при прокатке с технологической смазкой / П. Л. Клименко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 8. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ: “Системні технології”. – 2005. – С. 44–49.

Bibliography (transliterated)

1. Grudev A. P. Teoriya prokatki [The rolling theory]. Moscow, Metallurgija Publ., 1988. 240 p.
2. Celikov A. I., Nikitin G. S., Rokotjan S. E. Teoriya prodol'noj prokatki [The lengthwise rolling theory]. Moscow, Metallurgija Publ., 1980. 320 p.
3. Vasylev Ya. D., Minayev O. A. Teoriya pozdovzhn'oyi prokatky [The lengthwise rolling theory]. Donetsk, UNITEKH Publ., 2009. 488 p.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Прогнозування теоретичних епюр контактних напружень при тонколистовій прокатці / Р. Я. Романюк, К. О. Левчук, Ю. А. Гасило // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів_у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 71–76. – Бібліогр.: 7 назв.– ISSN 2519-2671

Прогнозирование теоретических эпюр контактных напряжений при тонколистовой прокатке / Р. Я. Романюк, Е. А. Левчук, Ю. А. Гасило // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів_у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 71–76. – Бібліогр.: 7 назв.– ISSN 2519-2671

Forecasting of theoretical orthographic epures of contact voltages at thin sheet rolling / R. Ja. Romaniuk, K. O. Levchuk, Yu. A. Hasylo // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 71–76. – Bibl.: 7. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Романюк Роман Ярославович – кандидат технічних наук, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності; тел.: (067) 100-66-64; e-mail: r22roma@i.ua

Романюк Роман Ярославович – кандидат технических наук, Днепровский государственный технический университет, доцент кафедры охраны труда и безопасности жизнедеятельности; тел.: (067) 100-66-64; e-mail: r22roma@i.ua

Romaniuk Roman Yaroslavovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Dniprovsk State Technical University, Associate Professor at the Department of Labour safeties and safeties of ability to live; tel.: (067) 100-66-64; e-mail: r22roma@i.ua

Левчук Катерина Олександрівна – кандидат економічних наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності; тел.: (067) 100-66-64

Левчук Екатерина Александровна – кандидат экономических наук, доцент, Днепровский государственный технический университет, доцент кафедры охраны труда и безопасности жизнедеятельности; тел.: (067) 100-66-64

4. Vasilev Ya. D., Konovodov D. V., Dementienko A. V. Opredelenie kontaktnyh naprijazhenij pri tonkolistovoj prokatke [Definition of contact voltages at sheet rolling]. Udoskonalenna protsesiv i obladnannya obrobky tiskom v metalurhiyi i mashynobuduvanni: tematych. zb. nauk. prats' [Improvement of processes and equipment for pressure treatment in metallurgy and machine-building: topics. save sciences works]. Kramatorsk, DDMA Publ., 2002, pp. 277–283.
5. Maksimenko O. P., Romanjuk R. Ja. Ocena ustojchivosti processa prokatki po jepjuram kontaktnyh naprijazhenij [Estimation of stability process of rolling on orthographic epures of contact voltages]. Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'. 2010, no. 2, pp. 110–114.
6. Romanyuk R. Ya. Pidvyshchennya pozdovzhn'oyi stalosti protsesu tonkolistovoyi prokatky na osnovi rozvytku teoretychnykh polozhen' shchodo kontaktnoyi vzayemodiyi polosy z valkamy: avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.03.05 “Protsesys ta mashyny obrobky tiskom” [Enhancement of sheet gauge rolling process longitudinal steadiness based on development of theoretical representations of sheet and roll interaction. Abstract of a thesis candidate eng. sci. diss. (Ph. D.) 05.03.05 “Processes and pressure treatment cars”]. Dnipropetrov's'k, 2012. 19 p.
7. Klimentko P. L. Kontaktne naprijazhenija pri prokatke s tehnologicheskoy smazkoj [Contact voltages at rolling with technological lubrication]. Suchasni problemy metalurhiyi. Naukovi visti. Plastychna deformatsiya metaliv. [Modern problems of metallurgy. Scientific messages. A flowage of metals]. Dnipropetrov's'k, Systemni tekhnolohiyi Publ., 2005, t. 8, pp. 44–49.

Національний університет «Харківський політехнічний інститут»
Національный технический университет «Харьковский политехнический институт»
National Technical University of Ukraine «Kharkiv Polytechnic Institute»

Національний університет «Харківський політехнічний інститут»
Національный технический университет «Харьковский политехнический институт»
National Technical University of Ukraine «Kharkiv Polytechnic Institute»

Levchuk Kateryna Oleksandrivna – Candidate of Economic Sciences (Ph. D.), Docent, Dniprovske State Technical University, Associate Professor at the Department of Labour safeties and safeties of ability to live; tel.: (067) 100-66-64

Гасило Юрій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри технології та устаткування зварювання; тел.: (097) 508-32-94

Гасило Юрій Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Днепровский государственный технический университет, доцент кафедры технологии и оборудования сварки; тел.: (097) 508-32-94

Hasylo Yuryi Anatolevych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Dniprovske State Technical University, Associate Professor at the Department of technology and the welding equipment; (097) 508-32-94

УДК 621.762.4

Д.В. САВЕЛОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ ВИБРОУПЛОТНЕНИИ ДИСПЕРСНОЙ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ АНИЗОТРОПНОЙ СТРУКТУРЫ В ЖЕСТКОЙ МАТРИЦЕ

Викладена методика проведення експериментальних досліджень лабораторного вібраційного столу для попереднього ущільнення дисперсних порошкових середовищ анізотропної структури у жорсткій матриці. Приведені результати експериментальних досліджень вібростолів, які у робочому режимі здійснюють симетричні коливання і асиметричні коливання в вертикальній площині. На основі методів математичної статистики виконана обробка отриманих експериментальних даних досліджень. Зроблені висновки про відповідність експериментальних результатів досліджень результатам моделювання.

Ключові слова: вібростіл, порошкове середовище, анізотропна структура, ущільнення, моделювання.

Изложена методика проведения экспериментальных исследований лабораторного вибрационного стола для предварительного уплотнения дисперсных порошковых сред анизотропной структуры в жесткой матрице. Приведены результаты экспериментальных исследований вибrostолов, которые в рабочем режиме совершают симметричные колебания и асимметричные колебания в вертикальной плоскости. На основе методов математической статистики выполнена обработка полученных экспериментальных данных исследований. Сделаны выводы о соответствии экспериментальных результатов исследований результатам моделирования.

Ключевые слова: вибростол, порошковая среда, анизотропная структура, уплотнение, моделирование.

It is set on the basis of the conducted literary search, that technology of preliminary compression of dispersible powder-like the masses of anisotropic structure allows considerably to reduce pressure of pressing and promote the closeness of pressing both outage and difficult form. The method of leadthrough of experimental researches of laboratory vibration tables is expounded for the preliminary compression of dispersible powder-like environments of anisotropic structure in a hard matrix. Description of structural features of laboratory vibration tables is given with hard resilient terminators. Resulted results of experimental researches of vibration tables which in an operating condition accomplish symmetric vibrations and asymmetric vibrations in a vertical plane. On the basis of methods of mathematical statistics treatment of got these experimental researches is executed in supposition, that distributing of casual sizes submits the law of normal distribution. Conclusions are done about accordance of experimental results of researches to the design results. The got experimental results allowed to specify the basic parameters of oscillation equipment, modes and time of dynamic pressure on powders of refractory metals. Results of experimental researches can be the creations of oscillation press, provided with vibration table with hard resilient terminators for the previous compression of metallic powders fixed in basis.

Keywords: vibration table, powder-like environment, anisotropic structure, compression, design.

