

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*

№ 36 (1258) 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. – № 36 (1258) – 91 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. С. 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. Спіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, 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. Плеснецов, 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.; Є. А. Фролов, д-р техн. наук, проф.; В. Хомберг, д-р техн. наук, проф.; В. В. Чигиринський, д-р техн. наук, проф.

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»

Протокол № 8 від 27 жовтня 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 36 (1258) 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 36 (1258) – 91 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. Drahobetsky, 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 8 from October 27, 2017

УДК 621.7.044

Р.Г. АРГАТ, Р.Г. ПУЗЫРЬ, О.Н. ДОЛГИХ

**ОЦЕНКА ПРИЕМОВ, УВЕЛИЧИВАЮЩИХ СТЕПЕНЬ ДЕФОРМАЦИИ
ПРИ ВЫТЯЖКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ БЕЗ СКЛАДКОДЕРЖАТЕЛЯ**

Приводятся результаты исследований, направленных на анализ и оценку эффективности существующих приемов и методов, направленных на увеличение степени деформации цилиндрических заготовок, получаемых вытяжкой без прижима фланца. Показано, что применение простой штамповой оснастки, которой являются штампы без складкодержателя, эффективно в единичном и мелкосерийном производстве. Это существенно сокращает сроки технической подготовки производства и приводит к уменьшению себестоимости деталей. Также приведены наиболее значимые факторы процесса бесприжимной штамповки, которые позволяют управлять степенью деформации, возможностью потери устойчивости в виде возникновения складок и фестонов. Важной особенностью вытяжки без прижима фланца заготовки является необходимость применения материала с различными механическими характеристиками на разных участках заготовки.

Ключевые слова: вытяжка; заготовка; прижим; механические характеристики; анизотропия.

Наводяться результати досліджень, спрямованих на аналіз і оцінку ефективності існуючих різних прийомів і методів, спрямованих на збільшення ступеня деформації циліндричних заготовок, одержуваних витягуванням без притиску фланця. Показано, що застосування простого штампового оснащення, яким є штампи без складкотримача, ефективно в одиничному і дрібносерійному виробництві, що істотно скорочує терміни технічної підготовки виробництва і призводить до зменшення собівартості деталей. Також наведені найбільш значущі фактори процесу непритискного штампування, які дозволяють управляти ступенем деформації, можливістю втрати стійкості у вигляді виникнення складок і фестонів. Важливою особливістю витягування без притиску фланця заготовки є необхідність застосування матеріалу з різними механічними характеристиками на різних ділянках заготовки.

Ключові слова: витягування; заготовка; прижим; механічні характеристики; анизотропія.

The results of studies aimed at analyzing and evaluating the effectiveness of existing various techniques and methods aimed at increasing the degree of deformation of cylindrical blanks obtained by drawing without flange pressing are presented. It is shown that the use of simple die equipment, which are stamps without a storage holder, is effective in single and small-scale production, which significantly shortens the terms of technical preparation of production and leads to a reduction in the cost of parts. Also, the most significant factors in the process of the non-pressure stamping are shown, which allow controlling the degree of deformation, the possibility of loss of stability in the form of creases and festons. An important feature of the hood without pressing the flange of the billet is the need to use a material with different mechanical characteristics at different parts of the billet.

Keywords: extract; blank; clamping; mechanical characteristics; anisotropy.

Введение. Современные мелкосерийные машиностроительные и приборостроительные производства нуждаются в эффективных технологических процессах и технологиях, которые обеспечивают необходимое качество при пониженной себестоимости изделий в условиях ускоренных сроков подготовки производства. Для сборки таких изделий применяют осесимметричные тонкостенные детали, характеризующиеся высокой точностью конструктивных размеров с достаточно малым отношением диаметра к высоте. Для их изготовления применяют методы листовой штамповки: вытяжку, отбортовку, формовку и их комбинирование.

Получение таких деталей в условиях единичного и мелкосерийного производства ограничивается точностью штампуемых деталей, высокими затратами на изготовление технологической оснастки, сроками технической подготовки производства и т. д. Повышение гибкости производства и снижение себестоимости продукции возможно при использовании простой штамповочной оснастки, однако ее применение не всегда обеспечивает необходимую точность деталей и заданную степень деформации.

Цель работы. Целью работы является обобщение и анализ наиболее значимых приемов и методов, расширяющих возможности вытяжки цилиндрических деталей без складкодержателя и

формирование рекомендаций для мелкосерийного и единичного производства.

Изложение основного материала. Возможность использования простой оснастки, например, штампов без прижимного кольца при вытяжке осесимметричных деталей, ограничивается технологическими границами бесприжимной штамповки ($\frac{s}{D}100 \leq 4,5(1-m_1)$ [1]), где s – толщина

заготовки; D – диаметр заготовки; m_1 – коэффициент вытяжки. Приведенная зависимость характеризует начало образования складок лишь в первом приближении, так как не учитывает влияние механических свойств исходного материала, геометрии штампа и других факторов [2].

Однако по утверждению того же автора [1] степень деформации можно увеличить в данном процессе, применяя матрицы конической или криволинейной формы (рис. 1).

Так как фланец заготовки при вытяжке без складкодержателя находится в условиях плоского напряженного состояния по схеме сжатие – растяжение и не контактирует с прижимом, на нем возможно появление складок, если технологические границы, указанные выше, не выдерживаются. Для того, чтобы этого не происходило, необходимо увеличивать растягивающие напряжения и искусственно увеличивать сопротивление деформации металла фланца. Это возможно лишь при

применении металла повышенной прочности и упрочняемости при достаточно высокой пластичности» [11]

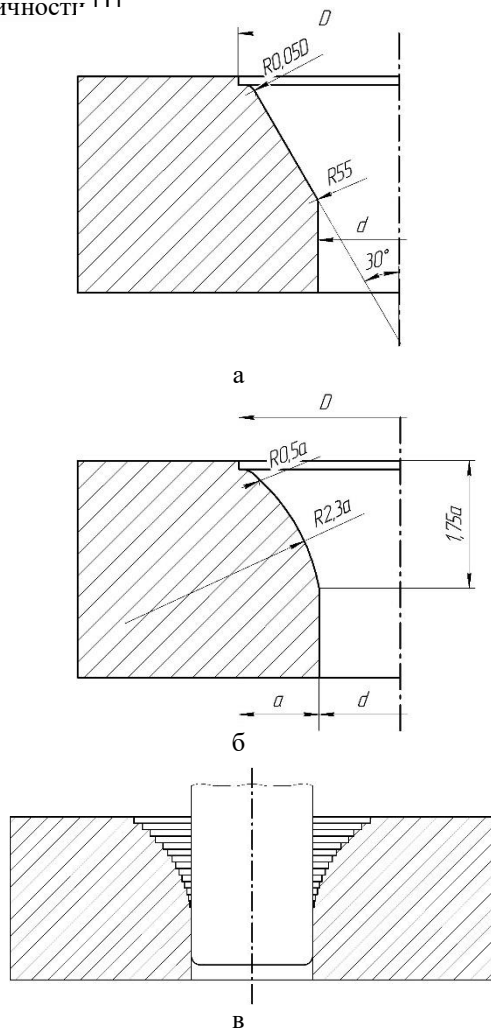


Рис. 1 – Профиль матричного отверстия при вытяжке без прижима (а – конический, б – криволинейный, в – криволинейный с закругленными рисками)

Условие, при котором не происходит образования складок при вытяжке без прижима также можно представить выражением [2]

$$\frac{s}{D} \leq 0,37 \bar{a}_c (\bar{\rho} - m_1) \sqrt{\frac{\varepsilon_{cp} (1 - \psi_p)}{\psi_p}}, \quad (1)$$

где $\bar{a}_c = 1 - \frac{1}{1 - \psi_p} \sqrt{\frac{\sigma_a \left(\frac{\psi_p}{\varepsilon_{cp}}\right)^{1-2\psi_p}}{E}}$; $\bar{\rho}$ – относительное

перемещение края заготовки; ε_{cp} – средняя деформация фланца; ψ_p – равномерное сужение образца при испытаниях на растяжение; σ_a – предел прочности металла; E – модуль упругости.

В этой формуле механические свойства металла характеризуются значениями ψ_p и \bar{a}_c . Чем больше способность металла упрочняться при деформировании, тем больше значение ψ_p и тем меньше предельное отношение s/D при котором начинается образование складок [2].

Большое значение при вытяжке на образование складок и фестонов оказывает показатель плоскостной анизотропии [1, 2, 3]. Если в зоне пластической деформации возникает деформированное состояние, характеризуемое сжато-растянутой схемой, штампуемость металла будет выше при величине среднего значения показателя анизотропии $R > 1$ [3]. При этом листовой металл хорошо сопротивляется утонению в опасной зоне, что позволяет вести вытяжку с высокими степенями деформации. Вместе с тем с увеличением R нарушается осевая симметрия деформирования, возникает окружная разнотолщинность стенок вытягиваемой детали и волнистость ее кромки, что вызывает необходимость увеличения припуска на обрезку неровного края [3].

В процессе втягивания заготовки в отверстие матрицы пластическая деформация в начале охватывает участок, расположенный между пуансоном и матрицей, который растягивается в меридиональном направлении и изгибается по радиусу закругления пуансона и матрицы. Когда предел текучести этого участка превысит предел текучести участка фланца, который граничит с ним, вследствие упрочнения, тогда в зону пластической деформации поступит новый металл недеформированного фланца и весь фланец сместится в радиальном направлении. При этом во фланце вследствие уменьшения его первоначального диаметра возникают тангенциальные напряжения сжатия и наибольшее значение они принимают на торце заготовки, что и приводит к потере устойчивости в виде возникновения гофров. Для того, чтобы исключить возможность гофрообразования, необходимо применять металл повышенной прочности на торце заготовки и в непосредственной близости с ним.

Как показано в работах [4, 5] зона деформированного фланца разбивается на несколько участков в зависимости от величины возникающих в нем напряжений сжатия и растяжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Радиус, разграничивающий области утонения и утолщения, равен $\rho = 0,607R$ [4]. Таким образом, зона фланца с размерами $R \geq 0,607R$ находится под превалирующим действием сжимающих тангенциальных напряжений, которые могут привести к потере устойчивости с образованием в радиальных направлениях волн или складок. Чтобы этого не происходило фланец заготовки должен обладать повышенной прочностью, а та часть заготовки, которая находится между радиальным закруглением матрицы и пуансоном повышенной пластичностью и упрочняемостью.

При вытяжке цилиндрического стакана деформированное состояние фланца характеризуется соотношением $m_c \leq 0$, деформированное состояние стенки – $m_c \geq 0$, где m_c – отношение главных деформаций в плоскости листа. По исследованиям [6], если показатель анизотропии $R > 1$ и при его

дальнейшем увеличении сопротивляемость деформированию стенки стакана будет увеличиваться, а сопротивляемость деформированию фланца – уменьшаться; в результате предельная степень вытяжки будет увеличиваться.

Но при вытяжке без прижима фланца основным фактором, который ограничивает возможности процесса, является потеря устойчивости фланцевой части заготовки, поэтому необходимо увеличивать сопротивляемость фланца деформированию и уменьшать показатель анизотропии, чтобы сохранить устойчивость процесса, так как показано выше с увеличением данного показателя возникает окружная разнотолщинность стенок вытягиваемой детали и волнистость ее кромки. При сравнении одноименных напряжений, возникающих во фланце заготовки при вытяжке ортотропного материала, в различных точках, положение которых характеризуется одинаковым расстоянием от центральной оси заготовки, но различными углами по отношению к направлению прокатки, автором [6] показано, что с увеличением показателей анизотропии R_x и R_y от 0,5 до 2 и показателя упрочнения n от 0,1 до 0,4 величина отношений одноименных напряжений в указанных точках фланца изменяется в значительных пределах и составляет 0,85 – 1,15. Следствием этого отношения является возникновение на вытянутой детали фестонов. То есть, увеличение показателей плоской анизотропии усложняет процесс вытяжки. Это подтверждается также исследованиями [5], где автор заключает, что плоская анизотропия по сравнению с вытяжкой изотропного материала дополнительно нагружает одни участки внутреннего контура фланца заготовки и разгружает другие в целом ухудшая условия вытяжки.

Обсуждение результатов. С одной стороны, материал для вытяжки качественных цилиндрических деталей должен обладать по рекомендациям [1] повышенной пластичностью при пониженной прочности со средним значением коэффициента плоскостной анизотропии $R_{cp}=1,2 \div 1,7$, с другой стороны для предотвращения складко и фестонобразования при вытяжке без прижима необходимы повышенные прочностные характеристики фланцевой части заготовки, а также стремление $R_{cp} \rightarrow 0$, как показано выше. Таким образом, материал заготовки для вытяжки без прижима должен обладать на разных участках рядом противоречивых механических свойств, которые будут отличаться от свойств материала для вытяжки с прижимом. Неодинаковые механические свойства металла можно достичь, применяя различные технологические и термические методы влияния, которые распространяются на вытяжку цилиндрических, овальных и коробчатых деталей: местный отжиг заготовки, нагрев фланца, местная обработка холодом и т. д. [1, 5]. Также пластические свойства металла несколько повышают, применяя перед вытяжкой дрессировку, которая способствует понижению прочностных характеристик и

повышению характеристик пластичности. Это явление, очевидно связано с эффектом Баушингера и исследуется в работах, как отечественных, так и зарубежных авторов [7–11], где для его учета принимаются модели ортотропного материала с трансляционным упрочнением [7, 10, 11], ортотропного материала с изотропным и анизотропным упрочнением [8, 9]. Модели материала позволяют учесть эффекты начальной анизотропии и деформационного упрочнения, происходящие в ходе пластического деформирования. Однако, как показывают исследования выше упомянутых авторов, эффект Баушингера проявляется в области малых пластических деформаций. В продолжении сказанного следует отметить, что после дрессировки материала перед вытяжкой иногда применяют правку на специальных машинах, имеющих несколько пар правильных валков, центры которых смещены друг относительно друга [3]. В процессе правки лист многократно пластически изгибается, что приводит к повышению прочностных характеристик и снижению характеристик пластичности, в результате штампуемость металла ухудшается [3].

Выводы. В результате критического обзора литературных источников, а также анализа и сопоставления имеющихся данных по процессам вытяжки цилиндрических деталей установлено: 1) процесс бесприжимной вытяжки цилиндрических деталей по схеме напряженно-деформированного состояния не отличается от процесса вытяжки с прижимом фланца; 2) вытяжка без складкодержателя не рассматривается как самостоятельный процесс листовой штамповки и применяется в тех случаях, когда необходимо понизить величину растягивающих меридиональных напряжений в опасном сечении или изготавливать детали с малым отношением высоты к диаметру; 3) наличие начальной анизотропии механических свойств металла ухудшает условия бесприжимной вытяжки и приводит к появлению фестонов и складок; 4) для обеспечения устойчивости процесса деформирования необходимо применение материалов с различным комплексом механических свойств на разных участках заготовки; 5) степень деформации можно увеличить, применяя матрицы с различной формой заходной части.

Список литературы

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Шофман Л.А. Элементы теории холодной штамповки / Л.А. Шофман – М.: Оборонгиз, 1952. – 335 с.
3. Аверкиев Ю.А. Технология холодной штамповки / Ю.А. Аверкиев, А.Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
4. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки: [учебник для вузов] / Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1967. – 280 с.
5. Жарков В.А. Разработка и совершенствование процессов вытяжки деталей из листовых заготовок на основе математического моделирования: дис. доктора техн. наук: 05.03.05 / В.А. Жарков. – Москва, 1998. – 507 с.
6. Головлев В.Д. Расчеты процессов листовой штамповки (Устойчивость формообразования тонколистового металла) / В.Д. Головлев. – М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.

7. Бастун В.Н. Прогнозирование эффекта Баушингера в ортотропных материалах с трансляционным упрочнением при знакопеременном одноосном нагружении / В.Н. Бастун // Доповіді НАН України. – 2013. – № 10. – С. 54–64.
 8. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
 9. Огородников В.А. Энергия. Деформации. Разрушение. (задачи автотехнической экспертизы) / В.А. Огородников, В.Б. Киселёв, И.О. Сивак. – Винница: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – 204 с.
 10. Мороз Н.Н. Влияние уменьшения сопротивления материала пластической деформации после предварительно малой деформации противоположного знака при моделировании процесса сложной вытяжки автокузовных деталей / Н.Н. Мороз, А.В. Воронин, В.Л. Хорольский // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2014. – № 63. – С. 97–103.
 11. Barlat F., Aretz H., Yoon J.W., Karabrin M.E., Brem J.C. and Dick R.E. (2005), "Linear transformation based anisotropic yield functions", *Int. J. Plasticity*, 21, pp. 1009–1039.
- Bibliography (transliterated)**
1. Romanovsky V.P. *Spravochnik po holodnoy shtampovke* [Cold stamping guide] / V.P. Romanovsky. – Leningrad: Mechanical engineering, 1979. – 520 p.
 2. Shofman L.A. *Elementyi teorii holodnoy shtampovki* [Elements of the theory of cold stamping] / L.A. Shofman. – Moscow : Oborongiz, 1952. – 335 p.
 3. Averkiev Yu.A. *Tehnologiya holodnoy shtampovki* [Cold stamping technology] / Yu.A. Averkiev, A.Yu. Averkiev – Moscow: Mechanical engineering, 1989. – 304 p.
 4. Popov E.A. *Osnovy teorii listovoy shtampovki* [Fundamentals of the theory of sheet punching]: [textbook for high schools] / E.A. Popov. – Moscow : Mechanical engineering, 1967. – 280 p.
 5. Zharkov V.A. *Razrabotka i sovershenstvovanie protsessov vytyazhki detaley iz listovykh zagotovok na osnove matematicheskogo modelirovaniya* [Development and improvement of the extraction of parts from sheet blanks on the basis of mathematical modeling]: dis. doctor of technical sciences. Sciences: 05.03.05 / V.A. Zharkov. – Moscow, 1998. – 507 p.
 6. Golovlev V.D. *Raschetyi protsessov listovoy shtampovki (Ustoychivost formoobrazovaniya tonkolistovogo metalla)* [Calculations of the processes of sheet punching (Stability of the formation of sheet metal)] / V.D. Golovlev – Moscow: Mechanical engineering, 1974. – 136 p.
 7. Bastun V.N. *Prognozirovaniye efekta Baushingera v ortotropnykh materialah s translyatsionnym uprochneniem pri znakovym nagruzenii* [Prediction of the Bauschinger effect in orthotropic materials with translational hardening under alternating uniaxial loading] / V.N. Bastun // Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. – 2013. – No 10. – pp. 54–64.
 8. Del G.D. *Tehnologicheskaya mehanika* [Technological Mechanics] / G.D. Del – Moscow: Mechanical engineering, 1978. – 174 p.
 9. Ogorodnikov V.A. *Energiya. Deformatsii. Razrusheniye. (zadachi avtotehnicheskoy ekspertizy)* [Energy. Deformations. Destruction. (tasks of autotechnical expertise)] / V.A. Ogorodnikov, V.B. Kiselev, I.O. Sivak. – Vinnitsa: UNIVERSUM – Vinnitsa, 2005. – 204 p.
 10. Moroz N.N. *Vliyaniye umensheniya soprotivleniya materiala plasticheskoy deformatsii posle predvaritelno maloy deformatsii protivopozhnoznogo znaka pri modelirovani protsess slozhnoy vytyazhki avtokuzovnykh detaley* [Influence of the decrease in the resistance of the material of plastic deformation after preliminary small deformation of the opposite sign when modeling the process of complex drawing of autocube parts] / N.N. Moroz, A.V. Voronin, V.L. Khorolsky // Open information and computer integrated technologies. – 2014. – No. 63. – pp. 97–103.
 11. Barlat F., Aretz H., Yoon J.W., Karabrin M.E., Brem J.C. and Dick R.E. (2005), "Linear transformation based anisotropic yield functions", *Int. J. Plasticity*, 21, pp. 1009–1039.