Введение. Применение вибрации при засыпке и утряске дисперсных порошковых масс в пресс-форме, при производстве заготовок периодического профиля из никелевых и титановых сплавов [1] позволяет значительно снизить давление прессования и повысить равноплотность получаемых прессовок как простой, так и сложной формы. При этом технология предварительного уплотнения вибрацией обязательно должна учитывать гранулометрический состав порошка и форму частиц. Во избежание разрыхления порошковой массы в процессе прессования на вибрационном оборудовании, снижения времени общего цикла прессования целесообразно применять технологию предварительного вибрационного уплотнения с последующим статическим или вибрационным пригружением. После достижения достаточной плотности порошковые заготовки можно подвергать горячему изостатическому прессованию.

Одним из наиболее эффективных способов предварительного уплотнения металлических порошков в пресс-форме является применение вибростола с жесткой матрицей [2, 3].

Анализ предыдущих исследований. В работах [4, 5] выполнено моделирование процессов предварительного уплотнения дисперсных порошковых сред на вибростоле. В результате проведенных исследований разработаны математические модели динамического поведения вибростола с жесткой матрицей при предварительном уплотнении дисперсной порошковой среды анизотропной структуры с одновременным статическим пригружением, а также при

предварительном уплотнении на вибростоле с жестко-упругими ограничителями.

Цель работы. Проверка работоспособности оборудования, сравнение полученных данных экспериментальных исследований с теоретическими результатами.

Материал и результаты исследований. Для проведения экспериментальных исследований был спроектирован и изготовлен опытный образец вибростола, схема и общий вид которого приведены на рис. 1, 2.

Техническая характеристика опытного образца вибростола приведена в табл. 1.

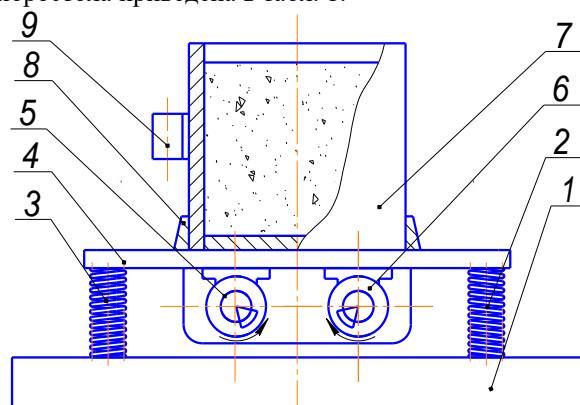


Рис. 1 – Схема опытного образца вибростола с жесткой матрицей для предварительного уплотнения порошковых смесей:
1 – станина; 2 и 3 – упругие опоры; 4 – вибростол; 5 и 6 – вибраторы; 7 – жесткая матрица с порошковой массой; 8 – направляющие; 9 – датчик вибрации ДВ-1В

При проведении экспериментов исследовалось динамическое поведение вибростола 4 в контакте с порошковой смесью 8, находящейся в закрепленной на нем жесткой матрице 7 (рис. 2).



Рис. 2 – Общий вид опытного вибростола для исследования процесса предварительного уплотнения порошковых масс

Таблица 1 – Техническая характеристика опытного образца вибростола с жесткой матрицей

№ п\п	Наименование показателей	Значение показателей
1.	Габаритные размеры лабораторного вибростола: – высота, м; – ширина, м; – длина, м	0,46 0,4 0,58
2.	Параметры вибростола: – масса вибростола вместе с пресс-формой и электромеханическими вибраторами, кг; – общая жесткость упругих амортизаторов под вибростолом в вертикальном направлении, Н/м (кг/см); – угловая частота вынужденных колебаний, рад/с; – амплитуда возмущающей силы, Н; – амплитуда колебаний вибростола (на холостом ходу) в вертикальном направлении, м	56 235440 (240) 293 10000 $2,85 \cdot 10^{-3}$
3.	Внутренние размеры матрицы: – диаметр, м; – высота (максимальная), м	0,05 0,2

В экспериментальных исследованиях использовались порошки тугоплавких металлов и их соединения: титан Ti , карбид титана TiC и борид титана TiB_2 с процентным содержанием поверхностно-активных веществ (ПАВ). В качестве ПАВ использовалась олеиновая кислота в количестве 0,15 % от объема частиц порошковой массы.

При проведении экспериментальных исследований определялись и записывались следующие показатели: физико-механические характеристики дисперсной порошковой массы;

закономерность движения вибростола с жесткой матрицей; нарастание плотности порошковой массы в процессе предварительного уплотнения; время прессования.

В процессе предварительного уплотнения происходит изменение реологических характеристик порошкового материала. В экспериментах модуль упругости Юнга, применяемый для описания напряженно-деформированного состояния порошкового материала, определялся по следующей методике. Происходящую при предварительном виброуплотнении деформацию порошковой массы определяли при её поэтапном трехкратном нагружении – разгружении при заданной нагрузке в пределах высоты слоя. После каждого цикла нагружения вибростол останавливали. Известно, что кратковременное прекращение вибровибрации практически не оказывает влияния на закономерности и ход уплотнения. Это позволило установить величину текущей усадки порошкового слоя. Замеры проводились при помощи штангенциркуля ШЦ-1 с точностью $\pm 0,06$ мм. Предельная относительная ошибка измерения высоты не превышала 0,1 %. Эксперименты повторяли три раза, а полученный результат усредняли. По измеренным величинам деформаций, соответствующим заданной нагрузке, для каждого нагружения определяли модуль упругости. За конечный результат определения модуля упругости E принимают среднеарифметическое значение всех нагрузений.

Для определения значений результатов измерения плотности использовались статистические методы в предположении, что распределение случайных величин подчиняется закону нормального распределения.

Выборочное среднее значение плотности дисперсной порошковой массы в соответствии с [5] имеет следующий вид:

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i}{n}, \quad (1)$$

где ρ_i – плотность i -го образца; $n=3$ – количество порошковых засыпок.

Для значений плотности $\rho_1=1290$ кг/м³, $\rho_2=1220$ кг/м³, $\rho_3=1240$ кг/м³ величина $\bar{\rho}$ после подстановки в формулу (1) будет равна:

$$\bar{\rho} = \frac{1290 + 1220 + 1240}{3} = 1250 \text{ кг/м}^3.$$

Среднее квадратическое отклонение определяется по формуле [5]:

$$S = \sqrt{\frac{(1290 - 1250)^2 + (1220 - 1250)^2 + (1240 - 1250)^2}{3-1}} = 36,05 \text{ кг/м}^3.$$

Для доверительной вероятности 0,95 и числа измерений $n=3$ критерий Стьюдента $t = 4,3$ [5]. В этом случае, ширина доверительного интервала определяется формулой [5]:

$$\Delta x = 4,3 \cdot \frac{36,05}{\sqrt{3}} = 89,6 \text{ кг/м}^3.$$

Результат вычислений говорит о том, что для принятой доверительной вероятности 0,95 погрешность определения плотности не превышает 8,9 %.

Параметры вибрирования колебательной системы измерялись при помощи комплекта виброметрической аппаратуры, в состав которой входит модуль Е14-440 для построения многоканальных измерительных систем ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации в составе персонального IBM – совместимого компьютера.

На рис. 3 и 4 показано изменение амплитуды колебаний опытного образца вибростола в вертикальной плоскости в зависимости от плотности ρ порошковой смеси и толщины уплотняемого слоя H и время t предварительного уплотнения.

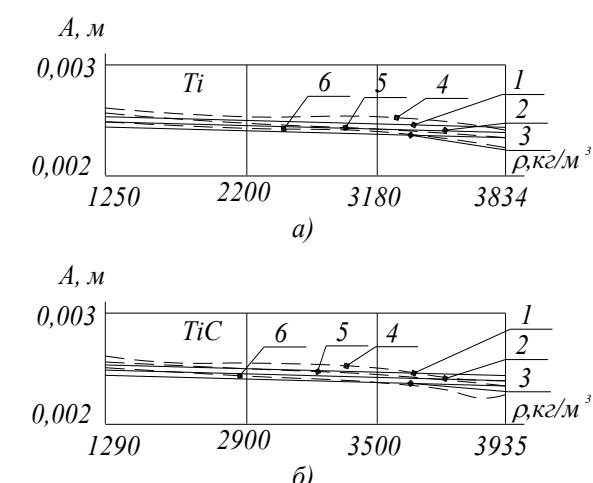


Рис. 3 – Изменение амплитуды колебаний вибростола с жесткой матрицей A в зависимости от плотности ρ порошковой смеси и толщины уплотняемого слоя H при предварительном уплотнении в матрице диаметром 50 мм: 1 – при $H = 0,1$ м; 2 – при $H = 0,15$ м; 3 – при $H = 0,2$ м, 1–3 – теоретические кривые; 4–6 – экспериментальные кривые

Из представленных графических результатов видно, что максимальные расхождения теоретических и экспериментальных данных в определении времени t динамического давления на порошковый материал наблюдается при прессовании порошков титана, борида и карбида титана, величина которых не превышают 2-4% при различных значениях высот уплотняемых слоев. С увеличением толщины уплотняемого слоя порошковой смеси увеличивается время уплотнения.

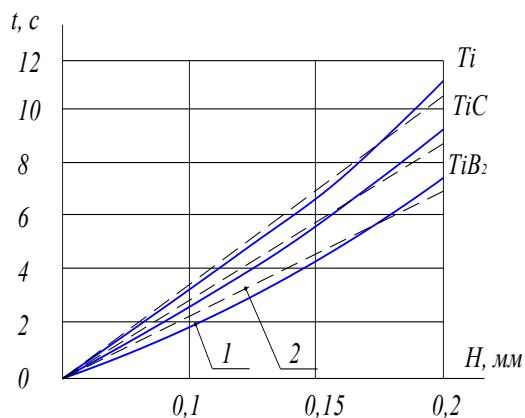


Рис. 4 – Изменение времени t динамического давления вертикальной вибрацией при предварительном уплотнении на вибростоле с жесткой матрицей, в зависимости от толщины слоя порошковой массы H :

- 1 – теоретические зависимости;
- 2 – экспериментальные зависимости

При проведении экспериментальных исследований процесса предварительного уплотнения было отмечено, что с увеличением длительности предварительного уплотнения порошковых смесей в жестких пресс-формах более 7-8 с наблюдалось значительное разрыхление слоев порошковой смеси сначала в центральной части, затем в пристенной части жесткой матрицы, а затем и по всему объему и переход её в рыхлое состояние. Поэтому предварительное уплотнение необходимо производить в течение первых 5-7 с.

Полученные результаты экспериментальных исследований волновых процессов, происходящих при предварительном уплотнении дисперсной порошковой среды анизотропной структуры на вибростоле в жесткой матрице, позволили перейти к экспериментальным исследованиям процесса предварительного уплотнения на вибростоле с жестко-упругими ограничителями.

Для проведения экспериментальных исследований использовался опытный образец вибростола с жестко-упругими ограничителями (ЖУО), общий вид которого представлен на рис. 5.



Рис. 5 – Общий вид опытного образца вибростола с жестко-упругими ограничителями

Конструктивно представленный опытный образец вибростола отличается от вибростола, представленного на рис. 2, наличием двух ЖУО жесткостью 235440 Н/м, расположенных между нижней поверхностью вибростола и основанием.

В экспериментах использовалась смесь порошка титана Ti с ПАВ.

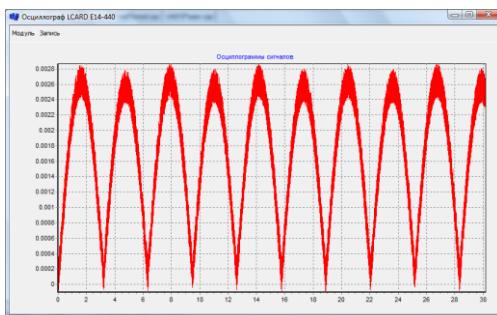


Рис. 6 – Осциллографма экспериментальной кривой закономерности перемещения вибростола при работе с ЖУО в зависимости от угловой координаты ωt

На рис. 6 показана осциллографма экспериментальной кривой закономерности движения вибростола с ЖУО в зависимости от угловой координаты ωt . Осциллограммы сняты для значения плотности порошковой смеси $\rho = 1020 \text{ кг}/\text{м}^3$. График закономерности перемещения вибростола выполнен с квантованием по уровню.

Использование ЖУО позволило на 14–16 % снизить время вибропрессования по сравнению с традиционными способами уплотнения, а расхождение между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 8–10 %.

Выводы. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о том, что предложенные модели достаточно точно описывают закономерности динамического поведения вибростола для предварительного уплотнения дисперсных порошковых сред анизотропной структуры.

Список литературы

1. Gorbatyuk, S.M., Shapoval, A.A., Mos'pan, D.V., & Dragobetskii V.V. Production of Periodic Bars by Vibrational Drawing // Steel in Translation, 2016, Vol. 46, No. 7, pp. 474–478. © Allerton Press, Inc. DOI: 10.3103/S096709121607007X
2. Kiparisov S. S. Poroshkovaja metallurgija / S. S. Kiparisov, G.A. Libenson. – Moscow, Metallurgija, 1980. – 496 p.
3. Jam V. M. Vlijanie haraktera vzaimodejstvija sloja sypuchego materiala s jelementami ustanovki na jeffektivnost' processa vibroudarnogo uplotnenija / Jam V. M., «Fiz. i him. obrab. materialov», 1974, No 3, P. 103–109.
4. Savelov D.V. Issledovaniya dinamiki processa pressovaniya metallicheskogo poroshka na vibrostole s «zhestkoj» matricej i odnovremennym staticeskim prigruzheniem / Savelov D.V. // Visnik Nacional'nogo tehnichnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vypusk: Innovacijni tehnologiji ta obladannja dla obrabki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgij. – Harkiv: NTU «HPI» – 2014. – No 44 (1087) 2014. – С. 150–156.
5. Savelov D.V. Исследование особенностей взаимодействия элементов динамической системы «вибростол – металлический порошок – пригружающий пулансон» при вибрационном формовании [Электронный ресурс] / Д.В. Савелов // Науковий вісник Донбаської державної машинобудівної академії, – 2013. – № 1 (11E). С. 25–30. – Режим доступу до журн.: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№1\(11E\)_2013/nomer_1\(11E\)_2013.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№1(11E)_2013/nomer_1(11E)_2013.html).
6. ГОСТ 27.503-81. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Методы оценки показателей надежности.