Поступила (received) 14.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оцінка прийомів, що збільшують ступінь деформації при витяжці циліндричних деталей без складкотримача / Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузир, О. М. Долгіх // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 5–9 – Библиогр.: 11 назв.– ISSN 2519-2671

Оценка приемов, увеличивающих степень деформации при вытяжке цилиндрических деталей без складкодержателя / Р. Г. Аргат, Р. Г. Пузырь, О. Н. Долгих // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 5–9 – Библиогр.: 11 назв.– ISSN 2519-2671

Evaluation of techniques that increase the degree of deformation in the extraction of cylindrical parts without a storage holder / Arhat, R., Puzyr, R., Dolgih, O. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 5–9. – Bibl.:11. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Аргат Роман Григорович – старший викладач, кафедра технології машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; м. Кременчук, Україна; e-mail: argat@ua.fm

Аргат Роман Григорьевич – старший преподаватель, кафедра технологии машиностроения, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; г. Кременчуг, Украина; e-mail: argat@ua.fm

Roman Arhat – Senior Lecturer, Chair of Technology of Mechanical Engineering, Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky, Kremenchuk, Ukraine; e-mail: argat@ua.fm.

Пузир Руслан Григорович – доктор технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; м. Кременчук, Україна; e-mail: **puzyruslan@gmail.com**

Пузырь Руслан Григорьевич – доктор технических наук, доцент, кафедра технологии машиностроения, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; г. Кременчуг, Украина; e-mail: **puzyruslan@gmail.com**

Ruslan Puzyr – Doctor of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Chair of Technology of Mechanical Engineering, Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky, Kremenchuk, Ukraine; e-mail: **puzyruslan@gmail.com**.

Долгих Ольга Миколаївна – магістрант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; м. Кременчук, Україна.

Долгих Ольга Николаевна – магістрант, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; г. Кременчуг, Украина.

Olga Dolgih – Graduate student, Kremenchug National University named after Mikhail Ostrogradsky, Kremenchuk, Ukraine.

УДК 621.771.63

*А.В. АХЛЕСТИН, В.Н. ЛЕВЧЕНКО, В.Д. СОТНИКОВ***ПУТИ СОКРАЩЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПЕРЕНАЛАДКИ
ВАЛКОВОГО ИНСТРУМЕНТА ПРОФИЛЕГИБОЧНЫХ СТАНОВ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ**

Відзначено збільшення кількості переналагоджень валкового інструменту при виготовленні тонкостінних гнутих профілів. При цьому ручні операції з розбирання-складання клітей стану і валків, що виконуються при переналагодженні, призводять до значних трудових витрат та витрат часу. Створено нові конструкції такого інструменту, переналагодження якого здійснюється безпосередньо в клітях стану без виконання зазначених операцій. Це дозволяє в 5...8 разів скоротити тривалість переналагодження, додатково збільшується термін служби обладнання і поліпшуються умови праці персоналу. Уніфікація формуючих та дистанційних елементів валків дозволяє на порядок зменшити їх загальну кількість на підприємстві.

Ключові слова: валкове формування, гнутий профіль, валок, профілезгинальний стан, кліть, переналагодження валкового інструменту, дистанційний елемент, уніфікація.

Отмечено увеличение числа переналадок валкового инструмента при изготовлении тонкостенных гнутых профилей. При этом ручные операции по разборке-сборке клетей стана и валков, выполняемые при переналадке, приводят к значительным трудовым и временным затратам. Созданы новые конструкции такого инструмента, переналадка которого осуществляется непосредственно в клетях стана без выполнения указанных операций. Это позволяет в 5...8 раз сократить продолжительность переналадки, дополнительно увеличивается срок службы оборудования и улучшаются условия труда персонала. Унификация формирующих и дистанционных элементов валков позволяет на порядок уменьшить их общее количество на предприятии.

Ключевые слова: валковая формовка, гнутый профиль, валок, профилегибочный стан, клеть, переналадка валкового инструмента, дистанционный элемент, унификация.

It is noted that the production of thin-walled bent profiles is carried out in small batches, and the time taken to manufacture batch is calculated in minutes. The duration of the roll tool adjustment for the production of new profile is measured by hours and even by working shifts. This is due to the implementation of manual operations for dismantling and assembling the working stands of the mill and rolls. The new roll designs are proposed and implemented that allow them to be adjusted in the mill stands directly without performing the above operations. The duration of readjustment is reduced by 5...8 and more times (depending on the complexity of the profile), the life time of the equipment is extended, and there is no need to use handling equipment. The working conditions of the staff are improving. The unification of the forming and distance elements of the rolls makes it possible to reduce their total number by an order of magnitude in enterprise.

Keywords: roll forming, bent profile, roll, roll forming mill, stand, roll tool adjustment, distance element, unification.

Введение. В современных экономических условиях производство гнутых профилей из тонколистового проката с покрытием сосредоточено в основном на предприятиях малого и среднего бизнеса. Структура производства и потребления продукции на них характеризуется следующими признаками: множество (до 500...800) профилей различной формы и размеров на среднем предприятии; различные по количеству партии профилей, начиная с десятков метров и до десятков километров; неодинаковая длина профилей в партии, порезанных «в размер»; полная комплектность различных профилей, необходимых для изготовления определенного изделия (например, металлосайдинг и металлочерепица в сочетании с другими элементами кровли и водостока); жесткие требования к срокам изготовления и качеству профилей, особенно к лицевой поверхности и обрезанным кромкам.

Следует также отметить, что сортамент профилей постоянно расширяется и изменяется. Объемы заказываемых партий продукции часто уменьшаются, а периодичность заказов соответственно растет.

1. Постановка проблемы. Переналадка валкового инструмента профилегибочного стана (станка) для изготовления нового профиля является наиболее длительным и трудоемким процессом подготовки производства, связанным с выполнением ручных операций по разборке-сборке как рабочих

клетей стана, так и самих валков, в которых они установлены, а также по замене и/или перестановке формирующих и дистанционных элементов на валах соответствующих валков. В зависимости от конструкции стана, сложности конфигурации профиля, численности обслуживающего персонала и других факторов указанные непроизводительные потери времени могут измеряться часами и даже рабочими сменами, что существенно снижает производительность оборудования в целом.

Данная проблема существует почти сто лет, то есть со времени начала применения составных валков профилегибочных станов [1, 7], а в последние два десятилетия она значительно обострилась особенно при производстве гнутых тонкостенных профилей. Это объясняется следующим.

Во-первых, за счет резкого увеличения производства рулонного проката с современными защитно-декоративными покрытиями (преимущественно на металлургических предприятиях) соответственно выросли общие объемы изготовления таких профилей.

Во-вторых, в результате уменьшения объемов поставляемых партий профилей заказчикам, в том числе из-за перехода к современным JIT-технологиям (Just-In-Time, то есть точно в срок) [2, с. 7], на профилегибочных станах увеличилось число переналадок для изготовления других профилей. При этом на отдельных станах возникает необходимость в выполнении до 3 и более таких

операцій за смену. Однако практически это неосуществимо, поскольку в большинстве случаев продолжительность переналадки значительно (в разы) превышает время непосредственного изготовления продукции на стане.

Одним из эффективных путей сокращения продолжительности процесса переналадки инструмента профилегибочного стана является унификация его формующих и дистанционных элементов. Инструмент профилегибочных станов – валки. Они состоят из набора дисковых формующих и дистанционных элементов, установленных на валах валков. Очевидно, что для обеспечения производства всей номенклатуры профилей необходимо иметь большое количество указанных элементов, отличающихся друг от друга размерами и формой рабочей поверхности (цилиндрическая, коническая, волнистая и пр.). На их замену при переналадке инструмента требуется много времени. Кроме того, при частой замене элементов валков происходит преждевременный выход из строя деталей оборудования.

Интенсификация производства гнутых тонкостенных профилей с покрытием путем увеличения скорости формовки в стане (в настоящее время до 0,5 м/с), которая в какой-то степени могла бы компенсировать непроизводительные потери времени от переналадки, ограничивается техническими возможностями смежного оборудования, в том числе устройств порезки, упаковки и пр., а также обеспечением сохранности покрытия от повреждения.

Применение же метода интенсивного деформирования [2] при изготовлении профилей не только не способствует повышению производительности профилегибочного оборудования, но и снижает её, так как допустимая скорость формовки в этом случае не превышает 0,33 м/с. Таким образом, для существенного сокращения продолжительности переналадки валкового инструмента остается лишь один путь – полностью или частично ликвидировать ручные операции по разборке-сборке рабочих клеток и валков стана. В настоящее время эта задача решается следующим образом:

- использование специализированных переналаживаемых станов, каждый из которых предназначен только для изготовления одного конкретного профиля. Экономически это целесообразно лишь при достаточной загрузке оборудования, а также при изготовлении сложных профилей, в том числе профилированных настилов;

- применение индивидуального комплекта валков или кассет с валками для изготовления каждого из производимых на данном стане профилей. Переналадка осуществляется путем соответствующей замены валков (кассет) в клетях стана. При этом исключаются лишь операции разборки-сборки валков;

- применение зарубежного оборудования новой конструкции (Германия, Австрия), в котором переналадка инструмента осуществляется путем

изменения ширины рабочих клеток стана специальной конструкции (с консольным расположением валков). Такое оборудование конструктивно сложное и соответственно дорогое. Кроме того, оно имеет ограниченное применение – только для изготовления профилей, отличающихся шириной стенки. Естественно, небольшие предприятия с мелкосерийным производством не в состоянии приобрести такое оборудование.

Целью работы является сокращение непроизводительных потерь времени при переналадке валкового инструмента профилегибочных станов, упрощение и ускорение этого процесса.

Основное условие при выполнении разработки заключалось в том, что поиск путей достижения цели, решение поставленных задач и их результаты должны полностью соответствовать авторской концепции развития производства гнутых тонкостенных профилей с покрытием для различных отраслей экономики под девизом «Просто. Оригинально. Эффективно», разработанной одним из авторов данной публикации А. В. Ахлестиным и принятой на заводе-производителе профилегибочного оборудования и гнутых профилей ООО «РОЛЛФОРМ» (г. Харьков).

2. Новые конструкции валкового инструмента. Анализ калибровок валков показал, что при переналадке профилей, отличающихся одним или двумя размерами, формующие (рабочие) элементы валка изменяют свое положение на его валу путем соответствующего изменения положения дистанционных элементов. При условии возможности выполнения указанных процедур непосредственно в рабочей клетке стана отпала бы необходимость в выполнении ручных операций по разборке-сборке клеток и самих валков, то есть цель работы была бы достигнута. Таким образом, задача сводится к усовершенствованию валков за счёт изменения конструкции самой простой их детали – дистанционного элемента (в традиционном исполнении – кольцо определённой ширины, установленное на валу валка посредством шпоночного соединения). А это, по сути, – несложная конструкторская задача, и ниже кратко изложены варианты её решения.

В связи с тем, что все представленные ниже конструкции запатентованы и называются «Инструмент профилегибочного стана», во избежание путаницы это название сохранено при дальнейшем их описании.

Инструмент профилегибочного стана и способ настройки инструмента [3]. Инструмент содержит образующие калибр верхний и нижний валки, выполненные в виде установленных на валах дисковых (формующих) элементов 1 (рис. 1, а). Его отличие заключается в том, что он снабжён установленным на валу каждого валка, по меньшей мере, одним разъемным дисковым (дистанционным) элементом с разъемом в диаметральном направлении 2 (см. рис. 1, а). В данном случае ключевым является слово разъемный. Именно благодаря ему появилась возможность установки указанных элементов на вал

с боковых его сторон, а не с торцевой, как обычно. Причём непосредственно в рабочей клетке стана, а не на верстаке, предназначенном для разборки-сборки валков, как обычно и т. д.

Согласно способу настройки инструмента [3] требуемую ширину калибра валков B_2 (см. рис. 1, б) при настройке (наладке) инструмента получают следующим образом. Освобождают от зажатия элементы валка на его валу (детали крепления не

показаны) и изымают разъемные элементы 1 шириной b каждый, после чего формирующие элементы сдвигают по валу навстречу друг другу, а на освободившееся на валу место устанавливают те же элементы 1 и закрепляют все элементы на валу (см. рис. 1, б). Таким образом, ширина переналаживаемого калибра $B_2 = B_1 - 2b$. В случае расширения калибра знак «-» меняют на знак «+».

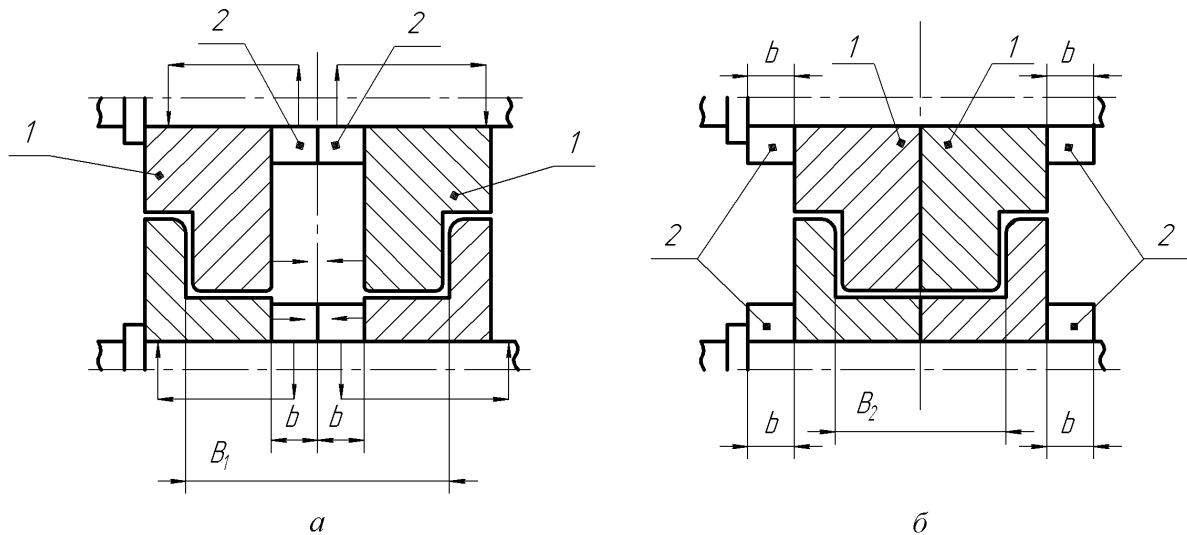


Рис. 1 – Инструмент профилегибочного стана с дистанционными элементами в виде полуколец:

а – с расширенным калибром; б – с зауженным калибром

Однако опыт эксплуатации валков с разъемными элементами показал, что работать с ними трудно, особенно в случаях, когда полукольца одновременно устанавливаются на разных участках вала. Пришлось пожертвовать простотой и доработать их конструкцию. Новые элементы содержали выступы на одном из их торцов и ответные им впадины на другом торце. Первым предприятием, на котором опробовано, доработано и внедрено данное изобретение, было ЗАО «ХОББИТ» (г. Москва, Россия). При этом продолжительность переналадки в зависимости от сложности конфигурации профиля и опыта наладчика уменьшается в 3...5 раз.

Вместо разъемных кольцевых дистанционных элементов в конструкциях инструмента профилегибочного стана [4, 5] стали использовать дистанционные элементы в виде цельных скоб (рис. 2) Они являются самыми простыми и наиболее удобными в работе. При монтаже не требуется их предварительно поддерживать, так как скобы висят на валах под действием собственного веса, и работать с ними может лишь один наладчик. При этом продолжительность переналадки сокращается в 5...8 раз.

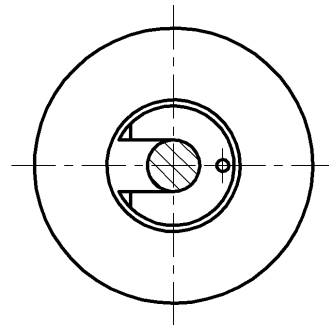


Рис. 2 – Инструмент профилегибочного стана с дистанционным элементом в виде скобы

В конструкции инструмента профилегибочного стана [6] дистанционные элементы выполнены составными из внутренней 1 и наружных 2 резьбовых втулок (рис. 3) с возможностью изменения своей общей ширины. Внутренняя втулка фиксируется от проворота и сдвига по валу 3 установочным винтом 4. Втулки могут иметь лыски или отверстия для слесарного или специального инструмента. Снять их можно только при полной разборке валка. Изменение положения формирующих элементов на валу осуществляется плавное и достигается соответствующим изменением ширины составного элемента (рис. 3). Возможно совместное применение и составных резьбовых элементов, и скоб, что значительно расширяет возможности инструмента.

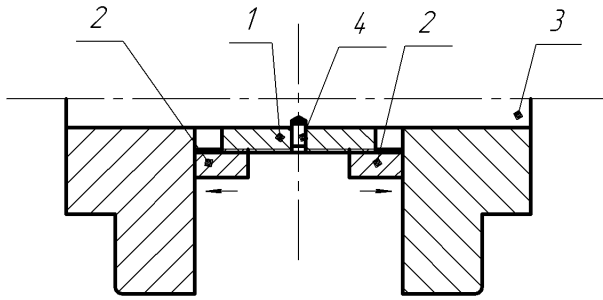


Рис. 3 – Инструмент профилегибочного стана с составным дистанционным элементом в виде соосных резьбовых втулок

3. Унификация элементов валков. С целью дополнительного снижения непроизводительных затрат времени частично осуществлена унификация элементов валков, имеющих наиболее простую и распространенную форму рабочей поверхности – цилиндрическую и коническую. Принцип унификации – соблюдение постоянства ряда основных размеров элементов валков во всех клетях стана. Для конических элементов предусмотрены постоянные углы наклона образующей конической поверхности к горизонтали. Например, при формовке швеллера с высотой полки 60 мм углы наклона составляют – 12°, 23°, 33°, 45°, 60°, 74°, 85° и 90°. При этом ширина рабочей поверхности этих элементов принимается наибольшей, соответствующей максимальной ширине подгибаемой полки самого крупного из всех профилей, изготавливаемых на унифицированном комплекте валков, а меньший диаметр конической поверхности равен катающему диаметру нижнего валка.

Диаметр дистанционных элементов, как правило, выбирают одинаковым, зависящим от диаметра вала валка, а оптимальный размерный ряд их ширины назначают из анализа сортамента производимой на конкретном оборудовании продукции.

Унифицированный инструмент применяют преимущественно для изготовления профилей простой конфигурации (уголковые, швеллерные, С-образные, полузамкнутые и замкнутые). Вместе с тем расчёты показывают, что выполненная квалифицированными специалистами унификация, надлежащий учёт и бережное хранение валкового инструмента может примерно на порядок уменьшить общее количество формирующих и дистанционных элементов валков на предприятии, существенно сократить непроизводительные затраты времени.

4. Альтернативные решения. В 2006 году в США и других странах была издана книга [7]. Основной её автор Джордж Хэлмос (G. Halmos) является известным специалистом в области профилирования, и считаем целесообразным привести из его книги иллюстрации некоторых из его технических решений по рассматриваемому в данной публикации вопросу.

Анализируя приведенные конструкции дистанционных элементов (рис. 4) следует отметить, что уровень их разработок примерно одинаков с нашими. По элементам в виде скобы (рис. 4, а) – полный паритет, по разъемным элементам необходимо отметить более надёжное, но и более сложное установочное крепление полуколец (рис. 4, б, в). Возникает вопрос с разъемным элементом (рис. 4, в). Если пружинное кольцо на нём цельное, то оно препятствует установке элемента на вал валка. Если же это кольцо выполнено с замковым соединением, то вопрос снимается. Что касается исполнения элементов в металле, то у североамериканских компаний внешний вид деталей гораздо привлекательнее.