Bibliography (transliterated)

1. Gorbatyuk, S.M., Shapoval, A.A., Mos'pan, D.V., & Dragobetskii V.V. Production of Periodic Bars by Vibrational Drawing // Steel in Translation, 2016, Vol. 46, No. 7, pp. 474–478. © Allerton Press, Inc. DOI: 10.3103/S096709121607007X
2. Kiparisov S. S. Poroshkovaja metallurgija / S. S. Kiparisov, G.A. Libenson. – Moscow, Metallurgija, 1980. – 496 p.
3. Jam V. M. Vlijanie haraktera vzaimodejstvija sloja sypuchego materiala s jelementami ustanovki na jeffektivnost' processa vibroudarnogo uplotnenija / Jam V. M., «Fiz. i him. obrab. materialov», 1974, No 3, P. 103–109.
4. Savelov D.V. Issledovaniya dinamiki processa pressovaniya metallicheskogo poroshka na vibrostole s «zhestkoj» matricej i odnovremennym staticeskim prigruzheniem / Savelov D.V. // Visnik Nacional'nogo tehnichnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vypusk: Innovacijni tehnologiji ta obladannja dla obrabki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgij. – Harkiv: NTU «HPI» – 2014. – No 44 (1087) 2014. – С. 150–156.
5. Savelov D.V. Issledovanie osobennostej vzaimodejstvija jelementov dinamicheskoy sistemy «vibrostol – metallicheskiy poroshok – prigruzhajushhij puanson» pri vibracionnom formovanii [Jelektronnyj resurs] / D.V. Savelov // Naukovij visnik Donbas'koj derzhavnoj mashinobudivnoj akademii, – 2013. – № 1 (11E). – Rezhim dostupu do zhurn.: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№1\(11E\)_2013/nomer_1\(11E\)_2013.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№1(11E)_2013/nomer_1(11E)_2013.html).
6. GOST 27.503-81. Nadezhnost' v tehnike. Sistema sbora i obrabotki informacii. Metody ocenki pokazatelej nadezhnosti.

Поступила (received) 14.11.2017

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions / Bibliographic descriptions

Экспериментальные исследования волновых процессов при предварительном виброуплотнении дисперсной порошковой смеси анизотропной структуры в жесткой матрице / Д. В. Савелов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів_у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 77–81. – Біблиогр.: 6 назв.– ISSN 2519-2671

Експериментальні дослідження хвилевих процесів при попередньому віброушільненні дисперсної порошкової суміші анізотропної структури у жорсткій матриці / Д. В. Савелов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів_у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 77–81. – Біблиогр.: 6 назв.– ISSN 2519-2671

Experimental researches of wave processes at the preliminary oscillation compression of dispersible powder-like mixture of anisotropic structure in a hard matrix / D. V. Savelov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 77–81. – Bibl.: 6. – ISSN 2519-2671

Bідомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Савелов Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри технології машинобудування; тел.: (05366) 3-11-00; e-mail: savelov@vizit-net.com.

Савелов Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; доцент кафедры технологии машиностроения; тел.: (05366) 3-11-00; e-mail: savelov@vizit-net.com

Savelov Dmitry Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Associate professor of department of technology of engineer; tel.: (05366) 3-11-00; e-mail: savelov@vizit-net.com

УДК 621.793.6: 621.785.5

Б.П. СЕРЕДА, І.В. ПАЛЕХОВА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРОЧНЕНИЯ ЖЕЛЕЗО- УГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ ТИТАНОМ, ХРОМОМ И БОРОМ В УСЛОВИЯХ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Рассмотрена газотранспортная СВС-технология нанесения титановых покрытий, легированных бором и хромом. Показаны результаты исследований их структуры и свойств. С применением методов математического моделирования разработаны оптимальные составы СВС-смесей для нанесения износостойких покрытий на деталях машин в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Проведены исследования износостойкости полученных слоев, на углеродистых сталях. Метод СВС обеспечил получение на углеродистых сталях качественных покрытий на основе титана при снижении материальных и энергетических затрат. Проведено моделирование по поиску оптимальных порошковых СВС-смесей для получения износостойких защитных титановых покрытий на сталях 45 и У8 с использованием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Исследованы структуры защитных слоев и их износостойкость в условиях трения скольжения. Титаноборированные и титанохромированные стали с СВС-покрытиями обладают улучшенными показателями износостойкости (в 6,0–6,4 и 1,8–2,0 раза, соответственно) по сравнению с образцами без покрытия. Химико-термическую обработку осуществляли в реакторе открытого типа ($P=10^5$ Па) в рабочем интервале температур 900–1100°C. Продолжительность изотермической выдержки варьировалась от 30 до 60 минут.

Ключевые слова: химические газотранспортные реакции, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, титановые покрытия, тепловое самовоспламенение, математическое моделирование, износостойкость.

Розглянуто газотранспортну СВС-технологію нанесення титанових покріттів, легованих бором і хромом. Показані результати досліджень їх структури і властивостей. Із застосуванням методів математичного моделювання розроблено оптимальні склади СВС-сумішей для нанесення зносостійких покріттів на деталях машин в умовах самопоширюваного високотемпературного синтезу. Проведено дослідження зносостійкості отриманих шарів, на вуглецевих сталях. Метод СВС забезпечив отримання на вуглецевих сталях якісних покріттів на основі титану при зниженні матеріальних та енергетичних витрат. Проведено моделювання з пошуку оптимальних порошкових СВС-сумішей для отримання зносостійких захисних титанових покріттів на сталях 45 і У8 з використанням технології самопоширюваного високотемпературного синтезу. Досліджено структури захисних шарів і їх зносостійкість в умовах тертя ковзання. Титаноборовані і титанохромовані стали з СВС-покріттями мають поліпшенні показниками зносостійкості (в 6,0–6,4 і 1,8–2,0 рази, відповідно) в порівнянні із зразками без покриття. Хіміко-термічну обробку здійснювали в реакторі відкритого типу ($P=105$ Па) в робочому інтервалі температур 900–1100°C. Тривалість ізотермічної витримки варіювалася від 30 до 60 хвилин.

Ключові слова: хімічні газотранспортні реакції, високотемпературний само поширеній синтез, титанові покріття, теплове самозапалення, математичне моделювання, зносостійкість.

The gas-transported SHS-technology of titanium coatings doped with boron and chromium is considered. The results of studies of their structure and properties are shown. Using the methods of mathematical modeling, optimal compositions of SHS mixtures for the application of wear-resistant coatings on machine parts in conditions of self-propagating high-temperature synthesis have been developed. Studies of the wear resistance of the obtained layers on carbon steels have been carried out. The SHS method ensured the production of high-quality titanium-based coatings on carbon steels while reducing material and energy costs. Modeling has been carried out to find the optimum powder SHS-mixtures for the production of wear-resistant protective titanium coatings on 45 and U8 steels using the technology of self-propagating high-temperature synthesis. The structures of the protective layers and their wear resistance under conditions of sliding friction are investigated. Titanium-buffered and titanium-chromated steel with SHS-coatings have improved wear resistance (in 6.0-6.4 and 1.8-2.0 times, respectively) as compared with uncoated samples. Chemical-thermal treatment was carried out in an open-type reactor ($P = 105$ Pa) in the operating temperature range of 900-1100°C. The duration of isothermal exposure varied from 30 to 60 minutes.

Keywords: chemical gas-transport reactions, self-propagating high temperature synthesis, titanic coverings, thermal spontaneous combustion, mathematical design, wearproffnes.

Введение. В сложных условиях эксплуатации деталей машин и инструмента большое значение имеют физико-механические свойства их поверхностного слоя, его твердость и износостойкость. В связи с этим широкое применение получают различные методы модифицирования поверхности изделий. Для поверхностного упрочнения изделий из конструкционных и легированных сталей большое распространение получили методы создания различных функциональных покрытий. Способы получения защитных покрытий на металлических изделиях различаются технологией нанесения покрытия и основной целью их создания является хорошая адгезия с подложкой, а также получение сплошного, беспористого и стойкого в данной среде защитного слоя. В настоящее время основными способами нанесения защитного покрытия являются: гальваническое высаживание при электролизе, газотермическое напыление или металлизация,

термодиффузионное насыщение в порошке, погружение в расплавленный металл, плакирование.