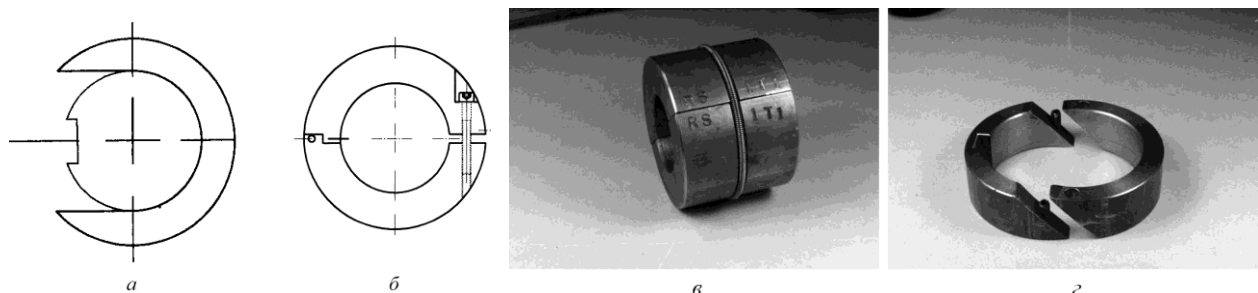


Рис. 4. – Схематическое–изображение и общий вид специальных дистанционных элементов валков [7, с. 5-50–5-51]:

а – скоба; б – откидной дисковый с фиксацией винтом; в – широкий с разъемом по диаметральной плоскости и фиксацией пружинным кольцом; г – разъемный с фиксацией штифтами

Выводы. Уменьшение количества профилей в заказываемых партиях приводит к увеличению числа переналадок валкового инструмента и, следовательно, к увеличению непроизводительных потерь времени. Созданы новые конструкции инструмента профилегибочного стана, позволяющие значительно упростить процесс переналадки инструмента за счёт ликвидации ручного труда по сборке-разборке рабочих клеток стана и их валков, а продолжительность переналадки сократить в 5...8 раз. При этом практически не требуется вложения дополнительных средств. За счёт унификации на порядок сокращается общее количество формирующих и дистанционных элементов валков на предприятии. Анализ конструкций дистанционных элементов валков, приведенных в зарубежной технической литературе, показал, что уровень их разработок по данному направлению сопоставим с нашими разработками.

Список литературы

1. Тришевский И. С. Теоретические основы процесса профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М. : Металлургия, 1980. – 287 с.
2. Филимонов С. В. Формообразование в роликах профилегибочных станков тонкостенных многоэлементных профилей с элементами жёсткости : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.09 / Филимонов Сергей Вячеславович. – Самара, 2017. – 475 с.
3. Пунин В. И. Пат. 2283199, Российская Федерация. Инструмент профилегибочного стана и способ настройки инструмента / В. И. Пунин, А. В. Ахлестин. – 2006.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Шляхи скорочення тривалості переналагодження валкового інструменту профілезгинальних станів для виробництва гнутих профілів / О. В. Ахлестін, В. М. Левченко, В. Д. Сотников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 10–15 – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2671

Пути сокращения продолжительности переналадки валкового инструмента профилегибочных станков для производства гнутых профилей / А. В. Ахлестин, В. Н. Левченко, В. Д. Сотников // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 10–15 – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2519-2671

The ways of reducing time of tool readjustment of roll forming mills for the production of bent profiles / O. V. Akhlestin, V. M. Levchenko, V. D. Sotnykov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 10–15. – Bibl.: 6. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ахлестін Олександр Володимирович – директор ТОВ «Роллформ», м. Харків; тел.: (067) 705-66-25; e-mail: form2@i.ua

Ахлестин Александр Владимирович – директор ООО «Роллформ», г. Харьков; тел.: (067) 705-66-25; e-mail: form2@i.ua

Akhlestin Oleksandr Volodymyrovych – Director of LLC «Rollform», Kharkiv; tel.: (067) 705-66-25; e-mail: form2@i.ua

4. Пивовар В. С. Пат. 80925, Україна. Інструмент профілезгинального стана / В. С. Пивовар, О. В. Ахлестін. – 2006.
5. Ахлестин А. В. Пат. 2374023, Российская Федерация. Инструмент профилегибочного стана / А. В. Ахлестин, В. И. Пунин. – 2009.
6. Ахлестин О. В. Пат. 83896, Україна. Інструмент профілезгинального стана / О. В. Ахлестін, В. С. Пивовар. – 2008.
7. Roll Forming Handbook /ed. by G. T. Halmos. Boca Ration: CRC Press, 2006. 583 p.

References (transliterated)

1. Trishevskiy I. S., Doktorov M. E. Teoreticheskie osnovy protsessa profilirovaniya [The theoretical basis of the profiling process]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 287 p.
2. Filimonov S. V. Formoobrazovanie v rolikakh profilegibochnykh stankov tonkostennykh mnogoelementnykh profiley s elementami zhestkosti : dis. ... d-ra tekhn. nauk : 05.02.09 [Forming of thin-walled multi-element profiles with stiffening elements in rollers of roll forming machine tools. Dr. eng. sci. diss.]. Samara, 2017. 475 p.
3. Punin V. I., Akhlestin A. V. Instrument profilegibochnogo stana i sposob nastroyki instrumenta [The tool of profile bending mill and tool setting method]. Patent RF, no. 2283199, 2006.
4. Pyvovar V. S., Akhlestin O. V. Instrument profilezhynal'noho stana [The tool of profile bending mill]. Patent UA, no. 80925, 2006.
5. Akhlestin A. V., Punin V. I. Instrument profilegibochnogo stana [The tool of profile bending mill]. Patent RF, no. 2374023, 2009.
6. Akhlestin O. V., Pyvovar V. S. Instrument profilezhynal'noho stana [The tool of profile bending mill]. Patent UA, no. 83896, 2008.
7. Roll Forming Handbook /ed. by G. T. Halmos. Boca Ration: CRC Press, 2006. 583 p.

Поступила (received) 13.11.2017

Левченко Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри обробки металів тиском; тел.: (067) 572-53-44; e-mail: goldangel271@gmail.com

Левченко Владимир Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры обработки металлов давлением; тел.: (067) 572-53-44; e-mail: goldangel271@gmail.com

Levchenko Volodymyr Mykolayovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of Treatment of Metals by Pressure; tel.: (067) 572-53-44; e-mail: goldangel271@gmail.com

Сотников Володимир Данилович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», професор кафедри технології виробництва авіаційних двигунів; тел.: (050) 195-82-34; e-mail: v.sotnykov@khai.edu

Сотников Владимир Данилович – кандидат технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», профессор кафедры производства авиационных двигателей; тел.: (050) 195-82-34; e-mail: v.sotnykov@khai.edu

Sotnykov Volodymyr Danylovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National aerospace university «Kharkiv aviation institute», Full Professor at the Department of aviation engine production technology; tel.: (050) 195-82-34; e-mail: v.sotnykov@khai.edu

УДК 621.791.1: 621.77.01

В.Г. ЗАГОРЯНСКИЙ, Л.Э. ДИКАЯ

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОЛЩИН СЛОЕВ БИМЕТАЛЛА ПРИ ПОЛОСЧАТОМ ПЛАКИРОВАНИИ
СОВМЕСТНОЙ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКОЙ

Стаття присвячена розробці оптимізаційної моделі розрахунку товщини шарів біметалу, одержуваного спільною холодною прокаткою (на прикладі випадку полосчатого плакування алюмінієм нікелевої основи) з умови забезпечення плоскої форми підкату. Для біметалу, одержуваного спільною холодною прокаткою з різнотовщинних пакетів з нікелевою основою і алюмінієвим плакуючим шаром для певного діапазону розмірів шарів визначено оптимальні співвідношення товщин і ширин. Оптимізацію товщин шарів вихідного пакета пропонується проводити шляхом підбору параметра (реалізується в Microsoft Excel), вибравши в якості змінної товщину основного шару в вихідному пакеті. Для оптимізації з використанням математичної моделі і спеціальних програмних інструментів потрібні додаткові дослідження.

Ключові слова: біметал, холодна прокатка, полосчатое плакування, нікель, алюміній, оптимізація.

Статья посвящена разработке оптимизационной модели расчета толщин слоев биметалла, получаемого совместной холодной прокаткой (на примере случая полосчатого плакирования алюминием никелевой основы) из условия обеспечения плоской формы подката. Для биметалла, получаемого совместной холодной прокаткой из разнотолщинных пакетов с никелевой основой и алюминиевым плакирующим слоем, для определенного диапазона размеров слоев определены оптимальные соотношения толщин и ширин. Оптимизацию толщин слоев исходного пакета предлагается проводить путем подбора параметра (реализуется в Microsoft Excel), выбрав в качестве переменной толщину основного слоя в исходном пакете. Для оптимизации с использованием математической модели и специальных программных инструментов требуются дополнительные исследования.

Ключевые слова: биметалл, холодная прокатка, полосчатое плакирование, никель, алюминий, оптимизация.

The article is devoted to the development of an optimization model for calculating the thickness of bimetal layers obtained by joint cold rolling (on the example of the case of banded aluminum cladding of nickel base) from the condition of providing a flat form of rolling. The necessity of conducting theoretical and experimental investigations of the process of obtaining a two-layer rolled metal is due to the continuous expansion of the sphere of its application, increasing requirements to its properties. For bimetal obtained by joint cold rolling from various thickness packs with a nickel base and an aluminum cladding layer, optimal thickness / width ratios are determined for a certain range of layer sizes. It is suggested to optimize the thickness of the layers of the source package by selecting a parameter (implemented in Microsoft Excel) by selecting the thickness of the main layer in the source package as a variable. To optimize using the mathematical model and special software tools, additional research is required.

Keywords: bimetal, cold rolling, band-cladding, nickel, aluminum, optimization.

Введение. Контактные биметаллы, представляющие собой биметаллы с местным плакированием, широко применяются в электротехнике, электронике, точном машиностроении [1]. В качестве плакирующего слоя используется металлы и сплавы с хорошей электропроводностью – серебро, его сплавы, золото, медь, кадмий, палладий и другие металлы с добавлением серебра для достижения необходимой электропроводности и сопротивления обгоранию.

Такие композиции обеспечивают значительную экономию дорогих металлов и сплавов при сохранении требуемых свойств контактов в зоне разрыва электрической цепи.

Для электрического контакта в композиции используется вставка металла с хорошей электропроводностью (серебра или другого) по краям (рис. 1, а), полосой на одной стороне (рис. 1, б), а также присоединение бок о бок (рис. 1, в) [1].

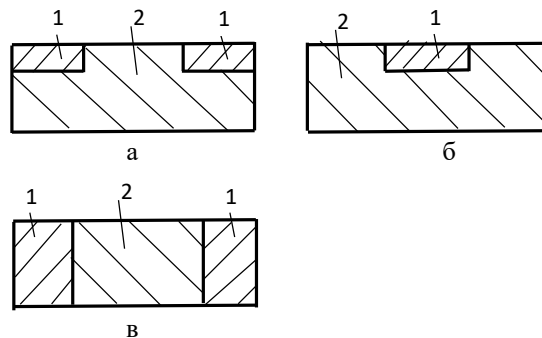


Рис. 1 – Размещение плакирующего слоя: 1 – по отношению к основному 2 – в контактных биметаллов [1]

Такая конструкция позволяет разместить серебро (или другой проводящий металл) только там, где это необходимо для формирования электрического контакта без потерь дорогостоящего металла.

Анализ последних исследований и литературы. Для нужд электронной промышленности, быстро развивавшейся нашей стране с середины прошлого века, было, в частности, разработано большое количество различных типоразмеров тонких (0,1-0,5 мм) лент из слоистых металлических композиций, в том числе лент с полосчатым плакированием, изготавливаемых совместной холодной прокаткой разных металлов с промежуточным и конечным отжигом [2].

Плакирование рулонной холодной прокаткой используется для получения изделий относительно малой толщины, например, тонких лент из композиций алюминий-никель [3]. Ленты АН (алюминий-никель) и АЖА (алюминий-сталь-алюминий) применяются в электровакуумной промышленности, из них изготавливают трубки термопар и другие изделия.

В технологии ленточных некристаллических материалов, используемых для изготовления изделий микро-, опто- и наноэлектроники, применяется метод, основанный на прокатке расплава, который также позволяет реализовать технологию получения двухслойных лент [4]. В зазор между двумя вращающимися навстречу друг другу охлаждаемыми дисками через капилляр в виде капель поступает струя расплава, превращаясь при охлаждении в чешуйчатый порошок. Благодаря возможности получения гладкой и высококачественной ленты и листа этот метод имеет достаточно широкое распространение (получение биметалла прокаткой порошка на ленте).

Несмотря на активно развивающиеся новые и перспективные технологии, промышленное производство тонких лент из биметаллов основано на технологии холодной прокатки. Например, Калужская металлургическая компания предлагает многослойные плакированные материалы, ленты и проволоку из прецизионных сплавов и цветных металлов широкой номенклатуры [5].

Незначительное сопротивление деформации металла одного слоя по отношению к металлу другого слоя обеспечивает возможность значительной пластической деформации более мягкого металла композиции в плакировочном проходе, за счет чего обеспечивается прочное схватывание слоев [6].

Исследования проблемы неравномерности деформации при холодной прокатке далеко не исчерпаны как для монометаллов [7], так и для плакированных листов и лент [8].

На основе массива экспериментальных данных и разработки теоретических подходов к анализу процесса деформации биметалла при его получении совместной холодной прокаткой, возможно

представление данной задачи (обеспечение плоской формы подката при полосчатом плакировании) в виде оптимизационной модели.

Цель исследования, постановка проблемы.

Разработка оптимизационной модели расчета толщин слоев биметалла, получаемого совместной холодной прокаткой (на примере случая полосчатого плакирования алюминия никелевой основы) из условия обеспечения плоской формы подката.

Материалы исследований. Когда напряжение сжатия, возникающее вследствие выравнивания вытяжек частей подката по ширине за счет упругих деформаций, достигает критической величины $\sigma_{кр}$, наступает коробление подката [8].

В работе [9] при анализе задачи об устойчивости удлиненной пластинки, равномерно сжатой вдоль длинной стороны, получена зависимость для определения критического напряжения сжатия

$$\sigma_{кр} = \frac{E}{3(1-\mu^2)} \left(\frac{\pi \cdot h}{b} \right)^2, \quad (1)$$

где h и b – соответственно толщина и ширина пластинки, μ – коэффициент Пуассона.

Значения коэффициента Пуассона составляют [10]: для алюминия $\mu = 0,345$; для меди $\mu = 0,343$; для никеля $\mu = 0,312$; для низкоуглеродистой стали $\mu = 0,291$. Там же приведены значения остальных модулей упругости (в данном случае модуля Юнга E).

Для точного определения модулей упругости конкретных марок сталей и сплавов можно воспользоваться зависимостью [11]

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1, \quad (2)$$

где G – модуль сдвига. Значения E и G для конкретных марок сталей и сплавов приводятся в справочной литературе.

При полосчатом плакировании условие сохранения плоской формы профиля ленты [8]

$$\sigma_{сж} \leq \sigma_{кр}, \quad (3)$$

где $\sigma_{сж}$ – сжимающие напряжения в плакированной части подката, определяемые по выражению [8]

$$\sigma_{сж} = E \left[1 - \frac{1}{\left(1 - \frac{b_1}{b}\right) \frac{B_1}{b_1} \frac{h_2}{H_2} \frac{b - b_1}{B - B_1} \frac{H}{h} + \frac{b_1}{b}} \right], \quad (4)$$

b_1 – ширина плакирующего слоя после прокатки; b – ширина основного слоя после прокатки; B – ширина основного слоя до прокатки; B_1 – ширина плакирующего слоя до прокатки; h_2 – толщина основного слоя после прокатки; H_2 – толщина основного слоя до прокатки; h – толщина биметалла после прокатки; H – толщина пакета до прокатки.

Известно [12], что остаточные продольные напряжения при плакировании металлов совместной холодной прокаткой определяются относительной

толщиной (долей) плакирующего слоя H_1/H и его относительной шириной B_1/B_2 .

Выполнялось рулонное плакирование никелевой основы шириной 35 мм полосами алюминия. Общая исходная толщина пакетов составляла 1 мм, относительное обжатие при плакировании было принято равным $\varepsilon = 50\%$ (в работе [12] рекомендуется $\varepsilon = 46\%$, что обеспечивает прочное соединение слоев) из условия получения широко распространенной толщины 0,5 мм.

Толщины слоев и ширины полос плакировки приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Размеры слоев, использованные в экспериментах

Толщины слоев, мм		H_1/H	Ширины слоев, мм		B_1/B_2
H_1	H_2		B_1	B_2	
0,9	0,1	0,1	4	35	0,11
0,8	0,2	0,2	10	35	0,29
0,7	0,3	0,3	20	35	0,57
0,6	0,4	0,4	25	35	0,71
0,5	0,5	0,5			

В табл. 2 приведены полученные значения уширения ε_b алюминиевой полосы в зависимости от доли H_1/H плакирующего слоя в исходном пакете.

Таблица 2 – Размеры слоев, использованные в экспериментах

B_1/B_2	B_1 , мм	H_1/H									
		0,1		0,2		0,3		0,4		0,5	
		b_1 , мм	ε_b , %	b_1 , мм	ε_b , %	b_1 , мм	ε_b , %	b_1 , мм	ε_b , %	b_1 , мм	ε_b , %
0,11	4	4,76	16	5,13	22	6,67	40				
0,29	10	10,87	8	11,76	15						
0,57	20	21,05	5	21,51	7						
0,71	25	25,51	2	25,77	3	26,04	4	26,32	5	26,04	4

Установлено, что уширение плакирующего слоя увеличивается при увеличении доли плакирующего слоя в пакете (табл. 2). При увеличении доли плакирующего слоя в пакете выше определенного значения начинается коробление основного слоя и изгиб плакирующего слоя. В табл. 2 приведены значения уширения, при которых еще сохраняется плоский профиль биметалла.

Для определения доли плакирующего слоя в исходном пакете, при котором выполняется условие (3), можно воспользоваться формой, приведенной на рис. 2.

	A	B	C	D	E
1	Размеры, мм				
2	b_1	4,76	5,13	6,67	10
3	b	70	70	70	70
4	B_1	4	4	4	4
5	B	35	35	35	35
6	h_2	0,45	0,4	0,35	0,3
7	H_2	0,9	0,8	0,7	0,6
8	H	1	1	1	1
9	h	0,5	0,5	0,5	0,5
10					
11	$\sigma_{кр}/E$	0,0397	0,0342	0,0202	0,009
12	$\sigma_{сж}/E$	-0,716	-0,585	-0,204	0,1935
13					
14	H_1/H	0,1	0,2	0,3	0,4
15					

Рис. 2 – Форма с введенными исходными данными и результатами

Данную задачу можно представить в виде оптимизационной модели, где целевая функция представлена в виде

$$\frac{H - H_2}{H} \rightarrow \max, \quad (5)$$

а система ограничений представлена в виде

$$\begin{cases} 1 - \frac{1}{\left(1 - \frac{b_1}{b}\right) \frac{B_1}{b_1} \frac{h_2}{H_2} \frac{b - b_1}{B - B_1} \frac{H}{h} + \frac{b_1}{b}} \leq 3,6 \left(\frac{h}{b_1}\right)^2, \\ H_2 \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Данную модель можно было бы представить в виде, подходящей для использования инструментов "что-если" (Поиск решения) программы Microsoft Excel, если бы имелась зависимость между величинами H_2 и b_1 . Тогда через переменную H_2 можно было бы выразить остальные величины. Данная переменная входит в целевую функцию и в левую часть первого ограничения (6).

Выводы. При увеличении толщины плакирующего слоя возрастание напряжений приводит к тому, что при определенных (критических) отношениях толщины плакирующего слоя к общей толщине исходного пакета сжимающие напряжения в плакированной части подката становятся больше критических напряжений, что приводит к волнистости кромок плакирующего слоя и трещинам на кромках основного слоя.

2. Для исследованных пакетов никель-алюминий с толщиной основного слоя 35 мм и исходной толщине пакета 1 мм с относительным обжатием 50% для всех значений относительной толщины плакирующего слоя плоская форма подката сохраняется при доле плакирующего слоя в исходном пакете до 0,3.