По типу соединения защитного слоя с подложкой различают адгезионные и диффузионные металлические покрытия. Одним из наиболее распространенных методов поверхностного упрочнения сталей является химико-термическая обработка (ХТО), которая заключается в одновременном воздействии на поверхности температурных градиентов и веществ, химически реагирующих с металлом изделия [1]. Среди таких процессов важное место занимают технологии насыщения поверхностного слоя сталей титаном, хромом и бором. Однако следует отметить, что данная технология имеет ряд существенных недостатков, к которым относятся энергозатратность, высокая продолжительность процессов обработки и в отдельных случаях невозможность получения покрытий с высоким содержанием нескольких насыщающих элементов в поверхностном слое [2–3]. Технология формирования износостойких покрытий

в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в значительной степени лишена указанных недостатков и позволяет получать покрытия при ограниченном или минимальном времени их формирования [4–10]. СВС – высокоинтенсивное экзотермическое взаимодействие химических элементов в конденсированной фазе, способное к самопроизвольному распространению в виде волны горения [11–14].

Целью данной работы являлось теоретическое и экспериментальное исследование физико-химических процессов, лежащих в основе получения комплексных титановых покрытий на углеродистых сталях в режиме теплового самовоспламенения с применением принципа газотранспортных химических реакций [15], поиск оптимальных порошковых СВС-смесей, позволяющих формировать многокомпонентные защитные слои на сталях 45 и У8, изучение влияния природы насыщающих реагентов, состава реакционных смесей, химического состава сталей и параметров процесса насыщения (времени, температуры) на состав, структуру и свойства легированных титановых покрытий, полученных методом СВС, а также исследование их износостойкости в условиях трения скольжения.

Материалы и методика исследования. Объектом исследования были выбраны образцы из сталей массового назначения (сталь 45, У8). В качестве реакционных агентов использовали порошки дисперсностью 150–350 мкм.

1. Cr₂O₃ – оксид хрома (III) – источник хрома в покрытии;
2. Al₂O₃ – оксид алюминия (III) – инертная добавка;
3. Al – алюминий марки АСД1- восстановитель оксидов, источник алюминия в покрытии;
4. B – бор технический – источник бора в покрытии;
5. B₄C – карбид бора – источник бора в покрытии;
6. Ti – титан технической чистоты – источник титана в покрытии;
7. J₂ – йод металлический – активатор процесса насыщения;
8. NH₄Cl – хлористый аммоний – активатор процесса насыщения.

Химико-термическую обработку осуществляли в реакторе открытого типа ($P=10^5$ Па) в рабочем интервале температур 900–1100°C. Продолжительность изотермической выдержки варьировалась от 30 до 60 минут.

Подготовка поверхности образцов состояла в последовательных шлифовке, полировке и обезжиривания в ацетоне. Инициирование процесса теплового самовоспламенения осуществлялось путем предварительного нагрева в печи сопротивления до температуры начала экзотермической реакции (t^*). Температуру СВС-смесей контролировали хромель-алюмелевыми и вольфрам-рениевыми термопарами в

защитном чехле, помещенными в объем реакционной шихты, и подключенными к потенциометру серии КСП. Толщину упрочненных слоев покрытий исследовали на световом микроскопе "Neophot-21" при увеличении до $\times 250$, $\times 500$. Микроструктуру выявляли методом травления в 3% спиртовом растворе пикриновой кислоты (ТУ 6-09-08-317-80). Для выявления границ зерен феррита использовали 4% спиртовый раствор азотной кислоты [16]. Для анализа фазового состава покрытий использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН-3М. Исследование элементного состава покрытий проводили методом микрорентгеноспектрального анализа с применением микроанализатора JEOL "Superprobe-733". Испытания на износостойкость проводились при трении о нежестко закрепленные частицы (ГОСТ 23.208-79) на установке СМТ-1. Для создания абразивно-масляной среды в масляную ванну машины трения добавляли абразивный материал, приготовленный из кварцевого песка (ГОСТ 2138-84). Для расчета равновесного состава продуктов системы был использованы прикладные пакеты программ "АСТРА.4" и REcalc [15]. При разработке составов порошковых реакционных СВС-смесей, обеспечивающих высокую износостойкость, использовали методы математического планирования эксперимента с реализацией полного факторного анализа по плану 2³ и дробного факторного эксперимента 2⁴⁻¹.

Выбор оптимального состава смеси для проведения СВС – процессов в условиях теплового самовоспламенения проводили на основании результатов исследований тепловой картины СВС процесса и физико-механических свойств защитных покрытий, в частности износостойкость, ΔG (испытание на машине терния СМТ-1, $\tau_{исп.} = 5$ ч) [6–10, 18, 21–22].

Параметры оптимизации:

Y_1 – показатели износостойкости, $\Delta G - \tau_{исп.} = 5$ ч, для системы легированной бором В;

Y_2 – показатели износостойкости, $\Delta G - \tau_{исп.} = 5$ ч, для системы легированной кремнием Сг;

В качестве независимых переменных были выбраны: содержание в СВС-смеси хромистой составляющей, титана, бора и алюминия. В качестве исходного материала была выбрана сталь 45. Активатором процесса являются J₂ и NH₄F для всех систем.

Расчетные уровни интервалов варьирования, характер их изменений и схемы кодирования представлены в табл. 1 и 2. Введение в смесь больше 5% газотранспортного агента приводит к сильному растрескиванию поверхности образца, менее 1% не активизирует протекание всех газотранспортных реакций.

Для получения стопроцентного состава порошковых СВС-смесей в качестве конечного продукта использовался Al₂O₃.

Таблиця 1 – Исследуемые факторы для системы титан-бор-алюминий

Характеристика	Факторы			
	В составе Al %, мас.	В составе В %, мас.	В составе XC %, мас.	В составе Ti %, мас.
Код	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
Основной уровень	10	10	20	20
Интервал варьирования	5	5	5	5
Нижний уровень	5	5	15	15
Верхний уровень	15	15	25	25

Таблица 2 – Исследуемые факторы для системы титан-хром-алюминий

Характеристика	Факторы		
	В составе Al %, мас.	В составе Ti %, мас.	В составе XC %, мас.
Код	X ₁	X ₂	X ₃
Основной уровень	10	20	20
Интервал варьирования	5	5	5
Нижний уровень	5	15	15
Верхний уровень	15	25	25

Результатом эксперимента должна стать математическая зависимость между исследуемыми характеристиками в виде функциональной связи:

$$y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \quad (1)$$

В результате регрессивного анализа, были получены ряд уравнений, показывающие зависимость износостойкости защитных покрытий от режима теплового самовоспламенения и содержания легирующих элементов.

Численные значения коэффициентов регрессии и их значимость, определенные с учетом различия дисперсий для каждой функции отклика, а также проверка значимости по критерию Стьюдента и оценка адекватности модели по критерию Фишера.

Для оценки адекватности уравнений был проведен расчет по полученным уравнениям регрессии для оптимального режима теплового самовоспламенения. Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными исследованиями.

Результаты исследований и их обсуждение.

В общем случае, с точки зрения теплофизики формирование покрытий в режиме теплового самовоспламенения условно можно разделить на пять последовательных стадий: инертный прогрев реакционной смеси до температуры воспламенения, тепловое самовоспламенение, прогрев изделий, изотермическая выдержка, охлаждение.

Продолжительность стадий и какие именно процессы будут протекать на каждой стадии в значительной степени зависят от составов реакционных смесей и их тепловых характеристик. Таким образом, регулируя в реакционных СВС-смесях концентрацию активных экзотермических составляющих и газотранспортных агентов, можно значительно снизить температуру начала самовоспламенения (t_*) и увеличить температуру максимального разогрева (t_m).