3. Оптимизацию толщин слоев исходного пакета предлагается проводить путем подбора параметра (реализуется в Microsoft Excel), выбрав в качестве переменной толщину основного слоя в исходном пакете.

Список литературы

- McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, 10th Edition, Vol. 04 (CHE-COS) / Licker M. D. (Publisher). – McGraw-Hill, New York, 2007. – 822 p.
- Чернов Н. К. Применение технологических подслоев при производстве слоистых композиционных материалов / Н. К. Чернов // 7-я международная выставка и конференция "Покрyтия и обработка поверхности" Тезисы докладов. – М.: Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 2010. – 108 с. – С. 98.
- Голованенко С. А. Сварка прокаткой биметаллов / С. А. Голованенко. – М.: Металлургия, 1977. – 160 с.
- Рошин В. М. Технология материалов микро-, опто- и нанoeлектроники. Ч. 2 / В. М. Рошин, М. В. Силибин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 180 с.
- Калужская металлургическая компания. Продукция [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://cube2.steelsite.ru/cube2_201111011343.php. – Дата обращения : 07 октября 2017.
- Голованенко С. А. Производство биметаллов / С. А. Голованенко, Л. В. Меандров. – М.: Металлургия, 1966. – 304 с.
- Байков Е. В. Исследование на непрерывном стане холодной прокатки продольной разнотолщинности полос / Е. В. Байков // Нові матеріали і технології у металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 1. – С. 102-105.
- Определение условий сохранения плоскостности биметалла при полосчатом плакировании / М. Г. Поляков, П. И. Денисов, Н. К. Чернов, В. А. Некит // Теория и практика производства метизов: Межвуз. сб. науч. тр. – Свердловск: Изд-во УПИ, 1982. – С. 5–9.
- Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
- Физические величины: Справочник / Бабичев А.П. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

- Лившиц Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Линецкий; под ред. Б. Г. Лившица. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
- Денисов П. И. О критических соотношениях геометрических размеров исходного пакета при полосчатом плакировании металлов совместной холодной прокаткой / П. И. Денисов, В. А. Некит, Н. К. Чернов // Теория и практика производства метизов: Межвузовский сборник. – Свердловск: УПИ, 1979. – С. 18–23.

Bibliography (transliterated)

- McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, 10th Edition, Vol. 04 (CHE-COS) / Licker M. D. (Publisher). – McGraw-Hill, New York, 2007. – 822 p.
- Chernov, N. K. "Primenenie tekhnologicheskikh podsloev pri proizvodstve sloistykh kompozitsionnykh materialov." // 7-ya mezhduнародnaya vystaska i konferentsiya "Pokrytiya i obrabotka poverkhnosti". Tezisy dokladov. Moscow: Rossijskij khimiko-tekhnologicheskij universitet imeni D. I. Mendeleeva, 2010. 98. Print.
- Golovanenko, S. A. Svarka prokatkoj bimetallov. Moscow: Metallurgiya, 1977. Print.
- Roshchin, V. M. and M. V. Silibin. Tekhnologiya materialov mikro-, opto- i nanoelektroniki. Part 2. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2010. Print.
- Kaluzhskaya metallurgicheskaya kompaniya. Produktsiya. Web. 07 October 2017 <http://cube2.steelsite.ru/cube2_201111011343.php>.
- Golovanenko, S. A. and L. V. Meandrov. Proizvodstvo bimetallov. Moscow: Metallurgiya, 1966. Print.
- Bajkov, E. V. "Issledovanie na nepreryvnom stane kholodnoj prokatki prodol'noj raznotolshinnosti polos." Novi materialy i tekhnologii u metalurgii ta mashinobuduvanni. No. 1. 2008. 102–105. Print.
- Polyakov, M. G., et al. "Opreделение uslovij sokhraneniya ploskostnosti bimetallo pri poloschatom plakirovani." Teoriya i praktika proizvodstva metizov. 1982. 5–9. Print.
- Vol'mir, A. S. Ustojchivost' deformiruemyykh system. Moscow: Nauka. 1967. Print.
- Babichev, A. P., et al. Fizicheskie velichiny: Spravochnik. Moscow: Energoatomizdat, 1991. Print.
- Livshits, B. G., V. S. Kraposhin and Ya. L. Linetskij. Fizicheskie svojstva metallov i splavov. Moscow: Metallurgiya, 1980. Print.
- Denisov, P. I., V. A. Nekit and N. K. Chernov. "O kriticheskikh sootnosheniyakh geometricheskikh razmerov iskhodnogo paketa pri poloschatom plakirovanii metallov sovместnoj holodnoj prokatkoj." Teoriya i praktika proizvodstva metizov. 1979. 18–23. Print.

Поступила (received) 23.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оптимізація товщин шарів біметалу при полосчатом плакировании спільної холодною прокаткою / В. Г. Загорянский, Л. Э. Дикая // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 16–20 – Библиогр.: 12 назв.– ISSN 2519-2671

Оптимизация толщин слоев биметалла при полосчатом плакировании совместной холодной прокаткой / . Г. Загорянский, Л. Е. Дика // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 16–20 – Библиогр.: 12 назв.– ISSN 2519-2671

Optimization of the thickness of layers of bimetal in the stripe cladding by joint cold rolling / . G. Zagoryanskii, L. E. Dikaya // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 5–9. – Bibl.:12. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Загорянський Володимир Георгійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, тел.: (050) 874-87-48; e-mail: zagor_vlad@ukr.net.

Загорянский Владимир Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных технологий Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, тел.: (050) 874-87-48; e-mail: zagor_vlad@ukr.net.

Zagoryanskiy Vladimir Georgievich – candidate of technical sciences, associated professor of department of transportation technology of Mykhailo Ostrohradskiy Kremenchuk National University, tel.: (050) 874-87-48; e-mail: zagor_vlad@ukr.net.

Дикая Луиза Эхматовна – ассистент кафедры технологии машиностроения Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, тел.: (096) 254-20-90; e-mail: lu.di@mail.ru.

Дика Луіза Ехматівна – ассистент кафедр технології машинобудування Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, тел.: (096) 254-20-90; e-mail: lu.di@mail.ru.

Dikaya Luiza Ehmatoovna – assistant of department of technology of machine-building of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, tel.: (096) 254-20-90; e-mail: lu.di@mail.ru.

УДК 621.983

О.В. КАЛЮЖНИЙ, В.Л. КАЛЮЖНИЙ, С.С. СОКОЛОВСЬКА**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИТЯГУВАННЯ З ПОТОНШЕННЯМ ЗПРОФІЛЬОВАНИМ ПУАНСОНОМ ПОРОЖНИСТИХ ЗАГОТОВОК ПІСЛЯ ЗВОРОТНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ**

Методом скінченних елементів проведений аналіз холодного витягування з потоншенням зпрофільованим пуансоном порожнистих заготовок, які отримані зворотним видавлюванням. Бокова поверхня такого пуансона утворена перетином торів з однаковими зовнішнім діаметром та діаметром кола. Тори розташовані з постійним кроком по вісі. При витягуванні метал заповнює впадини на боковій поверхні пуансона та створюється додаткове тягуче засилля до стінки здеформованої заготовки. Застосування зпрофільованого пуансона дозволяє зменшити кількість переходів витягування за рахунок суттєвого зменшення осевих розтягувальних напружень в стінці заготовки в порівнянні з витягуванням традиційним циліндричним пуансоном. Моделюванням встановлені зусилля витягування, зусилля знімання виробу із пуансона, розподіли питомих зусиль на пуансоні і матриці при максимальному зусиллі деформування. Також виявлені напружено-деформований стан, ступінь використання ресурса пластичності, температура здеформованого металу та кінцеві форма і розміри виробу. На основі розрахункових даних розроблена конструкція штампа для реалізації витягування з потоншенням зпрофільованим пуансоном.

Ключові слова: витягування з потоншенням, порожниста заготовка, зпрофільований пуансон, метод скінченних елементів, зусилля витягування, напружено-деформований стан, ресурс пластичності, штамп для витягування.

Методом конечных элементов проведен анализ холодной вытяжки с утонением сprofilированным пуансоном полых заготовок, которые получены обратным выдавливанием. Боковая поверхность такого пуансона образована пересечением торов с постоянным внешним диаметром и диаметром окружности. Торы расположены с одинаковым шагом по оси. При вытяжке металл заполняет впадины на боковой поверхности пуансона и создается дополнительное тянущее усилие до стенки сформированной заготовки. Применение сprofilированного пуансона позволяет уменьшить количество переходов вытяжки за счет существенного уменьшения осевых растягивающих напряжений в стенке заготовки по сравнению с вытяжкой традиционным цилиндрическим пуансоном. Моделированием установлены усилия вытяжки, усилия съема изделия с пуансона, распределения удельных усилий на пуансоне и матрице при максимальном усилии деформирования. Также выявлены напряженно-деформированное состояние, степень использования ресурса пластичности, температура сформированного металла и конечные форма и размеры изделия. На основе расчетных данных спроектирована конструкция штампа для реализации вытяжки с утонением сprofilированным пуансоном.

Ключевые слова: вытяжка с утонением, полая заготовка, сprofilированный пуансон, метод конечных элементов, усилие вытяжки, напряженно-деформированное состояние, ресурс пластичности, штамп для вытяжки.

The finite element method was used for carried out the analysis of ironing the hollow workpieces obtained by backward extrusion by profiled punch. The lateral surface of such a punch is formed by the intersection of tori with a constant outer diameter and diameter of the circle. The tori are arranged with the same pitch along the axis. Metal fills the depressions on the lateral surface of the punch and creates an additional pulling force to the wall of the deformed workpiece during the backward extrusion. The use of a profiled punch makes it possible to reduce the number of backward extrusion operations due to a significant decrease of axial tensile stresses in the wall of the workpiece in comparison with extrusion by traditional cylinder punch. There're identified drawing's forces, forces of removal product from the punch, the distribution of the normal stress on the punch and matrix at the maximum force of deformation. Also identified the stress-strain state, the degree of using of the resource of plasticity, temperature of deformed metal and the final shape and size of the product. Based on calculated data were the design of the stamp was designed for realization of ironing by the profiled punch.

Keywords: ironing, the hollow workpiece, profiled punch, finite element method, drawing's forces, stress-strain state, resource of plasticity, stamp for drawing.

Вступ. Високоточні порожнисті вироби з товстою донною частиною і тонкою стінкою із сталей в серійному і масовому виробництвах отримують, як правило, за дві операції холодного штампування. На першій операції з використанням процесу зворотного видавлювання або прямого видавлювання з роздачою за один перехід отримують порожнистий напівфабрикат з фаскою на донній частині та стінкою, товщина якої визначається граничним ступенем деформації [1]. Для зменшення товщини стінки та збільшення висоти виробу використовують операцію витягування з потоншенням. Для отримання стінки необхідної товщини витягування виконують за декілька переходів. При витягуванні з потоншенням кількість переходів в основному визначається величиною осевих розтягувальних напружень, які виникають у стінці здеформованої заготовки в зазорі між пуансоном і матрицею [2–4]. Тому актуальною задачею для витягування з потоншенням є

розроблення таких схем формоутворення, які приводять до зменшення величин вказаних напружень, що приведе до скорочення кількості переходів витягування та зниження собівартості виробів. В останній час в формоутворюючих процесах листового штампування, зокрема при витягуванні, обтиску і роздачі, використовують деформуючий інструмент спеціального профіля. Застосування такого інструмента приводить до зменшення впливу сил тертя, що дозволяє збільшити ступінь деформації при формоутворенні за один перехід та зменшити кількість переходів штампування [5–10].

В роботі [11] при витягуванні з потоншенням листової заготовки малої товщини в конусній матриці застосований пуансон спеціального профіля. Показано, що такий пуансон забезпечує збільшення ступеня деформації при потонненні стінки та зменшення кількості переходів витягування при отриманні виробу. Однак на

теперішній час відсутні дані по витягуванні порожнистих заготовок зі стінкою та донною частиною, які мають велику товщину.

Витягування з потоншенням зпрофільованим пуансоном. Формоутворення виробу витягуванням з потоншенням зпрофільованим пуансоном із порожнистої заготовки, яка отримана зворотним видавлюванням, з позначеннями зображене на рис. 1. На рис. 1а показана схема витягування. Ліворуч від вісі симетрії наведений вихідний стан перед витягуванням, а праворуч - після витягування. Вихідну листову заготовку 1 встановлюють в матриці 2. Матриця 2 розташована на плиті 3. Для знімання виробу з пуансона в плиті 3 розміщені повзушки 4, які спираються на пружини 5.

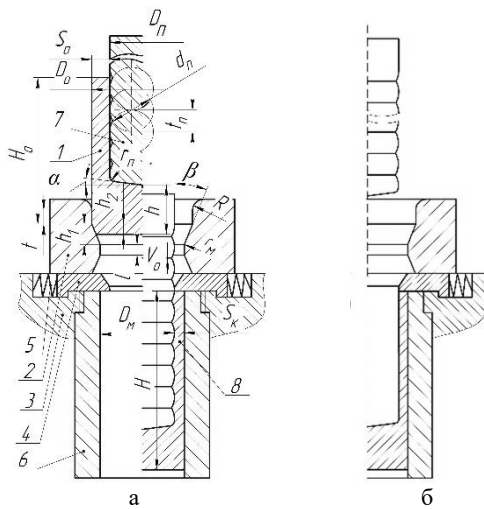


Рис. 1 – Формоутворення виробу витягуванням з потоншенням зпрофільованим пуансоном із порожнистої заготовки: а – схема витягування, б – схема знімання виробу з пуансона

Також в плиті 3 закручена обойма 6. Зусилля деформування прикладають за допомогою пуансона 7. Бокова поверхня пуансона утворена перетином торів із зовнішнім діаметром D_n і діаметром кола d_n , що розташовані з кроком t_n . При деформуванні заготовки по конусній поверхні висотою h_1 та в калібруючому пояску матриці розміром l метал заповнює впадини на боковій поверхні пуансона. Це забезпечує створення додаткового тягучого зусилля пуансоном за стінку zdeформованої заготовки та суттєве зменшення осьових розтягувальних напружень в стінці, які є причиною відриву донної частини заготовки. Після витягування отримують виріб 8. При цьому повзушки 4 за допомогою пружин 5 охоплюють торець виробу 8.

Схема знімання виробу з пуансона приведена на рис. 1б. Виріб 8 після витягування залишається в обоймі 6, яка забезпечує вирівнювання утворених виступів на внутрішній поверхні виробу 8 та збереження його зовнішнього діаметра при зворотному русі пуансона.

Мета роботи. Метою роботи є встановлення параметрів витягування з потоншенням

зпрофільованим пуансоном порожнистих заготовок, які отримані зворотним видавлюванням, та визначення кінцевих форми і розмірів виробу.

Постановка задачі для визначення необхідних параметрів витягування.

Встановлення параметрів проведено шляхом створення математичних моделей з використанням метода скінчених елементів (МСЕ) та проведенням чисельних експериментів із застосуванням програми DEFORM. Використана пружно-пластична модель ізотропного металу, що деформується. Деформуючий інструмент вважався абсолютно жорстким. Тертя на контактуючих поверхнях враховане по Кулону з коефіцієнтом тертя $\mu=0,08$.

Витягуванню підлягала заготовка із сталі AISI 1010 COLD з діаметром $D_o=46$ мм, товщиною стінки $S_o=7,95$ мм, висотою $H_o=75$ мм, кутом $\alpha=7^\circ$ і радіусом $r_n=2$ мм. Зпрофільований пуансон мав розміри: $D_n=30$ мм, $d_n=8$ мм, $t_n=4$ мм. Розміри матриці: $D_m=36$ мм, $\beta=10^\circ$, $l=5$ мм, $R=r_m=5$ мм, $h_1=28$ мм, $h_2=15$ мм. Швидкість деформування складала $V_o=2$ мм/сек.

Результати чисельного моделювання. Для порівняння результатів було проведено моделювання витягування з потоншенням вказаної заготовки традиційним циліндричним пуансоном діаметром $D_n=30$ мм в матриці вищенаведеної форми. Розрахункові схеми витягування традиційним та зпрофільованим пуансонами зображені на рис. 2. На рис. 2а зображене положення на початку витягування традиційним пуансоном. Заготовка 1 розміщена в матриці 2. Зусилля деформування прикладають за допомогою пуансона 3. Положення в момент відриву донної частини заготовки при витягуванні традиційним пуансоном показане на рис. 2б. Руйнування zdeформованої заготовки проходить при виході донної частини з калібруючого пояску матриці. На рис. 2в наведено положення на початку витягування зпрофільованим пуансоном. Вихідна заготовка 1 встановлена в матриці 2. Під матрицею розташовані повзушки 3 для знімання виробу з пуансона. Обойма 4 необхідна для збереження зовнішнього діаметра виробу при зніманні. Положення в кінці витягування зпрофільованим пуансоном показане на рис. 2г. На рис. 2д зображене положення після знімання виробу з пуансона. Отриманий виріб залишається в обоймі і виштовхується з неї при витягуванні наступної заготовки.

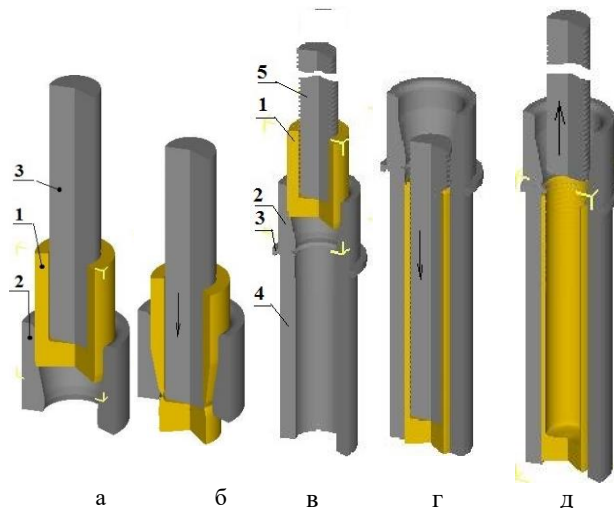


Рис. 2 – Розрахункові схеми в розрізі витягування з потоншенням традиційним та зпрофільованим пуансонами: а – вихідне положення витягування традиційним пуансоном, б – положення в момент відриву донної частини здеформованої заготовки при витягуванні традиційним пуансоном, в – вихідне положення при витягуванні зпрофільованим пуансоном, г – кінцеве положення при витягуванні зпрофільованим пуансоном, д – положення після знімання виробу з пуансона

Результати моделювання витягування з потоншенням традиційним пуансоном показані на рис. 3. Тут і в подальшому тонкими лініями наведений деформуючий інструмент, розміри по вісях наведені в міліметрах. Вище було відмічено, що при даних розмірах заготовки і деформуючого інструмента відбувається відрив донної частини здеформованої заготовки (див. рис. 2б). Причиною цього є виникнення значних розтягувальних осьових напружень σ_z при витягуванні, розподіл яких у здеформованій заготовці показаний на рис. 3а.

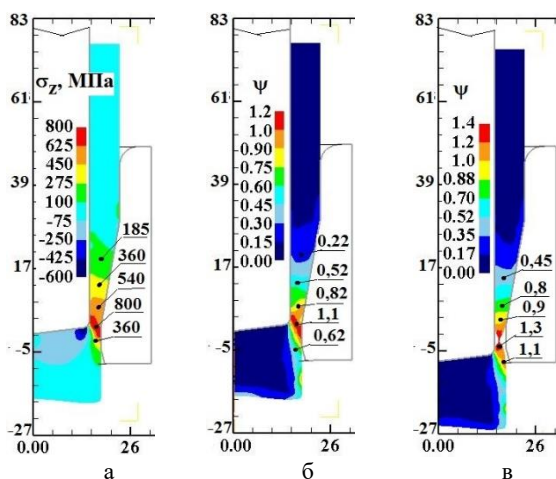


Рис. 3 – Результати моделювання витягування традиційним пуансоном: а – розподіл осьових напружень σ_z , б – розподіл ресурсу пластичності ψ , в – розподіл ресурсу пластичності при відриві донної частини. Розміри по вісях в міліметрах

При переміщенні пуансона 40 мм, в момент виходу донної частини заготовки із калібруючого пояса матриці, виникають максимальні осьові напруження σ_z . У місці переходу донної частини ці напруження досягають величин в межах $\sigma_z = 625 \div 800$ МПа. Такі величини напружень приводять до повного вичерпання ступеня використання ресурсу пластичності ψ здеформованого металу у вказаному місці заготовки, який досягає максимальних величин у межах $\psi = 1,1 \div 1,2$ (при $\psi = 1$ відбувається руйнування здеформованого металу). При подальшому переміщенні пуансона має місце потоншення стінки здеформованої заготовки та відбувається відрив донної частини здеформованої заготовки.