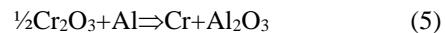
Экспериментально было установлено, что при нанесении покрытий системы Ti-B максимальное

содержание в СВС-шихте газотранспортных агентов не должно превышать: для NH_4Cl – 5%, а для I_2 – 4%.

На стадии инертного прогрева происходит испарение и распад используемых газотранспортных носителей по реакциям:



Вторая стадия (теплового самовоспламенения) характеризуется протеканием основных экзотермических реакций:



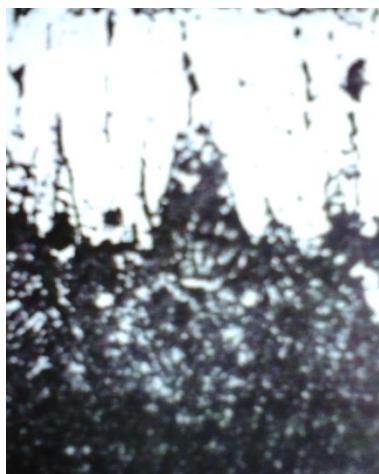
Температура в реакторе резко повышается до максимальной температуры процесса t_m . Происходит образование газообразных соединений и перенос основных насыщающих элементов к подложке. Для осуществления химического транспорта необходимо наличие градиента температур между насыщающими элементами и подложкой.

Термодинамический анализ равновесного состава продуктов системы свидетельствует о присутствии в исследуемом диапазоне температур хлоридов или йодидов (в зависимости от выбранного газотранспортного агента) алюминия, хрома титана, бора с образованием летучих галогенидов. Если энергия активации взаимодействия элементов шихты с носителем меньше, чем энергия активации основного восстановительного процесса, то реакции образования летучих галогенидов будут протекать квазистационарно по мере протекания основной реакции. Если температура самовоспламенения ниже температуры начала интенсивного образования летучего галогенида, то для этого случая образование галогенидов происходит лишь на стадии нестационарного роста температуры. На

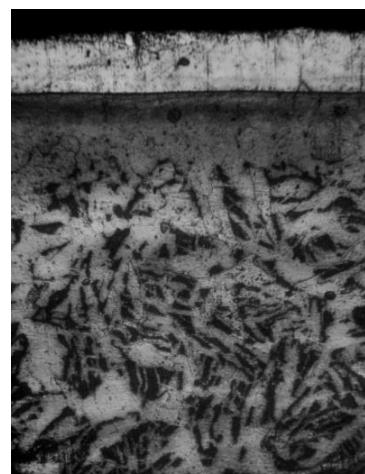
поверхности внесенных в порошковую систему стальных изделий на этой стадии возможно протекание гетерогенных реакций обмена с железом подложки.

На 3 стадии (прогрева изделий) происходит выравнивание температуры по объему реактора. Температура процесса снижается до расчетной температуры насыщения. Начинается формирование покрытия. При этом активные атомы титана, бора, хрома и алюминия диффундируют в металлическую подложку образуя твердый раствор этих элементов в железе, также возможно образование легированных боридных фаз.

На 4 стадии (изотермической выдержки) происходит формирование постоянного диффузационного потока активных атомов насыщающих элементов. Наблюдается диффузационный рост покрытия. Увеличение продолжительности изотермической выдержки приводит к росту толщины слоя, который подчиняется параболическому закону. На этой стадии протекают процессы, аналогичные насыщению в стационарных условиях.



а



б

Рис. 1 – Микроструктури многокомпонентних титанових покрystий, получених в режиме теплового самовоспламенення СВС-систем, легированих: а – бором; б – хромом, при температуре насыщення – $t_{\text{н}} = 950^{\circ}\text{C}$
и времени выдержки – $\tau_{\text{в}} = 30$ мин, материал подложки – сталь 45, $\times 250$, $\times 150$

По результатам металлографического и рентгеноструктурного анализов [19] установлено, что при формировании титано-хромированных покрытий на углеродистых сталях образуются карбиды сложного состава $(\text{Ti}, \text{Cr})\text{C}$. В данных условиях насыщения, хром обладает большим коэффициентом диффузии, чем титан, а также благодаря меньшему атомному радиусу легче образует твердые растворы внедрения. В связи с этим, проникает в поверхность подложки на большую глубину, чем титан. В зависимости от содержания углерода в стали в приповерхностной зоне возможно образование карбидов $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ или $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$, легированных титаном, ниже располагается зона твердого раствора Cr в а-железе. Из-за особенностей СВС-процесса также происходит микролегирование фаз алюминием.

На 5 стадии (охлаждения) формирование диффузионных слоев происходит менее интенсивно, это объясняется уменьшением коэффициентов диффузии насыщающих элементов. Максимальная скорость роста покрытий наблюдается на начальных этапах СВС-процесса. Это связано с тем, что аустенит, образующийся при резком повышении температуры на стадии теплового самовоспламенения характеризуется высокой плотностью дислокаций по краям зерен и разветвленностью межзеренных границ. В связи с этим его диффузионная восприимчивость увеличивается.

На толщину формируемых покрытий влияют состав шихты, продолжительность и температура изотермической выдержки. Фазовый состав зон в значительной степени зависит от особенностей диффузионного механизма легирующих элементов и химического состава подложки.

На рис. 1 приведены микроструктуры титановых покрытий, легированных бором и хромом, полученных в режиме теплового самовоспламенения в оптимальных смесях.

При совместном насыщении сталей титаном и бором диффузионный механизм формирования покрытия имеет некоторые особенности: захват активных атомов бора и титана поверхностью металла происходит в разных местах и конкуренции между ними нет [20]. Скорость диффузии титана в сталях ускоряется вследствие встречной диффузии углерода с образованием карбидов и карбоборидов различного состава. Этот процесс повышает твердость подборидной зоны.

В местах совместной диффузии бора и титана преобладает диффузионный механизм образования покрытия. Диффундирующие элементы образуют фазы внедрения или замещения с образованием на углеродистых сталях легированные титаном, хромом и алюминием карбидные, боридные и карбоборидные фазы. Диффундирующий титан замещает железо в

карбідах и карбоборидах желеza, повышая их устойчивость.

В поверхностном слое образцов из углеродистых сталей образуются соединения титана с бором, представляющие собой продукт СВС-взаимодействия. Полученные титано-боридные покрытия характеризуются игольчатым строением, однако при совместном насыщении с титаном, игольчатая структура менее выражена, иглы имеют более округлую форму, карбидные образования приобретают глобуллярную форму, таким образом повышая пластичность покрытия, вследствие чего снижается величина разрушающих напряжений.

Образовавшиеся покрытия имеют многофазное строение и состоит из TiB_2 , легированных соединений

$(Fe, Cr, Al)B$, $(Fe, Cr, Al)_2B$, $(Fe, Cr, Al)Ti_2$ и переходной зоны твердого раствора B, Ti, Cr, Al в желеze.

Результаты испытания стальных образцов на износ в условиях трения скольжения на машине трения СМТ-1 представлены на рис. 2. Графики свидетельствуют о значительном увеличении износостойкости обработанных образцов. При испытаниях в условиях трения скольжения, лучшей износостойкостью обладают титановые покрытия, легированные бором (их износостойкость в 6,0–6,4 раза выше, чем у контрольных образцов без покрытия), износостойкость титано-хромированных покрытий по сравнению с контрольными образцами выше в 1,8–2,0 раза.

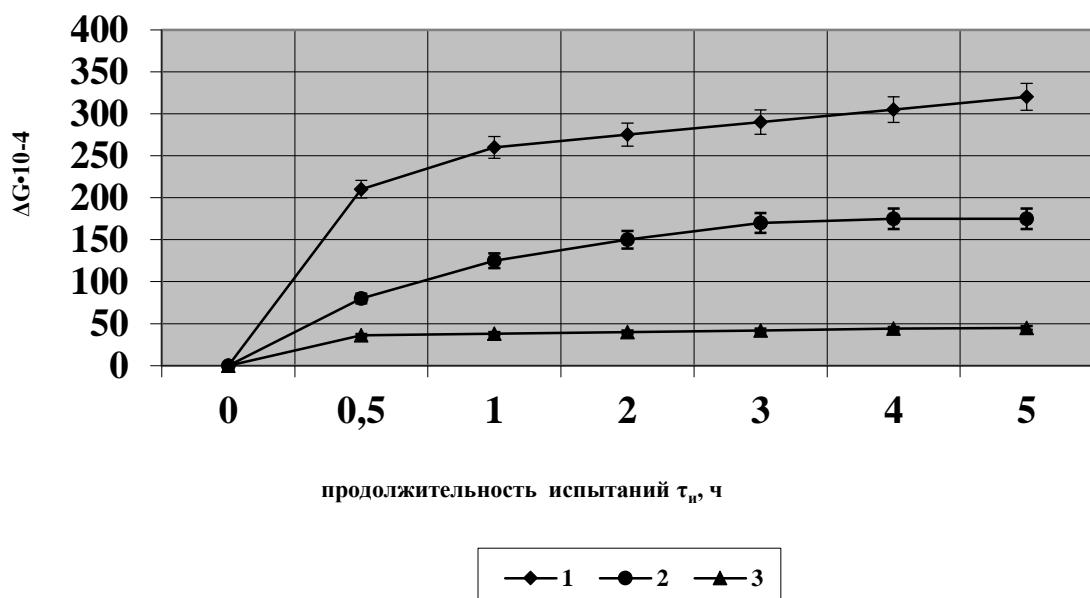


Рис. 2 – Зависимость износостойкости различных пар трения от продолжительности испытания на машине трения СМТ-1 и вида покрытия на стали 45 в присутствии абразивно-масляной прослойки
1 – контрольный образец сталь 45 без покрытия; 2 – образец с титанохромированным покрытием на стали 45, полученным методом СВС при продолжительности изотермической выдержки 60 мин.; 3 – образец с титаноборированым покрытием на стали 45, полученным методом СВС при продолжительности изотермической выдержки 60 мин.

Выводы.

1. Метод СВС позволяет получать на углеродистых сталях качественные покрытия на основе титана при снижении материальных и энергетических затрат.

2. Проведено моделирование по поиску оптимальных порошковых СВС-смесей для получения износостойких защитных титановых покрытий на сталях 45 и У8 с использованием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Исследованы структуры защитных слоев и их износостойкость в условиях трения скольжения.

3. Титаноборированные и титанохромированные стали с СВС-покрытиями обладают улучшенными показателями износостойкости (в 6,0–6,4 и 1,8–2,0 раза соответственно) по сравнению с образцами без покрытия.

Список литературы.

1. Трефилова Н. В. Анализ современных методов нанесения защитных покрытий// Современные научно-исследовательские технологии. – 2014. – № 10. – С. 67–67.
2. Ворошинин Л. Г., Ляхович Л. С. Борирование стали. – М.: Металлургия, 1978 – 239 с.
3. Ворошинин Л. Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. – Минск, 1981 – 237 с.
4. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов. / Ю. М. Лахтин // – М.: Металлургия, 1993. – 448 с.
5. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / под ред. Ляховича Л. С.- М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
6. Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов. Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
7. Филионенко Б. А. Комплексные диффузионные покрытия. М.: Машиностроение. 1981 – 137 с.
8. Лабунец В. Ф., Ворошинин Л. Г., Киндрячук М. Ф. Износостойкость боридных покрытий. – Киев: Изд. «Техника», 1989. – 204 с.
9. Шатинский В. Ф., Нестеренко А. И. Защитные диффузионные покрытия. – Киев: Наукова думка, 1988 – 272 с.
10. Лахтин Ю. М. Поверхностное упрочнение сталей и сплавов / МИТОМ, 1988, № 11. – с. 11–14.

11. Мержанов А. Г. Процессы горения и синтез материалов. – Черноголовка: ИСМАН, 1998. – 512 с.
12. Grigor'ev Y. M., Merzhanov A.G. SHS coatings // Int. J. of SHS, 1992, v.1, №4. – p. 600–639.
13. Коган Я. Д., Середа Б. П., Штессель Э. А. Высокоинтенсивный способ получения покрытий в условиях СВС / Металловедение и термическая обработка металлов, 1991, №6. – с.39–40.
14. Середа Б. П. Современное состояние и перспективы развития технологий нанесения защитных покрытий в условиях СВС / Б. П. Середа, И. В. Кругляк, В. И. Иванов // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2004. – №1. – С. 88–93.
15. Шефер Г. Химические транспортные реакции. – М.: Мир, 1964. – 189 с.
16. Беккерт М., Клемм Х. Справочник по металлографическому травлению. – М.: Металлургия, 1979. – 336 с.
17. Синярев Г. Б., Ватолин Н. А., Трусов Б. Г., Моисеев Р. К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. – М.: Наука, 1982. – 263 с.
18. Середа Б. П., Иванов В. И., Грицај В. П., Усенко Ю. И. Получение борированных покрытий в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Изв. ВУЗов. Черная Металлургия, 1998, №9 – с. 57–61.
19. Бялик О. М., Кондратюк С. С., Кіндрадчук М. В., Черненко В. С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія: Підручник. – К.: ВПІ ВПК «Політехника», 2006. – 328 с.
20. Гур'єв А. М., Іванов С. Г. Механизм диффузии бора, хрома и титана при одновременном многокомпонентном поверхностном лигировании железоуглеродистых сплавов // Упрочняющие технологии и покрытия, 2011 – №1. – С. 56–61.
21. Sereda B., Sereda D. Obtaining of Boride Coatings under SHS Conditions for Car Parts. Material science and technology – 2016. Salt Lake City, Utah USA, 2016 – 1339 p. – P.945–948.
22. Sereda B., Sereda D. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy. Material science and technology 2016. Conference and Exhibition. Salt Lake City, Utah USA, 2012 – 1550p. – P.931–934.

Bibliography (transliterated)