Далі наведені результати витягування з потоншенням вказаної заготовки зпрофільованим пуансоном. Застосування такого пуансона забезпечило формоутворення виробу без руйнування. Залежність зусилля витягування від переміщення пуансона зображена на рис. 4. Зусилля досягає максимум $P_d = 535$ кН при переміщенні пуансона 20 мм, далі зусилля зменшується до $P_d = 430$ кН при переміщенні 40 мм. З цього моменту починається усталена стадія процесу, на якій зусилля практично не змінюється до переміщення пуансона 180 мм. В кінці усталеної стадії торець стінки здеформованої заготовки знаходиться на конусній поверхні матриці. Завершення витягування відбувається при зменшенні зусилля деформування.

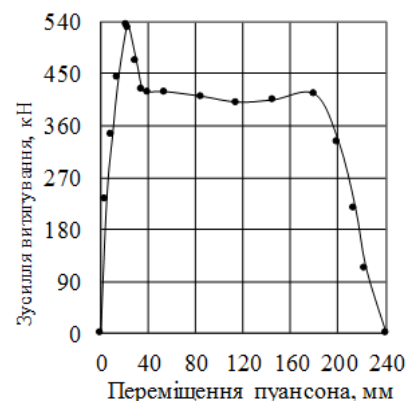


Рис. 4 – Залежність зусилля витягування від переміщення пуансона

Для проектування бандажованої матриці та пуансона необхідно знати розподіл питомих зусиль, які виникають при максимальній величині зусилля витягування. Питомі зусилля можна оцінити по розподілу нормальних напружень на контактуючих поверхнях між металом та деформуючим інструментом. Розподіл нормальних напружень σ_n при максимальному значенні зусилля витягування та температура T здеформованого металу приведені на рис. 5. Максимальні величини напружень σ_n виникають на конусній поверхні матриці та

досягають величини $\sigma_n=1600$ МПа (рис. 5а). Такі величини потребують використання банджованих матриць для реалізації витягування з потоншенням зпрофільованим пуансоном. При холодному формоутворенні витягуванням підвищується температура деформованого металу. Найбільшої величини температура досягає на початку усталеної стадії процесу витягування. Температура деформованого металу приведена на рис. 5б. Максимальне значення температури ($T=58$ °С) має місце в області донної частини, яка контактує з матрицею. Встановлені величини температури дозволяють уточнити вимоги до змащень, які використовують при холодному витягуванні.

При витягуванні зпрофільованим пуансоном відбувається заповнення деформованим металом впадин на боковій поверхні пуансона при деформуванні заготовки по конусній поверхні та калібруючому пояску матриці (рис. 6). Це забезпечує створення додаткового тягнучого зусилля за стінку деформованої заготовки при опусканні пуансона та приводить до зменшення розтягувальних осьових напружень σ_z у стінці в зазорі між пуансоном та матрицею.

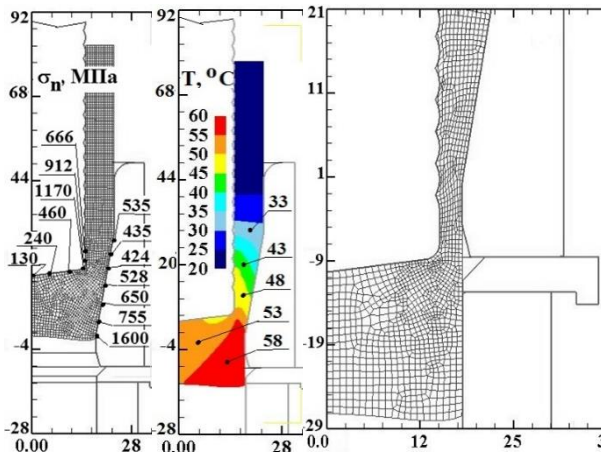


Рис. 5 – Розподіл нормальних напружень σ_n та температура T деформованого металу: а – розподіл σ_n , б – температура T

Рис. 6 – Заповнення металом впадин на боковій поверхні пуансона при деформуванні по конусній поверхні та в калібруючому пояску матриці

Розподіл напружень σ_z у деформованій заготовці при максимальному зусиллі витягування та на переході в усталену стадію, а також розподіл ступеня використання ресурсу пластичності ψ деформованого металу на переході в усталену стадію приведені на рис. 7. При максимальному зусиллі витягування в осередку деформації розтягувальні осьові напруження знаходяться в межах $\sigma_z=100\div300$ МПа (рис. 7а). У донній частині деформованої заготовки ці напруження стискаючі.

Величини розтягувальних напружень збільшуються і досягають максимальних значень на переході процесу витягування в усталену стадію (рис. 7б). У місці переходу донної частини у стінку

напруження складають $\sigma_z=530$ МПа, що в 1,5 рази менше чим при витягуванні з потоншенням традиційним пуансоном (див. рис. 3а). При цьому напруження σ_z у зовнішніх шарах металу конусної частини деформованої заготовки мають значення в межах $\sigma_z=150\div300$ МПа, а у внутрішніх шарах металу - $\sigma_z=0.00\div-150$ МПа. Останні величини напружень виникають в донній частині заготовки. Створена схема напружень в осередку деформації при витягуванні зпрофільованим пуансоном забезпечує зовсім інші величини ступеня використання ресурсу пластичності деформованого металу в порівнянні з витягуванням традиційним пуансоном.

Розподіл використаного ресурсу пластичності ψ на переході в усталену стадію приведений на рис. 7в. У місці переходу донної частини заготовки у стінку ресурс пластичності досягає максимального значення $\psi=0,9$ з подальшим зменшенням по довжині конусної частини деформованої заготовки до величини $\psi=0,2$.

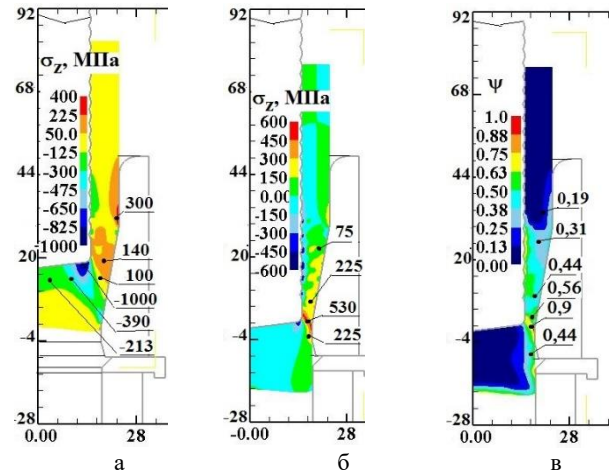


Рис. 7 – Розподіли осьових напружень σ_z у деформованій заготовці при максимальному зусиллі витягування та на переході в усталену стадію та розподіл ресурсу пластичності ψ на переході в усталену стадію: а і б – розподіли напружень σ_z , в – розподіл ресурсу пластичності ψ

Для встановлення можливості вирівнювання виступів на внутрішній поверхні виробу, які були утворені при витягуванні, проведено моделювання знімання з пуансона виробу, який розташований в обоймі. При розрахунку враховані накопичені деформації у деформованому металі, які отримані при витягуванні. При зворотному переміщенні пуансона зусилля знімання визначали на повзушках. Залежність зусилля знімання виробу від зворотного переміщення пуансона зображена на рис. 8. Максимальне значення зусилля отримане на початку знімання, що обумовлено найбільшою кількістю виступів, які заповнили впадини на боковій поверхні зпрофільованого пуансона.

В результаті моделювання знімання та вирівнювання виступів на внутрішній поверхні отримані кінцеві форма і розміри виробу. Форма і розміри виробу зображені на рис. 9. Загальний

вигляд половини виробу з розмірами приведений на рис. 9а. На рис. 9б показана форма і розміри донної частини виробу. При витягуванні відбувається викривлення торця цієї частини, яке складає 0,6 мм.



Рис. 8 – Залежність зусилля змінання виробу від зворотного переміщення пуансона

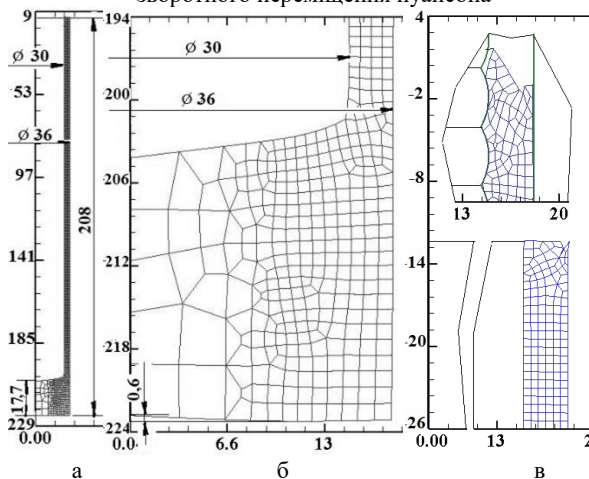


Рис. 9 – Форма і розміри виробу: а - загальний вигляд з розмірами половини виробу, б - форма і розміри донної частини виробу, в – форма торців стінки після витягування та змінання виробу

Форми торців стінок після витягування та змінання виробу показані на (рис. 9в). Торець стінки при змінанні дещо вирівнюється завдяки дії на нього повзушок. Після змінання на торці стінки має місце утяжина зі сторони зовнішньої поверхні.

При виготовленні деяких порожнистих виробів, крім отримання необхідної форми, необхідно забезпечити задані вимоги по механічних властивостях здеформованого металу у стінці виробу. Моделювання за допомогою МСЕ дозволяє прогнозувати напруження текучості здеформованого металу. По величині встановленої інтенсивності деформації та з використанням експериментальної діаграми істинних напружень, яка знаходиться в бібліотеці програми DEFORM, можна визначити напруження σ_s . На рис. 10 зображений розподіл накопиченої інтенсивності деформації ϵ_i

здеформованого металу виробу після витягування та вирівнювання виступів на його внутрішній

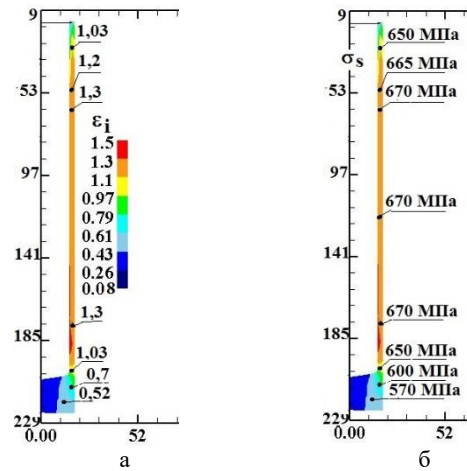


Рис. 10 – Розподіли інтенсивності деформацій ϵ_i та напруження текучості σ_s у здеформованому металі після змінання виробу: а - розподіл ϵ_i , б – розподіл σ_s

поверхні та величини напруження текучості σ_s цього металу, яке визначене по діаграмі істинних напружень. У місці переходу донної частини виробу в стінку та в області верхнього торця виробу отримано $\epsilon_i=1,03$. По всій довжині висоти стінки величина таких деформацій знаходиться в межах $\epsilon_i = 1,2 \div 1,3$. На третині ширини стінки у внутрішніх шарах металу отримано $\epsilon_i=1,3$ з подальшим зменшенням до величини $\epsilon_i=1,19$ до зовнішньої поверхні виробу. При даних розмірах вихідної заготовки і деформуючого інструмента по ширині стінки виробу відбувається практично рівномірне пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією. Вказане також є відмінністю від витягування з потоншенням традиційним пуансоном, при якому у зовнішніх шарах металу стінки має місце більш інтенсивне пропрацювання структури металу чим на внутрішніх.

По результатах розрахункових даних була розроблена конструкція штампа для витягування з потоншенням зпрофільованим пуансоном, яка приведена на рис. 11. Штмп містить одnobандажовану матрицю 1, яка розміщена на проміжній плиті 2 та закріплена до неї кільцем 3 і гвинтами 16. До проміжної плити 2 гвинтами 17 прикріплені корпус 4. В корпусі 4 встановлені дві повзушки 5 і 6, що піджимаються пружинами 18. Також до корпусу 4 прикручена обойма 7. В плити 2 запресовані дві колонки 8. За допомогою шести опор 9 проміжна плита встановлена та зафіксована гайками 19 на нижній плиті 10 штампа. До верхньої плити 11 штампа гвинтами 20 прикріплені пуансонотримач 12, в якому розміщені пуансон 13 і

опорна плита 14. В верхню плиту запресовані дві втулки 15.

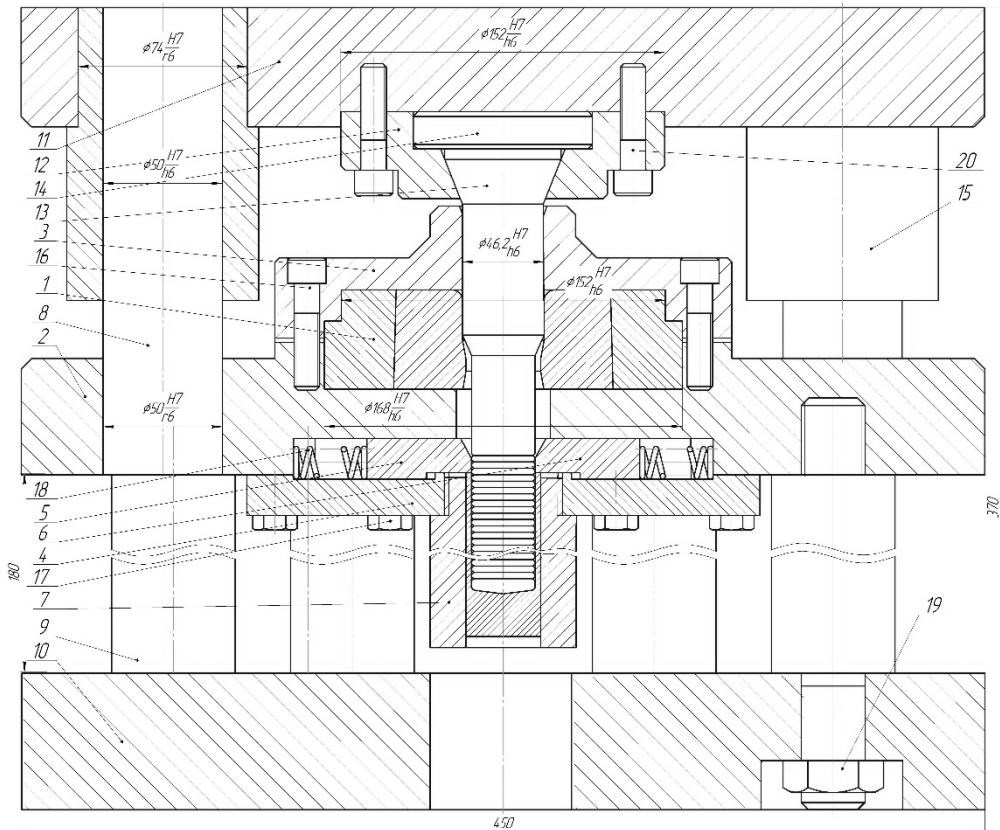


Рис. 11 – Конструкція штампа для витягування з потоншенням зпрофільованим пуансоном

Робота штампа. В матрицю 1 встановлюють вихідну заготовку. При опусканні верхньої плити 11 проходить процес витягування, який закінчується коли повзушки 5 і 6 почнуть спиратися на торець виробу. При зворотному русі верхньої плити 11 за допомогою повзушок забезпечується знімання виробу з пуансона 13.

Висновки:

1. З використанням метода скінченних елементів встановлені параметри холодного витягування з потоншенням порожнистих виробів зпрофільованим пуансоном із товстостінних заготовок, які отримані зворотним видавлюванням.

2. Показано, що використання зпрофільованого пуансона дозволяє суттєво зменшити розтягувальні осьові напруження, які виникають при витягуванні в місці переходу донної частини в стінку, в порівнянні з витягуванням традиційним пуансоном циліндричної форми. Це дозволило збільшити ступінь деформації при потонненні стінки та зменшити кількість переходів штампування.

3. Для витягування зпрофільованим пуансоном встановлені залежності зусилля витягування та зусилля знімання виробу з пуансона від переміщення пуансона. Виявлений розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті при максимальному зусиллі деформування.

4. Визначені кінцеві форма і розміри виробу. Показано, що використання зпрофільованого пуансона забезпечує більш рівномірне пропрацювання структури металу пластичною деформацією по ширині стінки виробу в порівнянні з витягуванням традиційним пуансоном.

5. Моделюванням визначений розподіл інтенсивності деформацій здеформованого металу виробу, що дозволило, з використанням експериментальної діаграми істинних напружень, встановити величину напруження текучості цього металу по висоті стінки та в донній частині виробу.

Список літератури

1. Ковка и объемная штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – т.3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. - М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под ред. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985-1987. – 544 с.
3. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев., А. Ю. Аверкиев. - М: Машиностроение, 1989. - 304 с.
4. Попов Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин // Учебник для вузов. – 2-е изд. - М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. – 478 с
5. Кривошеин В.А. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных при исследовании процесса обжима в матрице с кольцевыми канавками / В.А. Кривошеин // Известия вузов: Машиностроение. - 2011. - №5. – С. 10-12

6. *Калюжний О.В.* Зменшення кількості переходів витягування вісесиметричних виробів з використанням матриці спеціального профілю / О.В. Калюжний // Обробка матеріалів давлением: Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2013 р. -№4 (37). – С. 93-97.
7. *Калюжний О.В.* Зменшення зусилля та підвищення продуктивності формоутворення при комбінованому витягуванні вісесиметричних виробів / О.В. Калюжний // Вісник НТУ «ХПІ»: Серія «Нові рішення в сучасних технологіях», Харків, 2013 р. -№ 42.- С. 126-131.
8. *Калюжний О.В.* Порівняльний аналіз ефективності процесу комбінованого витягування в двоконусній матриці та матриці спеціального профілю / О.В. Калюжний // Обробка матеріалів давлением: Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2014 р. -№ 1(38). – С. 32-37.
9. *Калюжний О.В.* Інтенсифікація формоутворюючих процесів холодного листового штампування / О.В. Калюжний, В.Л. Калюжний. – К.: ТОВ «Сік Груп Україна». 2015. – 292 с.
10. *Калюжний О.В.* Комбіноване витягування вісесиметричних порожнистих виробів з листових заготовок із сталі ASSI-316L в одноконусній матриці та матриці спеціального профілю / О.В. Калюжний, С.С. Соколовська // Обробка матеріалів давлением: Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2016 р. – №1 (42). – С. 157-164.
11. *Калюжний О.В.* Інтенсифікація комбінованого витягування вісесиметричних порожнистих виробів в одноконусній матриці спеціального профілю // Обробка матеріалів давлением: Сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2017 р. – №1 (44). – С. 229-238.