1. Trefilova N. V. Analiz sovremennoy metodov nanesenija zashhitnyh pokrytij // Sovremennye naukoemkie tehnologii. – 2014. – No 10. – P. 67–67
2. Voroshnin L. G., Ljahovich L. S. Borirovanie stali. – Moscow: Metallurgija, 1978. – 239 p.
3. Voroshnin L. G. Borirovanie promyshlennyh stalej i chugunov. – Minsk, 1981. – 237 p.
4. Lahtin Ju. M. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov. / Ju. M. Lahtin // – Moscow: Metallurgija, 1993. – 448 p.
5. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov i splavov: Spravochnik / pod red. Ljahovicha L. S. – Moscow: Metallurgija, 1981. – 424 p.
6. Lahtin Ju. M., Arzamasov B. N. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov. Uchebnoe posobie dlja vuzov. – Moscow: Metallurgija, 1985. – 256 p.
7. Filonenko B. A. Kompleksnye diffuzionnye pokrytija. – Moscow: Mashinostroenie. 1981 – 137 p.
8. Labunec V. F., Voroshnin L. G., Kindrachuk M. F. Iznosostojkost' boridnyh pokrytij. – Kiev: Izd. «Tekhnika», 1989. – 204 p.
9. Shatinskij V. F., Nesterenko A. I. Zashhitnye diffuzionnye pokrytija. – Kiev: Naukova dumka, 1988 – 272 p.
10. Lahtin Ju. M. Poverhnostnoe uprochnenie stalej i splavov / MiTOM, 1988. – No 11. – P. 11–14.
11. Merzhanov A. G. Processy gorenija i sintez materialov. Chernogolovka: ISMAN, 1998. – 512 p.
12. Grigor'ev Y. M., Merzhanov A. G. SHS coatings // Int. J. of SHS, 1992, v.1, No 4. – P. 600–639.
13. Kogan Ja. D., Sereda B. P., Shtessel' Je. A. Vysokointensivnyj sposob poluchenija pokrytij v uslovijah SVS // Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov, 1991. – No 6. – P.39–40.
14. Sereda B. P. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitiya tehnologij nanesenija zashhitnyh pokrytij v uslovijah SVS / B. P. Sereda, I. V. Krugljak, V. I. Ivanov // Novye materialy i tehnologii v metallurgii i mashinostroenii. – 2004. – No 1. – P. 88–93.
15. Shefer G. Himicheskie transportnye reakcii. – Moscow: Mir, 1964. – 189 p.
16. Bekkert M., Klemm H. Spravochnik po metallograficheskemu travleniju. – Moscow: Metallurgija, 1979. – 336 p.
17. Sinjarev G. B., Vatolin N. A., Trusov B. G., Moiseev R. K. Primenenie JeVM dlja termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh processov. – Moscow: Nauka, 1982. – 263 p.
18. Sereda B. P., Ivanov V. I., Gricaj V. P., Usenko Ju. I. Poluchenie borirovannyh pokrytij v uslovijah samorasprostranjajushhegosja vysokotemperaturnogo sinteza // Izv. VUZov. Chernaja Metallurgija, 1998. – No 9. – P. 57–61.
19. Bjalik O. M., Kondratjuk S. E., Kindrachuk M. V., Chernenko V. S. Strukturnij analiz metaliv. Metalografija. Fraktografija: Pidruchnik. – Kiev:VPI VPK «Politehnika», 2006. – 328 p.
20. Gur'ev A. M., Ivanov S. G. Mechanism diffuzii bora, hroma i titana pri odnovremennom mnogokomponentnom poverhnostnom ligirovaniyu zhelezouglерodistih splavov // Uprochnjajushchie tehnologii i pokrytija, 2011. – No 1. – P. 56–61.
21. Sereda B., Sereda D. Obtaining of Boride Coatings under SHS Conditions for Car Parts. Material science and technology – 2016. Salt Lake City, Utah USA, 2016 – 1339 p. – P. 945–948.
22. Sereda B., Sereda D. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy. Material science and technology 2016. Conference and Exhibition. Salt Lake City, Utah USA, 2012 – 1550p. – P.931–934.

Поступила (received) 28.11.2017

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions / Bibliographic descriptions

Математическое моделирование процессов упрочнения железо-углеродистых сплавов титаном, хромом и бором в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Б.П. Середа, И.В. Палехова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів_у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 82–88. – Біблиogr.: 22 назви.– ISSN 2519-2671

Математичне моделювання процесів зміцнення залізо-вуглецевих сплавів титаном, хромом і бором в умовах само поширеного високотемпературного синтезу / Б.П. Середа, І.В. Палехова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів_у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 82–88. – Біблиogr.: 22 назви.– ISSN 2519-2671

Mathematical design of processes of work-hardening of iron -carbon alloys by a titan, chrome and boron in the conditions of self-propagating high temperature synthesis / B. P. Sereda, I. V. Palehova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 82–88. – Bibl.: 22. – ISSN 2519-2671

Bідомости про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Середа Борис Петрович – доктор технічних наук, професор кафедри «Автомобілі та автомобільне господарство», Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, 066 294 89 43, seredabp1@gmail.com

Середа Борис Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство», Днепровский государственный технический университет, г. Каменское, 066 294 89 43, seredabp1@gmail.com

Sereda Boris Petrovich – doctor of engineering sciences, professor of department "Cars and motor-car economy", Dnepr state technical university, 066 294 89 43, seredabp1@gmail.com

Палехова Ірина Володимирівна – Дніпровський державний технічний університет, інженер, м Кам'янське, 066 294 89 43, seredabp1@gmail.com

Палехова Ирина Владимировна – Днепровский государственный технический университет, инженер, г. Каменское, 066 294 89 43, seredabp1@gmail.com

Palekhova Irina Vladimirovna – Dneprovsky State Technical University, engineer, Kamenskoye, 066 294 89 43, seredabp1@gmail.com

ЗМІСТ

Алтухов А.В., Тарасов А.Ф., Поднебесный Н.Н., Винников А.О.	
Разработка интегрированной САПР технологических процессов	
интенсивного пластического деформирования на примере реверсивного сдвига.....	5
Грибков Э.П., Гаврильченко Е.Ю.	
Автоматизированное проектирование технологических настроек листоправильной машины.....	11
Грициук А.В., Марченко А.П., Музыкин Ю.Д., Татьков В.В., Николенко А.Г., Чистяков А.Н., Кречман В.А.	
Термостатирование смазочных жидкостей для промасливания холодного проката.....	17
Зубко Ю.Ю., Бобуха С., Фролов Я.В.	
Исследование влияния геометрии пояска матрицы и форкамеры	
на неравномерность деформации металла при МНРКУП.....	25
Кленов О.С., Дитиненко С.А., Крюк А.Г., Новиков Ф.В.	
Формирование шероховатости поверхности деталей машин в процессе шлифования.....	31
Кухар В. В., Аніщенко О. С., Нагібєда М. М.	
Методика розрахунку напружено-деформованого стану листової заготовки	
при гнутті з врахуванням зміщення матеріалу.....	36
Лотоус В. В., Драгобецкий В. В., Симонова А. А., Наумова Е. А., Юрко А.А., Сокур Н. И.	
Новый метод упрочнения деталей горного оборудования.....	42
Пиманов В. В., Савченко А. В., Русаков Р. Л.	
Аналіз процеса ротаціонного випрессування пальників на оправки парними роликами.....	47
Плеснєцов С.Ю., Юданова Н.М.	
Методи і засоби ультразвукового контролю металовиробів трубчатого, стрижневого та	
пластинчатого типу (огляд ч. 2).....	52
Плеснєцов Ю. А., Христиченко А.Н., Христиченко Е.Н.	
Аналіз можливості виготовлення профілів змінного сечення формовкою в валках.....	59
Потятиник А.М., Горностай В.М., Сабол С.Ф.	
Аналіз впливу параметрів процесу холодного зворотнього видалювання	
порожнистих виробів з роздачою.....	66
Романюк Р. Я., Левчук К. О., Гасило Ю. А.	
Прогнозування теоретичних епюр контактних напружень при тонколистовій прокатці.....	71
Савелов Д.В.	
Экспериментальные исследования волновых процессов при предварительном виброуплотнении	
дисперсной порошковой смеси анизотропной структуры в жесткой матрице.....	77
Середа Б.П., Палехова И.В.	
Математическое моделирование процессов упрочнения железо-углеродистых сплавов титаном,	
хромом и бором в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.....	82

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Збірник наукових праць

Серія

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

Випуск 37 (1259) 2017

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

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

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

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ». каф. обробки металів тиском, тел. (057) 707-60-40, 707-69-16, e-mail: omd.conf@gmail.com, kurando@mail.ru

Обл. вид. № 36-17

Підп. до друку 20.11.2017 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. RISO-друк. Гарнітура Таймс.
Ум.друк.арк. 8,42. Обл.-вид. арк. 8,6.

Наклад 100 прим. Зам. № 17. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р..

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

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,
виготовників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2779 від 28.02.2007 р.