Bibliography (transliterated)

1. Kovka y ob'ємnaia shtampovka: Spravochnyk. V 4-kht. / Red. sovet: E.Y. Semenov (pred.) y dr. . – t.3. Kholodnaia ob'ємnaia shtampovka / Pod red. H.A. Navrotskoho. - M.: Mashynostroenye, 1987. – 384 s.
2. Kovka y shtampovka: Spravochnyk: V 4 t. T. 4. Lystovaia shtampovka / Pod red.. A.D. Matveeva; Red. sovet: E.Y. Semenov (pred.) y dr. – M.: Mashynostroenye, 1985-1987. – 544 s.
3. Averkyev Yu. A. Tekhnolohyia kholodnoi shtampovky / Yu. A. Averkyev., A. Yu. Averkyev. - M: Mashynostroenye, 1989. - 304 s.
4. Popov E.A. Tekhnolohyia y avtomatyzatsyia lystovoi shtampovky / E.A. Popov, V.H. Kovalev, Y.N. Shubyn // Uchebnyk dlia vuzov. – 2-e yzd. - M: Yzd-vo MHTU ym. N.E. Bauman. 2003. – 478 s.
5. Kryvosheyn V.A. Sravnytelnyy analiz teoreticheskykh y eksperymentalnykh dannykh pry yssledovanuy protsesa obzhyama v matrytse s koltsevymy kanavkamy / V.A. Kryvosheyn // Yzvestyia vuzov: Mashynostroenye . – 2011. -№5. – S. 10-126.
6. Kaliuzhnyi O.V. Zmenshennia kilkosti perekhodiv vytyahuvannia visesymetrychnykh vyrobiv z vykorystanniam matrytsi spetsialnogo profilu / O.V. Kaliuzhnyi // Obrabotka materialov davleniem: Sbornik nauchnykh trudov. – Kramatorsk: DHMA, 2013 r. -№4 (37). - S. 93-97.
7. Kaliuzhnyi O.V. Zmenshennia zusyillia ta pidvyshchennia produktyvnosti formoutvorennia pry kombinovanomu vytyahuvanni visesymetrychnykh vyrobiv / O.V. Kaliuzhnyi // Visnyk NTU «KhPI»: Seriya «Novi rishennia v sучasnykh tekhnolohiiakh», Kharkiv, 2013 r. -№ 42.- S. 126-131.
8. Kaliuzhnyi O.V. Porivnialnyi analiz efektyvnosti protsesu kombinovanoho vytyahuvannia v dvokonusnii matrytsi ta matrytsi spetsialnogo profilu / O.V. Kaliuzhnyi // Obrabotka materialov davleniem: Sbornik nauchnykh trudov. – Kramatorsk: DHMA, 2014 r. -№ 1(38). – S. 32-37.
9. Kaliuzhnyi O.V. Intensyfikatsiia formoutvoriuiuchykh protsesiv kholodnoho lystovoho shtampuvannia / O.V. Kaliuzhnyi, V.L. Kaliuzhnyi. – K.: TOV «Sik Hrup Ukraina». 2015. – 292 s.
10. Kaliuzhnyi O.V. Kombinovane vytyahuvannia visesymetrychnykh porozhnistykh vyrobiv z lystovykh zahotovok iz stali ASSI-316L v odnokonusnii matrytsi ta matrytsi spetsialnogo profilu / O.V. Kaliuzhnyi, S.S. Sokolovska // Obrabotka materialov davleniem: Sbornik nauchnykh trudov. – Kramatorsk: DHMA, 2016 r. – №1 (42). – S. 157-164.
11. Kaliuzhnyi O.V. Intensyfikatsiia kombinovanoho vytyahuvannia visesymetrychnykh prozhnistykh vyrobiv v odnokonusnii matrytsi spetsialnogo profilu // Obrabotka materialov davleniem: Sbornik nauchnykh trudov. – Kramatorsk: DHMA, 2017 r. – №1 (44). – S. 229-238.

Надійшла (received) 03.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Визначення параметрів витягування з потоншенням зпрофільованим пуансоном порожнистих заготовок після зворотного видавлювання / О.В. Калюжний, В.Л. Калюжний, С.С. Соколовська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 21–28 – Библиогр.: 11 назв.– ISSN 2519-2671

Определение параметров вытяжки с утонением сprofilированным пуансоном полых заготовок после обратного выдавливания / А.В. Калюжний, В.Л. Калюжний, С.С. Соколовская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 21–28 – Библиогр.: 11 назв.– ISSN 2519-2671

Betermination of ironong the hollow workpieces by profiled punch parameters after backward extrusion / O.V. Kaluzhny, V.L. Kaluzhny, S.S. Sokolovska // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 21–28. – Bibl.:11. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

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

Калюжний Володимир Леонідович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», професор кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (098)273-44-19; e-mail: kwl_2011@ukr.net.

Калюжний Владимир Леонидович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», профессор кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (098)273-44-19; e-mail: kwl_2011@ukr.net.

Kaluzhny Vladimir Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", Professor of the Department of Mechanics of the Materials Plasticity and Resource Processes; tel.: (098)273-44-19; e-mail: kwl_2011@ukr.net.

Соколовська Світлана Сергіївна - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», аспірант кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (067)337-10-08; e-mail: sss711@i.ua.

Соколовская Светлана Сергеевна – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», аспирант кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (067)337-10-08; sss711@i.ua

Sokolovska Svitlana Sergiivna – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky", postgraduate student of the Department of Mechanics of the Materials Plasticity and Resource Processes; tel.: (067)337-10-08; e-mail: sss711@i.ua.

ДК 621.979.065: 621.98

В.В. КУХАРЬ, В.В. ГЛАЗКО, А.С. АНИЩЕНКО**РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ
ВНЕЦЕНТРЕННОЙ НАГРУЗКИ СИСТЕМЫ «ПРЕСС–ШТАМП»**

Рассмотрены различные типы эластомерных компенсаторов внецентренной нагрузки системы «пресс–штамп», выявлены их преимущества и недостатки. Особенностью выполненного обзора является анализ зарубежных, преимущественно американских и немецких, патентных источников. В результате выделены ряд конструктивных и функциональных признаков данных устройств, которые позволили разработать классификацию эластомерных компенсаторов, облегчающую выбор компенсатора для прессового оборудования. Предложено классифицировать компенсаторы по типам конструкций как плоские, объемные, мембранные и матричные, а по функциональному признаку как такие, которые устраняют перекосы системы «пресс–штамп», выравнивают давление, регулируются или не регулируются (для внецентренных нагрузок).

Ключевые слова: компенсатор, классификация, эластомер, внецентренная нагрузка, пресс, штамп.

Розглянуто різні типи еластомерних компенсаторів позацентрового навантаження системи «прес-штамп», виявлено їх переваги та недоліки. Особливістю виконаного огляду є аналіз зарубіжних, переважно американських і німецьких, патентних джерел. В результаті виділені ряд конструктивних і функціональних ознак даних пристроїв, які дозволили розробити класифікацію еластомерних компенсаторів, що полегшує їх вибір для пресового устаткування. Запропоновано класифікувати компенсатори за типами конструкцій як плоскі, об'ємні, мембранні і матричні, а за функціональною ознакою як такі, що усувають перекося системи «прес-штамп», вирівнюють тиск, регулюються або не регулюються (для позацентрових навантажень).

Ключові слова: компенсатор, класифікація, еластомер, позацентрове навантаження, прес, штамп.

Various types of elastomeric compensators of the eccentric load of the "press-die" system are considered; their advantages and disadvantages are revealed. The peculiarity of the completed review is the analysis of foreign, mainly American and German patent sources. A number of constructive and functional features of these devices have been singled out as a result which have made possible to develop a classification of elastomeric compensators for facilitate the choice of a compensators for different press equipments. Also the aim of the work is to apply the classification of elastomeric compensators of eccentric load in the "press-die" system to facilitate the selection of the most optimal designs for the specific conditions of the metal-forming process. During the development of the classification of elastomeric compensators, the following research methods were used: a literature review; patent search; system analysis. It is proposed to classify the compensators by the types of structures as flat, volumetric, membrane and matrix, and by functional criteria, such as those that eliminate the distortions of the "press-die" system, equalize the pressure, are regulated or not regulated (for eccentric loads). The cord-type compensator is identified as the most promising, which suitable for many operating conditions, but requiring the justification of calculation methods in perspective. Based on the results of the work, further areas of research have been determined and conclusions drawn.

Keywords: compensator, classification, elastomer, eccentric load, press, die.

Введение. Качественная штамповка различных материалов на прессовом оборудовании требует достижения определенной соосности ползуна прессы и штампа при монтаже и в процессе работы. Кроме того, при многоместной и многопереходной штамповке величина смещения оси приложения силы может существенно отличаться для каждого формообразующего элемента (ручья). В этих случаях упругие деформации, в виде погрешностей системы «пресс-штамп», могут достигать критических значений, приводящих к росту паразитных нагрузок. Следствием этого является повышенный износ направляющих оборудования и рабочих элементов штамповой оснастки. Это приводит к росту процента производственного брака, расходов на энергопотребление и ремонт прессов и оснастки.

Анализ последних исследований и публикаций. Компенсация отклонений взаимного расположения деталей и узлов является одной из наиболее сложных задач для конструкторов, технологов и ремонтников во всех отраслях современной промышленности [1]. При первичном монтаже деталей и узлов оборудования любых типов

затруднительно обеспечить идеальную соосность сопрягаемых элементов и параллельность их торцевых поверхностей [2, 3]. Кроме того, во время эксплуатации оборудования возникают нагрузки, вызванные дополнительными внутренними или внешними факторами. Они приводят к увеличению погрешностей относительного базирования сопрягаемых деталей и узлов [4]. К этим факторам можно отнести: износ базисующих элементов, перегрузки выше номинальных, внешнее механическое воздействие, вибрации, температурные деформации и т. д. Для обеспечения нормального функционирования разных типов оборудования путем устранения влияния первичных и вторичных погрешностей базирования сопрягаемых элементов применяются различные встроенные и дополнительные устройства. Геометрическая точность в процессе эксплуатации является одним из основных критериев эффективности производственного оборудования [5]. Ее параметры, главным образом, зависят от погрешностей станин. Станины прессов служат не только для монтажа узлов, но и для замыкания силовой цепи. Поэтому они

подвержены воздействию значительных нагрузок. Наиболее сложное напряженно-деформированное состояние испытывают открытые С-образные станины кузнечнопрессового оборудования [6–8].

Одним из путей снижения влияния перекоса станин является устранение непараллельности верхней и нижней базирующих плит при помощи различных дополнительных устройств или элементов – «компенсаторов». Основная цель их установки – обеспечить передачу рабочей нагрузки от базовых штамповых элементов, отклонившихся в результате деформации станины, к ответным базовым поверхностям штампа. Вторая важная цель, достигаемая компенсаторами, – выравнивание давлений по объему штампуемого изделия либо между рабочими объемами многопозиционных штампов.

Цель исследования. Целью выполненной работы было создание классификации эластомерных компенсаторов внецентренной нагрузки в системе «пресс-штамп» для облегчения выбора наиболее оптимальных конструкций компенсаторов применительно к конкретным условиям процесса штамповки.

Изложение основного материала. Известны конструкции механических (пружинных, шариковых, сферических и т.д.) [9–14] гидравлических и пневматических компенсаторов [15–17]. Все они в той или иной мере обладают своими недостатками: габаритность, конструктивная и технологическая сложность, низкая надежность. Большинство этих недостатков лишены эластичные полимерные компенсаторы. Материалом эластомерного компенсатора может быть, как резина, так и другие упругие полимеры. Изменение силовых характеристик компенсаторов на протяжении рабочего хода возможно за счет их продольного изгиба [18–19], при котором происходит перераспределение давления и формы рабочего элемента. Проектирование таких компенсаторов позволит получать конструкции с заданным повышением или понижением силовых характеристик, в зависимости от условий технологической нагрузки.

Однако, наиболее перспективным материалом для компенсаторов являются полиуретаны некоторых марок. Это связано с их высокой усталостной прочностью, широким диапазоном упругих свойств, простотой обработки и доступностью. Однако следует отметить ограниченный срок гарантированного сохранения исходных упругих характеристик полиуретанов, что связано с их постепенной дополимеризацией. Исследования физико-механических свойства полиуретанов и критерии их выбора для компенсаторов приведены в работе [20].

Рассмотрим подробнее применяемые конструкции эластомерных компенсаторов.

Мембранные эластомерные компенсаторы.

Эластомерные компенсаторы данного типа

представляют собой упругую полимерную мембрану между формообразующим элементом и полостью, заполненной гидравлической средой. Примером конструкции такого устройства для выравнивания рабочих усилий формообразующего инструмента в многоместных штампах является решение, предложенное в патенте [21] (рис. 1).

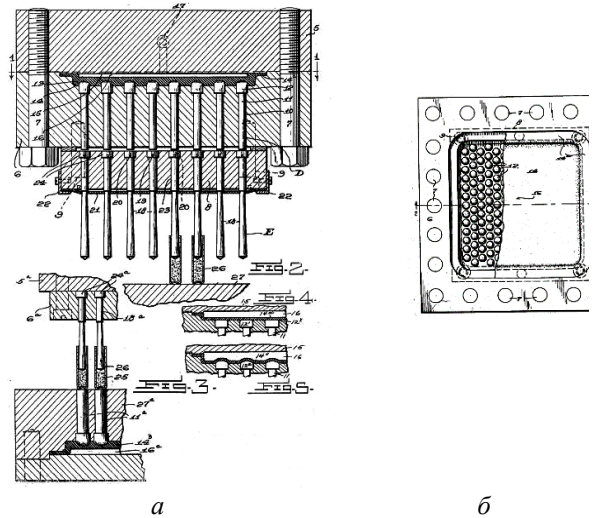


Рис. 1 – Прессующий механизм зарядов:
а – вид спереди; б – вид со стороны пуансонов

Принцип работы такого устройства заключается в выравнивании рабочих усилий между множеством пуансонов за счет их контакта с эластомерной мембраной. С другой стороны мембраны находится полость для гидравлической жидкости, давление которой может регулироваться. По мнению автора, это изобретение может быть особенно полезным при прессовании зарядов в гильзах, оболочках капсулей и детонаторов.

Другим вариантом реализации мембранной конструкции эластомерного компенсатора являются решения, предложенные в патентах [22–23] (рис. 2–3). Принцип действия предлагаемых конструкций заключается в выравнивании прогиба (отклонения от плоскостности) формующего элемента за счет избыточного давления гидравлической жидкости в полости под эластомерной мембраной.

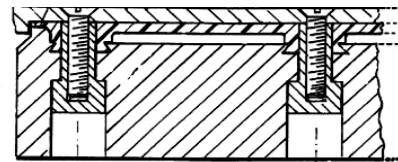


Рис. 2 – Плавающая плита для прессующих пуансонов

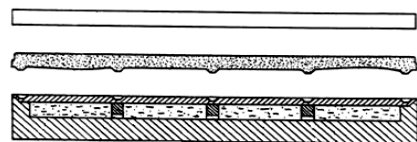


Рис. 3 – Штамп для керамической плитки

Конструктивно мембранні компенсатори мають всі ознаки як еластомерних, так і гідравлических компенсаторів. Основним недолугом розглянутої групи еластомерних компенсаторів є відсутність можливості переналадки без зміни еластичного елемента.

Матричні еластомерні компенсатори.

Основним загальним ознакою розглянутої групи компенсаторів можна вважати можливість набору компенсуючої матриці з уніфікованих компенсуючих елементів. Це дозволяє змінювати характеристики «компенсуючого поля» за рахунок установки елементів з різною еластичністю або установки рівноеластичних елементів в різному порядку. Одна з простіших конструкцій еластомерного точечного елемента для матричного поля запропонована в патенті [24] (рис. 4).

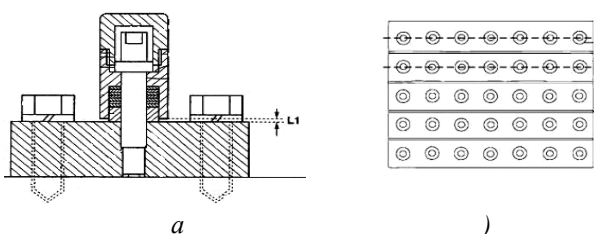


Рис. 4 – Штыревой амортизатор, несущая пластина, нагружаемое устройство, штамповая подушка, прессовое оборудование и метод прессования: а – общий вид упругого узла; б – расположение элементов в матричном поле

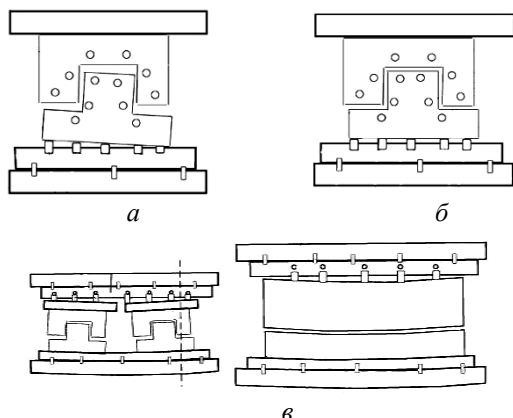


Рис. 5 – Самоустанавливающийся компенсатор штампа: а – компенсация перекоса закалочного штампа до закрытия; б – компенсация перекоса после закрытия; в – компенсация прогиба штамповых плит

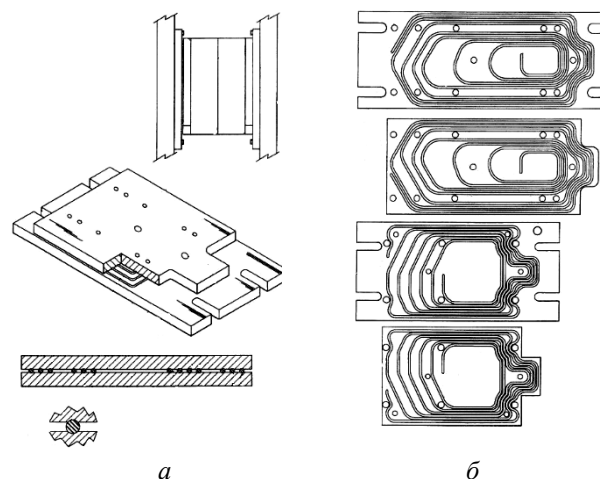


Рис. 6 – Самонастраивающаяся опорная плита пресс-формы: а – общий вид шнурового компенсатора; б – варианты монтажа шнурового компенсующего элемента

Типичный вариант формирования регулируемых «компенсующих полей» из эластомерных элементов предложен в патенте [25] (рис. 5). Как утверждает автор патента, предлагаемое матричное поле способно компенсировать не только погрешности закрытия штампов (на примере закалочного штампа), но и погрешности прогиба штамповых плит.

Конструкция перенастраиваемого матричного компенсатора на базе шнурового материала предложена в патенте [26] (рис. 6).

Несомненными достоинствами матричных компенсаторов являются простота переналадки, относительная малогабаритность в направлении нагружения и унификация упругих элементов.

Плоские эластомерные компенсаторы.

Плоские эластомерные компенсаторы конструктивно характеризуются тем, что их размеры по двум координатам несоизмеримо больше, чем в направлении приложения нагрузки (по третьей координате). Они предназначены для выравнивания давлений в объеме прессуемого материала. Компенсаторы данного типа нашли широкое применение при формовке листовых композитных материалов типа ДСП, OSB, текстолита, стеклотекстолита и т.д. Также подобные компенсаторы применяются при ламинировании вышеупомянутых материалов.

Операции горячего ламинирования сопровождаются потребностью в компенсаторах из материалов с высокой теплопроводностью для передачи температуры от нагревательных элементов, смонтированных в штамповых плитах, к наносимому покрытию. В патентах [27–29] (рис. 7–9) предложены варианты монтажа плоских эластомерных компенсаторов в рабочих зонах прессового оборудования. Авторами патента [30] (рис. 10) предложена многослойная переплетенная конструкция из нитеподобных материалов обладающих разными свойствами.

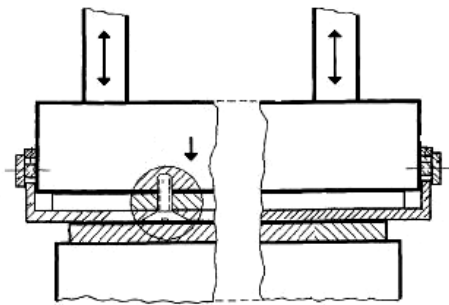


Рис. 7 – Прессовая оснастка для горячего прессования с прессующей плитой и минимум одной упругой подкладкой

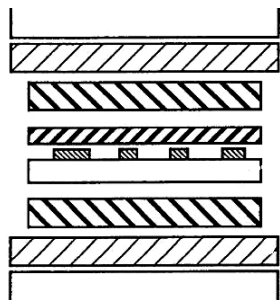


Рис. 8 – Резина для амортизирующей прокладки горячего прессования, способ изготовления этой амортизирующей прокладки горячего прессования и способ изготовления печатной платы

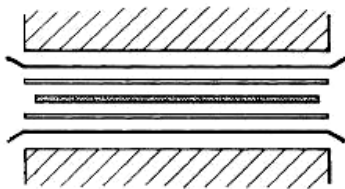


Рис. 9 – Подкладка прессы

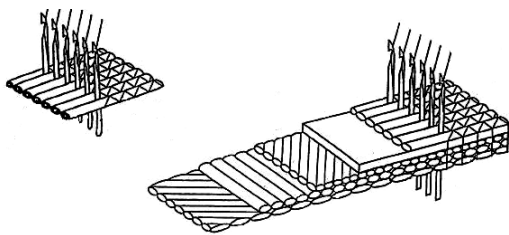


Рис. 10 – Прессующий амортизатор

Современные разработки в области подбора материалов плоских эластомерных компенсаторов приведены в патенте [31] (рис. 11). Авторы патента сделали колоссальную работу по систематизации, подбору тканых материалов и их компоновке для достижения заданных эксплуатационных свойств. Рассмотрены конструкции, сплетенные из хлопчатобумажных, шерстяных, полимерных, карбоновых тканей, стеклотканей и металлических армирующих сеток разных типов плетения.

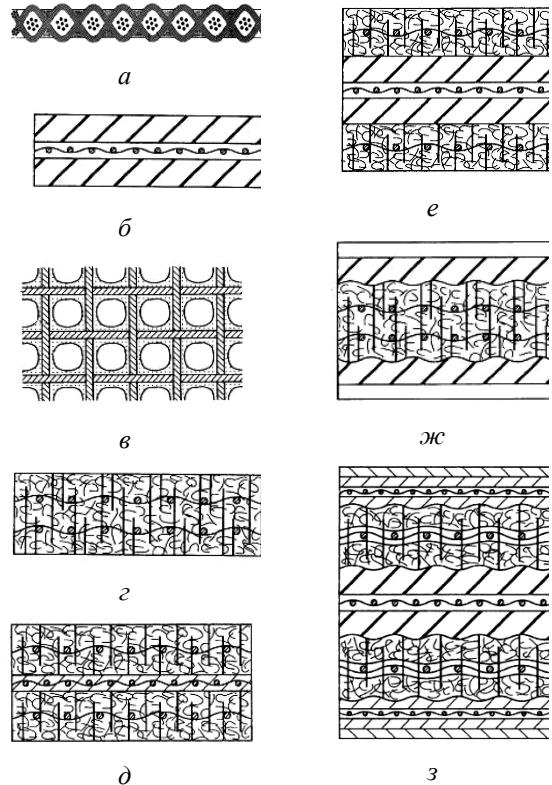


Рис. 11 – Композитные материалы для плоских компенсаторов (а–з – варианты компоновки волокон различных тканей)

Основными недостатками плоских эластомерных компенсаторов являются: а) отсутствие возможности переналадки без смены упругого элемента; б) ограниченная применяемость, связанная с конструктивными особенностями.

Объемные эластомерные компенсаторы. Объемные эластомерные компенсаторы, как следует из названия, конструктивно характеризуются габаритными размерами, имеющими относительно небольшую разницу в трех декартовых координатах.

На основании патентного поиска можно сделать вывод, что впервые эластомерный компенсатор предложен в патенте [32] (рис. 12), зарегистрированном в 1925 году фирмой Atlas Powder Company, занимавшейся производством боеприпасов. Принцип действия компенсирующего устройства заключался в наличии резинового амортизирующего элемента в основании пуансона, передающего к нему усилие прессования.

Близкой является конструкция, предложенная в патенте [33] (рис. 13) (правообладатель – Westinghouse Electric Corp.). Областью применения данной разработки стали пресса для порошковых материалов.

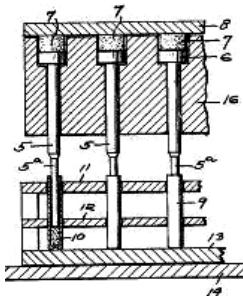


Рис. 12 – Амортизирующее устройство, обеспечивающее равномерное давление на взрывные заряды

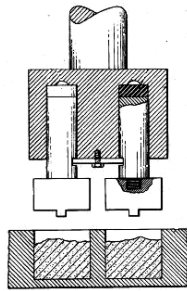


Рис. 13 – Многоместный штамповый выравниватель

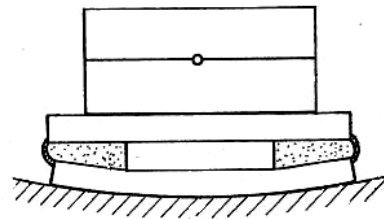


Рис. 16 – Многокомпонентное формовочное устройство промежуточным упругим элементом

Интересное решение компенсации перекосов штампа для глубокой вытяжки предлагается в патенте [34] (рис. 14) (правообладатель – Lockheed Corp). Оригинальность конструкции заключается в применении эластомера как промежуточного звена между пуансоном и тонким стальным формообразующим элементом.

Такой подход перераспределяет нагрузки при глубокой вытяжке и снижает вероятность утонения и как следствие порыва в слабых сечениях. Конструкция, аналогичная предыдущей, предлагается авторами патента [35] (рис. 15) (правообладатель – WD Media LLC).

Компенсация перекоса эластомерным компенсатором, возникшего в результате прогиба штамповых плит, предложена авторами патента [36] (рис. 16) (правообладатель – Desma Werke GmbH).

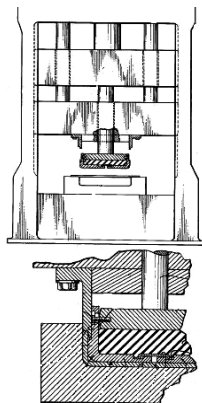


Рис. 14 – Устройство для листовой штамповки

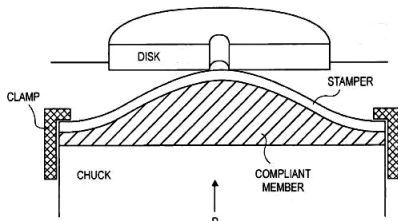


Рис. 15 – Штамп с герметизированным упругим элементом

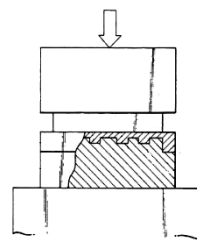


Рис. 17 – Штамп с несколькими упругими элементами

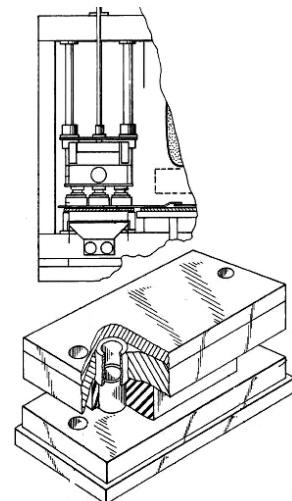


Рис. 18 – Устройство для штамповки бетонных изделий типа блок в клеточной форме

Весьма оригинальной следует считать конструкцию, представленную в патенте [37] (рис. 17): части компенсатора состоят из нескольких элементов различной упругости (жесткости), связанных концентрическими пазами.

Конструкции этих компенсаторов предусматривают наличие составного пуансона, между частями которого вмонтирован эластомерный компенсатор. Область применения таких компенсаторов – штамповка огнеупоров, кирпича и брикетов из порошковых материалов.

Близкие решения предложены авторами патентов [38, 39] (рис. 18 и рис. 19) (правообладатели – KVM Industrimaskiner AS и Longinotti meccanica SRL).

Интересна конструкция регулируемого эластомерного компенсатора, представленная в [40] (рис. 20). Данное устройство состоит из нижней плиты, эластомерного промежуточного элемента, имеющего несимметричные упругие свойства, и верхней составной стальной плиты, смещаемой с помощью регулировочного механизма. Настройка компенсатора осуществляется путем смещения опорной части верхней плиты по поверхности эластомера в направлении изменения его упругих свойств.

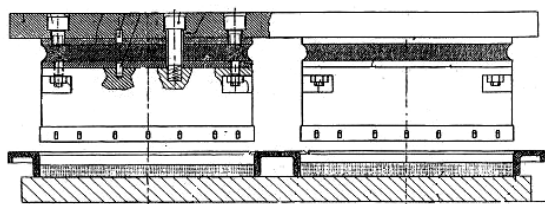


Рис. 19 – Система компенсации погрешности дозирования прессов для многоместного и одностоечного брикетирования или аналогичных операций

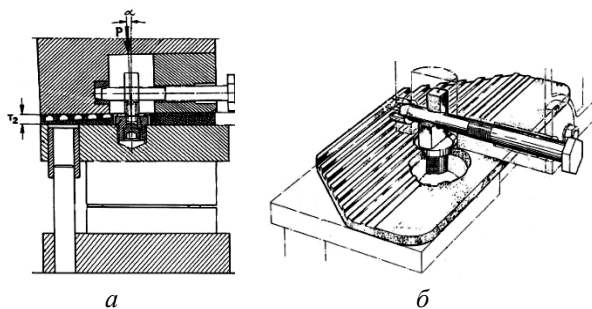


Рис. 20 – Метод и устройство для компенсации деформаций станины и эксцентриситета пресса: а – конструкция; б – принцип действия

Как показывает анализ конструкций объемных компенсаторов, они обладают широким спектром применения и возможностью перенастройки. Однако следует отметить, что механизмы регулировки для компенсаторов этой группы, существенно увеличивают их габариты.

Обсуждение результатов. Классификация эластомерных компенсаторов. В результате анализа конструкций упругих компенсаторов разработана их классификация. Её назначение – облегчить выбор типа компенсатора с требуемыми конструктивными характеристиками для конкретных условий их работы. Их классификацию можно произвести на основе функционального назначения и конструктивных признаков (рис. 21).

По конструктивным признакам эластомерные компенсаторы для прессового оборудования можно классифицировать следующим образом: 1) мембранные; 2) матричные; 3) плоские; 4) объемные.

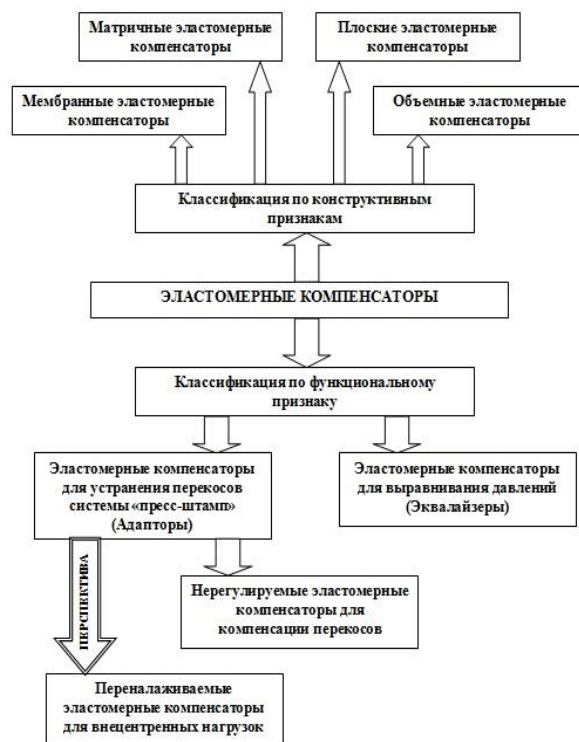


Рис. 21 – Классификация эластомерных компенсаторов

Как отмечено ранее, по функциональному назначению эластомерные компенсаторы для прессового оборудования делятся на: 1) выравниватели перекоса (погрешности направления приложения нагрузки); 2) «эквалайзеры» – выравниватели давлений по объему штампуемого изделия или между рабочими объемами многопозиционных штампов; 3) регулируемые и нерегулируемые эластомерные компенсаторы для внецентричных нагрузок. В разработанной классификации не рассматриваются устройства, близкие к компенсаторам, но ими не являющиеся, а именно: 1) прижимы заготовок для листовой штамповки; 2) мембраны диафрагменных экструзионных прессов; 3) эластомерный формообразующий инструмент.

Выводы.

1. Показано, что отсутствие алгоритма выбора оптимальных конструкций эластомерных компенсаторов ограничивает их применение. На основании системного анализа конструкций и принципов действия эластомерных компенсаторов системы «пресс-штамп» разработана их классификация по функциональным и конструктивным признакам.

2. В процессе исследования было обосновано, что в качестве основного материала эластомерных компенсаторов наиболее перспективными являются полиуретаны некоторых марок. Это связано с их высокой усталостной прочностью, широким диапазоном упругих свойств, инертностью к

большинству агрессивных сред, простотой обработки и доступностью.

3. Установлено, что конструкции регулируемых эластомерных компенсаторов позволяют устранить влияние внецентрированной силы, действующей в системе «пресс-штамп», однако их широкому применению препятствует отсутствие эффективных расчетных методик.

Список литературы

- Norton, R. L. *Machine design: An integrated approach*. Upper Saddle River / R. L. Norton. – NJ : Pearson Prentice Hall, 2006.
- Smith, D. A. *Why press slide out of parallel problems affect part quality and available tonnage* / D. A. Smith // Dearborn, MI : Society of Manufacturing Engineers, 1988.
- Bringmann, B. *Improving geometric calibration methods for multi-axis machining centers by examining error interdependencies effects* / B. Bringmann. – Zürich : ETH, 2007.
- Dasgupta, A. *Material Failure Mechanisms and Damage Models*. / A. Dasgupta, M. Pecht // IEEE Transactions on Reliability. – 1991. – 40(5). – P. 531-536. – doi : 10.1109/24.106769.
- Schwenke, H. *Geometric error measurement and compensation of machines - An update*. *CIRP Annals* / H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, F. Delbressine // *Manufacturing Technology*, 2008. – 57(2). – P. 660-675. – doi:10.1016/j.cirp.2008.09.008.
- Dan, I. *Methods to Increase the Rigidity of the C-Frame of a Press*. / I. Dan, R. Cioara // *Applied Mechanics and Materials*, 2013. – V. 371. – P. 183-187. – doi:10.4028/www.scientific.net/amm.371.183.
- Bi, D. S. *Finite Element Analysis on Frame-Type Hydraulic Press* / D. S. Bi, D. D. Liu, L. Chu, J. Zhang // *Advanced Materials Research*, 2011. – No. 199-200, P. 1623-1628. – doi:10.4028/www.scientific.net/amr.199-200.1623.
- Chauhan, H. N. *Design & Analysis of Frame of 63 Ton Power Press Machine by Using Finite Element Method* / H. N. Chauhan, M. P. Bambhanian // *Indian Journal of Applied Research*, 2011. – 3(7). – P. 285-288. – doi:10.15373/2249555x/july 2013/88.
- Pat. 1827440 USA. MPK B21D24 / 02. Spring cushion for press / F. J. Rode. – 13.10.1931.
- Pat. 3200508 USA. MPK B21D5 / 02. Press brake die alignment indicator device. / H. J. Harper. – 17.08.1965.
- Pat. 0327115 USA MPK B21D22 / 02. Load-applying device, press-forming die, and press-forming method / T. Yoshida, D. Toyoda. – 12.12.2013.
- Pat. 7320584 USA MPK B28B11 / 08. Die set having sealed compliant member. / B. M. Harper, C. H. Bajorek. – 22.01.2008.
- Pat. 5858422 USA MPK B29C45 / 64. Pressure and alignment compensator for a press / P. Brams. – 12.01.1999.
- Pat. Application Publication 0008628 USA MPK B30C15 / 06. Compensator for unbalanced compression forges for press machines / A. Bordignon. – 08.01.2015.
- Pat. 4272980 USA MPK B21J13/02. Load equalizer for press tooling / L. F. Carrieri. – 16.01.1981.
- Pat. 4635466 USA MPK B21J9 / 18. Die cushion apparatus for use in a press machine / S. Seki, K. Aoshima. – 13.01.1987.
- Pat. 5339665 USA MPK B21B24 / 14. Die-cushion apparatus of press machine / E. Yoshikawa. – 23.08.1994.
- Kukhar, V. *Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling*. / V. Kukhar, V. Burko, A. Prysiaznyi, E. Balalayeva, M. Nahnibeda // *East-European Journal of Enterprise Technology*. – 2016. – 3/7(81). – P. 53-61. – doi:https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72063.
- Kukhar, V. *Form of Gradient Curve of Temperature Distribution of Lengthwise the Billet at Differentiated Heating before Profiling by Buckling* / V. Kukhar, V. Artiukh, O. Serduik, E. Balalayeva // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 165. – P. 1693-1704. – doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.911.
- Artiukh, V. *Peculiarities of Mechanical Characteristics of Contemporary Polyurethane Elastomers* / V. Artiukh, S. Karlushin, E. Sorochan // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 117. – P. 938-944. – doi:10.1016/j.proeng.2015.08.180.
- Pat. 2005260 USA, MPK F42B33 / 02. Press Mechanism / D. D. Hyuett. – 18.06.1935.
- Pat. 5599566 USA. MPK B30B15 / 06. Floating plane for press punches / F. Casolari. – 04.02.1997.
- Pat. 5330346 USA. MPK B29C43 / 00. Die for ceramic tiles / I. Scardovi. – 19.06.1994.
- Pat. 7243521 MPK B21D22 / 20. Cushion pin, wear plate, load supporting device, die cushion, press machine and pressing method / Kiyoji Aoshima, Kiyokazu Baba. – 17.07.2007.
- Pat. 2990192 EP. MPK B30B 15 / 06. Pressumformwerkzeug mit toleranzausgleich / G. Frost, O. Lütkemeyer, J. Köster. – 27.08.2014.
- Pat. 5700496 USA. MPK B28B 21 / 82. Self-adjusting mold backplate / C. R. Bacon. – 23.12.1997.
- Pat. 7465371 USA. MPK B32B 37 / 00. Hot pressing apparatus with a pressure plate and at least one resilient lining / W. Bachmann. – 16.12.2008.
- Pat. 6391460 USA. MPK B32B15 / 06. Rubber for hot press cushioning pad, manufacturing method thereof hot press cushioning pad and method of manufacturing printed circuit board / A. Tanaka, A. Yoshida. – 21.05.2002.
- Pat. 5855733 USA. MPK B30B15 / 02. Press pad / M. Douglas, P. Boyes, J. L. Payne. – 05.01.1999.
- Pat. 6413889 USA. MPK D04B1 / 00. Pressing cushion. / W. Best, R. Caldenhoff. – 02.06.2002.
- Pat. 6514888 USA. MPK B232B5 / 00. Cushioning material for forming press / A. Tanaka, A. Yoshida. – 04.02.2003.
- Pat. 1546376 USA. MPK F42B33 / 02. Device for insuring uniform pressure upon explosive charges. / B. Grotta. – 11.04.1925.
- Pat. 2381272 USA. MPK B30B15 / 06. Multiple die Equalizer / E. H. Fischer. – 07.08.1945.
- Pat. 2966873 USA. MPK B21D22 / 00. Device for forming sheet material / F. C. Hoffman. – 03.01.1961.
- Pat. 7320584 USA. MPK B28B11 / 08. Die set having sealed compliant member / B. M. Harper, C. H. Bajorek. – 22.01.2008.
- Pat. 3038274 DE. MPK B29C1 / 16. Formvorrichtung mit einer zwischen Druckplatten eingespannten, mehrteiligen Form / H. Meissner, E. Bolte. – 10.10.1980.
- Pat. 5094796 USA. MPK B28B3 / 00. Elastically deformable die and method of die forming using the die. / M. Catch, K. Hibino. – 10.03.1992.
- Pat. 4959003 USA. MPK B28B1 / 08. Device for die-casting of concrete goods such as block stones in a cellular mould / A. R. Gregersen. – 25.09.1990.
- Pat. 1240998 EP. MPK B30B15 / 06. Système de compensation des erreurs de dosage sur des presses pour briquettes à plusieurs cavités, en particulier pour briquettes monocouches ou similaires / A. Longinotti. – 18.09.2002.
- Pat. 0480990 EP. MPK B30B15 / 08. Method and device for compensating the deformation of the frame in an excenter press / Knut Olof Lennart Wallman. – 22.02.1995.

Bibliography (transliterated)

- Norton, R. L. *Machine design: An integrated approach*. Upper Saddle River, NJ, Pearson Prentice Hall, 2006.
- Smith, D. A. *Why press slide out of parallel problems affect part quality and available tonnage*. Dearborn, MI, Society of Manufacturing Engineers, 1988.
- Bringmann, B. *Improving geometric calibration methods for multi-axis machining centers by examining error interdependencies effects*. Zürich : ETH, 2007.
- Dasgupta, A., Pecht, M. *Material Failure Mechanisms and Damage Models*. *IEEE Transactions on Reliability*, 1991, 40(5), 531-536, doi:10.1109/24.106769.
- Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R., Delbressine, F. *Geometric error measurement and compensation of machines - An update*. *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, 2008, 57(2), 660-675, doi:10.1016/j.cirp.2008.09.008.

6. Dan, I., Cioara, R. Methods to Increase the Rigidity of the C-Frame of a Press. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 371, 183-187, doi:10.4028/www.scientific.net/amm.371.183.
7. Bi, D. S., Liu, D. D., Chu, L., Zhang, J. Finite Element Analysis on Frame-Type Hydraulic Press. *Advanced Materials Research*, 2011, 199-200, 1623-1628, doi:10.4028/www.scientific.net/amr.199-200.1623.
8. Chauhan, H. N., Bambhania, M. P. Design & Analysis of Frame of 63 Ton Power Press Machine by Using Finite Element Method. *Indian Journal of Applied Research*, 2011, 3(7), 285-288, doi:10.15373/2249555x/july2013/88.
9. Pat. 1827440 USA. MPK B21D24 / 02. Spring cushion for press, F. J. Rode, 13.10.1931.
10. Pat. 3200508 USA. MPK B21D5 / 02. Press brake die alignment indicator device, H. J. Harper, 17.08.1965.
11. Pat. 0327115 USA. MPK B21D22 / 02. Load-applying device, press-forming die, and press-forming method, T. Yoshida, D. Toyoda, 12.12.2013.
12. Pat. 7320584 USA. MPK B28B11 / 08. Die set having sealed compliant member, B. M. Harper, C. H. Bajorek, 22.01.2008.
13. Pat. 5858422 USA. MPK B29C45 / 64. Pressure and alignment compensator for a press, P. Brams, 12.01.1999.
14. Pat. Application Publication 0008628 USA. MPK B30C15 / 06. Compensator for unbalanced compression forges for press machines, A. Bordignon, 08.01.2015.
15. Pat. 4272980 USA. MPK B21J13/02. Load equalizer for press tooling, L. F. Carrieri, 16.01.1981.
16. Pat. 4635466 USA. MPK B21J9 / 18. Die cushion apparatus for use in a press machine, S. Seki, K. Aoshima, 13.01.1987.
17. Pat. 5339665 USA. MPK B21B24 / 14. Die-cushion apparatus of press machine, E. Yoshikawa, 23.08.1994.
18. Kukhar, V., Burko, V., Prysiaznyi, A., Balalayeva, E., Nahnbida, M. Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling, *East-European Journal of Enterprise Technology*, 2016, 3/7(81), 53-61, doi:http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72063.
19. Kukhar, V., Artiukh, V., Serduik, O., Balalayeva, E. Form of gradient curve of temperature distribution of lengthwise the billet at differentiated heating before profiling by buckling, *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 165, 1693-1704, http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.911.
20. Artiukh, V., Karlushin, S., Sorochan, E. Peculiarities of Mechanical Characteristics of Contemporary Polyurethane Elastomers, *Procedia Engineering*, 2015, Vol. 117, 938-944, doi:10.1016/j.proeng.2015.08.180.
21. Pat. 2005260 USA. MPK F42B33 / 02. Press Mechanism. Hyuett D. D. – 18.06.1935.
22. Pat. 5599566 USA. MPK B30B15 / 06. Floating plane for press punches, F. Casolari, 04.02.1997.
23. Pat. 5330346 USA. MPK B29C43 / 00. Die for ceramic tiles, I. Scardovi, 19.06.1994.
24. Pat. 7243521 MPK B21D22 / 20. Cushion pin, wear plate, load supporting device, die cushion, press machine and pressing method, Kiyoji Aoshima, Kiyokazu Baba, 17.07.2007.
25. Pat. 2990192 EP. MPK B30B 15 / 06. Pressumformwerkzeug mit toleranzausgleich, G. Frost, O. Lütkemeyer, J. Köster, 27.08.2014.
26. Pat. 5700496 USA. MPK B28B 21 / 82. Self-adjusting mold backplate, C. R. Bacon, 23.12.1997.
27. Pat. 7465371 USA. MPK B32B 37 / 00. Hot pressing apparatus with a pressure plate and at least one resilient lining, W. Bachmann, 16.12.2008.
28. Pat. 6391460 USA. MPK B32B15 / 06. Rubber for hot press cushioning pad, manufacturing method thereof hot press cushioning pad and method of manufacturing printed circuit board, A. Tanaka, A. Yoshida, 21.05.2002.
29. Pat. 5855733 USA. MPK B30B15 / 02. Press pad, M. Douglas, P. Boyes, J. L. Payne, 05.01.1999.
30. Pat. 6413889 USA. MPK D04B1 / 00. Pressing cushion, W. Best, R. Caldenhoff, 02.06.2002.
31. Pat. 6514888 USA. MPK B232B5 / 00. Cushioning material for forming press, A. Tanaka, A. Yoshida, 04.02.2003.
32. Pat. 1546376 USA. MPK F42B33 / 02. Device for insuring uniform pressure upon explosive charges, B. Grotta, 11.04.1925.
33. Pat. 2381272 USA. MPK B30B15 / 06. Multiple die Equalizer, E. H. Fischer, 07.08.1945.
34. Pat. 2966873 USA. MPK B21D22 / 00. Device for forming sheet material, F. C. Hoffman, 03.01.1961.
35. Pat. 7320584 USA. MPK B28B11 / 08. Die set having sealed compliant member. B. M. Harper, C. H. Bajorek. – 22.01.2008.
36. Pat. 3038274 DE. MPK B292C1 / 16. Formvorrichtung mit einer zwischen druckplatten eingespannten, mehrteiligen form, H. Meissner, E. Bolte, 10.10.1980.
37. Pat. 5094796 USA. MPK B28B3 / 00. Elastically deformable die and method of die forming using the die, M. Catoh, K. Hibino, 10.03.1992.
38. Pat. 4959003 USA. MPK B28B1 / 08. Device for die-casting of concrete goods such as block stones in a cellular mould, A. R. Gregersen, 25.09.1990.
39. Pat. 1240998 EP. MPK B30B15 / 06. Système de compensation des erreurs de dosage sur des presses pour briquettes à plusieurs cavités, en particulier pour briquettes monocouches ou similaires, A. Longinotti, 18.09.2002.
40. Pat. 0480990 EP. MPK B30B15 / 08. Method and device for compensating the deformation of the frame in an excenter press, Knut Olof Lennart Wallman, 22.02.1995.

Поступила (received) 13.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Разработка классификации эластомерных компенсаторов внецентричной нагрузки системы «пресс-штамп» / В. В. Кухарь, В. В. Глазко, А. С. Анищенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 29–37 – Библиогр.: 40 назв. – ISSN 2519-2671

Розробка класифікації еластомірних компенсаторів позацентрового навантаження системи «пресс-штамп» / В. В. Кухарь, В. В. Глазко, А. С. Анищенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 29–37 – Библиогр.: 40 назв. – ISSN 2519-2671

Development of Classification of Elastomeric Compensators of Eccentric Load for "Press-Die" System. / Kukhar, V., Glazko, V., Anishchenko, A. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 29–37. – Bibl.:40. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кухарь Владимир Валентинович – доктор технических наук, профессор, Государственное высшее учебное заведение «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.

Глазко Владислав Владимирович – аспирант кафедры обработки металлов давлением, Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет»; г. Мариуполь, Украина; e-mail: glazkovlad@email.ua.

Vladislav Glazko – Postgraduate Student, Metalforming Department, Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine; e-mail: glazkovlad@email.ua.

Анищенко Александр Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Государственное высшее учебное заведение «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.

УДК 621.879

В.В. ЛОТЮС, В.В. ДРАГОБЕЦКИЙ, 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 висновків. 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.

Key words: 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 определенной 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]

Повышение износостойкости срока эксплуатации деталей горного оборудования чрезвычайно актуально для предприятий, работающих в этой отрасли и для всей экономики Украины в целом. 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 конкурентноспособных 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 ($\delta=2,5-8,0$) 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 (шпы, наконечники и т.д.). Тем не менее методы конструирования, исключая ударное действие породы, совершенно не используются. Незначительное изменение конструкции, которое связано с применением вибропоглощающих 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. Микротрещины, возникающие в процессе ударно-абразивного износа, не достигают опасной степени развития. Однако утверждение о том, что износостойкость 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 износостойкость 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 износостойкость 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 контактом 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 поверхности устанавливался 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 индуктивных методов. Кластеризация вариантов производится с использованием определенной или введенной меры сходства по следующим аспектам: техника, функциональные возможности, область применения.

С точки зрения 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 термомагнитных, а также внутреннего и фотограмного 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 кривошипноползунных механизма. Апробирование процесса было проведено на коронках зубьев ковшей экскаватора (рис. 1) изготовленных из высокопрочной нержавеющей стали с исходной твердостью HB 330-350. После ударно-фрикционного упрочнения твердость повысилась до HB 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.

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

Список литературы

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. Dragobetskiy // MMI Вісник національного технічного

- університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудування», 2013. - № 67 (23.04.2013).
5. Драгобецький В.В. Упрочнение зубьев ковшей экскаваторов с использованием пластической деформации взрывом / В.В. Драгобецький, А.А. Шаповал, Д. В. Мосьпан, 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. Драгобецький // *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. Драгобецький, 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. Драгобецький, О.В. Троцько // *Научно-технический журнал «Авиационно-космическая техника и технология»*. – Харьков «ХАИ». - № 11, 2007. с. 62-72.
 9. Драгобецький В.В. Новые триботехнологии плакирования с применением взрывного нагружения / В. В. Драгобецький, О.В.Троцько, Д.Л. Пирогов // *Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-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. Мосьпан, В. В. Драгобецький // *Металлург*, 2016, № 3 – С. 86 – 89
- teeth of excavator buckets with the use of plastic deformation by explosion] / V.V.Dragobekij // *Tehnologija mashinostroenija: zhurnal*. – Rossijskaja federacija, 2003. – Vyp. 5 (23). – s. 10-12.
4. Lotous V. New explosive welding techniques / V. Lotous, V. Dragobetskii // *MMI Visnik nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraїni «Kiїvs'kij politehničnij institut»*. Serija «Mashinobuduvannja», 2013. - № 67 (23.04.2013).
 5. Dragobekij V.V. Uprochnenie zub'ev kovshej jekskavatorov s ispol'zovanіem plasticheskoj deformacii vzryvom [Hardening of teeth of excavator buckets with the use of plastic deformation by explosion] / V.V. Dragobekij, A.A. Shapoval, D. V. Mos'pan, V.V.Lotous // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*, 2015 №2. – S 38-42
 6. Lotous V.V. Novyj metod vzryvnogo uprochnenii jelementov gornogo oborudovanija [New method of explosive hardening of elements of mining equipment]/ V.V. Lotous, V.V. Dragobekij, V.V // *Suchasni resursoenergozberigajuchi tehnologii girnichogo virobničtva: naukovo-virobnichij zhurnal*. – Kremenčuk: KrNU, 2012. – Vip. 2/2012 (10). – S. 68–73.
 7. Naumova E.A. Sovershenstvovanie tehnologij vzryvnogo kompaktirovanija poroshkovyh smesej karbidov i kobal'ta [Perfection of technologies for explosive compacting of powder mixtures of carbides and cobalt]/ E.A. Naumova, V.V. Lotous, G.L. Dubrov, V.V. Dragobekij, O. V. Gnatenko // *Visnik NTU «HPІ»*. 2013. № 42 (1015) s. 131-135
 8. Borisevich V.K. Mnogofaktornost' fizicheskikh javlenij pri vzryvnoj metalloobrabotke [Multifactority of physical phenomena in explosive metalworking] // V. K. Borisevich, V. V. Dragobekij, O.V. Trocko // *Nauchno-tehnicheskij zhurnal «Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija»*. – Har'kov «HAI». - № 11, 2007. s. 62-72.
 9. Dragobekij V.V. Novye tribotehnologii plakirovanija s primenenіem vzryvnogo nagruženija [New tribotechnology of cladding with explosive loading]/ V. V. Dragobekij, O.V.Trosko, D.L. Pirogov // *Materіali VIII Mizhnarodnoї naukovo-tehničnoї konferencії «AVIA-2007»*.- Kiїv, 2007.- tom 2. – 32.60–32.63 s.
 10. Shapoval A. A. Obespechenie vysokih jekspluatacionnyh harakteristik bimetallov, svarenyh vzryvom [Providing high performance characteristics of bimetal boiled in explosion]/ A. A. Shapoval, D. V. Mos'pan, V. V. Dragobekij // *Metallurg*, 2016, № 3 – С. 86 – 89.

References (transliterated)

Поступила (received) 03.11.2017

Библиографические описания / Бібліографічні описи / Bibliographic description

Новый метод упрочнения деталей горного оборудования / В. В. Лотоус, В. В. Драгобецький, 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. – №36(1258). – С. 38–42 – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671

Новий метод зміцнення 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. – №36(1258). – С. 38–42 – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671

A new method of strengthening mining equipment parts / V. V. Lotous, V. V. Dragobekii, 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 36(1258). – P. 37–412 – Bibl.:10. – ISSN 2519-2671

Сведения об авторах / Відомості про авторів / About the Authors

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

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

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

Драгобецкий Владимир 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.

Dragobeckii Volodymyr Viacheslavovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Chief of the Department of Manufacturing Technology; тел.: (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 Ostrohradskiy National University, Associate Professor at the Department of Manufacturing Technology; тел.: (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 Ostrohradskiy National University, Engineer at the Department of Manufacturing Technology; тел.: (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 Ostrohradskiy National University; тел.: (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 Ostrohradskiy National University**, Professor at the Department of Marketing; тел.: (05366) 3-71-13; e-mail: vldrag@kdu.edu.ua.

УДК 621.771.06

Ю.Д. МУЗЫКИН, А.В. ГАЙДАМАКА, В.В. ТАТЬКОВ, И.Н. БЕЛИЧЕНКО, А.Н. ДУДАКОВ**ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАБОТЫ ГЛАВНЫХ ПРИВОДОВ ЗАГОТОВОЧНЫХ СТАНОВ**

Достоверность диагностики технического состояния главных приводов заготовочных станов возможна только при условии объективности контроля всех подвижных узлов и элементов по длине кинематической цепи. Реализация данного требования достигается за счет контроля суммарного зазора во всех кинематических парах, участвующих в передаче рабочей нагрузки. Используя эксплуатационные наблюдения, устанавливается закон эмпирического распределения изменения величины зазора. При условии нормального закона распределения и используя метод линейного суммирования повреждений, определяется остаточный ресурс безотказной работы главных приводов заготовочных станов. Предложена методика проведения мониторинга технического состояния силового привода. Методика позволяет прогнозировать остаточный ресурс безаварийной работы, а, следовательно, планировать техническое обслуживание, исключающее аварийный выход из строя подвижных сопряжений.

Ключевые слова: заготовочный стан, надежность, диагностика, критерии оценки, закон распределения, остаточный ресурс.

Вірогідність діагностики технічного стану головних приводів заготовочних станів можлива лише при умові об'єктивності контролю усіх рухливих вузлів та елементів вздовж кінематичного ланцюга. Реалізація цієї вимоги досягається за рахунок контролю сумарного зазору у всіх кінематичних парах, приймаючих участь в передачі робочого навантаження. Використовуючи експлуатаційні спостереження, встановлюється закон емпіричного розподілу зміни величини зазору. При умові нормального закону розподілу та використовуючи метод лінійного підсумовування ушкоджень, встановлюється залишковий ресурс безвідмовної роботи головних приводів заготовочних станів. Наведена методика проведення моніторингу технічного стану силового привода. Методика дозволяє прогнозувати остаточний ресурс безаварійної роботи і, як наслідок, планувати технічне обслуговування, що виключає можливість аварійного виходу з ладу рухливих з'єднань.

Ключові слова: заготовочний стан, надійність, діагностика, критерії оцінки, закон розподілу, залишковий ресурс.

The reliability of diagnostics of the technical condition of the main drives of billet mills is possible only if all mobile units and elements are objectively controlled along the length of the kinematic chain. The implementation of this requirement is achieved by monitoring the total gap in all kinematic pairs involved in transferring the workload. Using operational observations, the law of empirical distribution of the variation in the size of the gap is established. Under the condition of the normal distribution law and using the method of linear summation of damages, the residual service life of the main drives of the billet mills is determined. The technique for monitoring the technical state of the power drive is proposed. The technique allows to predict the residual service life of a trouble-free operation, and, consequently, to plan maintenance, which eliminates the emergency failure of mobile mates.

Keywords: billet mill, reliability, diagnostics, evaluation criteria, distribution law, residual resource.

Введение. Анализ кинематических схем главных приводов заготовочных станов, к которым относятся блюминги, слябинги и непрерывные заготовочные станы, показывает, что все они могут быть сведены к квазиплоской кинематической цепи, в которой все элементы имеют последовательное соединение и лежат в одной либо параллельных плоскостях. В этом случае кинематические пары имеют одну либо две подвижности, то есть отвечают требованиям 5 и 4 класса. Если предположить, что все связи независимые, то, согласно структурной формуле П.Л. Чебышева, степень подвижности механических приводов для всех станов равна единице, а, следовательно, системы статически определимы [1]. Однако, в реальных условиях такое допущение не является строгим, так как не учитывает характер нагружения всех звеньев, принимающих участие в работе силового привода. Кроме того, всегда имеют место естественные отклонения в линейных и угловых размерах звеньев и кинематических пар, которые приводят к появлению дополнительных связей и, следовательно, система становится статически неопределимой. В результате создаются условия, стимулирующие еще большие линейные и угловые рассогласования, приводящие к таким негативным явлениям, как шум, вибрации, повышения температуры в кинематических парах, снижение КПД.

Устранение дополнительных связей, возникающих в кинематических парах является

сложной и трудоемкой работой и, возможно, за счет понижения их класса, что требует, как правило, существенного усложнения конструкции и повышения точности изготовления. Кроме того, необходимо учесть, что в процессе работы все звенья и кинематические пары изменяют свою геометрию в зависимости от условий эксплуатации, которые для заготовочных станов характеризуются нагрузками со значительной динамической составляющей, низко- и высокочастотными колебаниями, высоким спектром рабочих температур [2]. Поэтому понижение класса кинематических пар в подавляющем большинстве случаев нельзя признать рациональным решением для устранения статической неопределимости механической системы.

Наиболее эффективным способом повышения надежности работы подвижных сопряжений следует признать мониторинг их технического состояния, позволяющий своевременно проводить техническое обслуживание либо, при необходимости, ремонт проблемных узлов. Такой подход может быть реализован только при наличии надежного и объективного метода контроля технического состояния подвижных сопряжений по всей длине механического привода от электродвигателя до рабочих валков клетей. Последнее требование является наиболее важным, так как безотказность работы всего привода в целом определяется как произведение безотказной работы всех его элементов.

Поэтому разработка объективного метода контроля технического состояния всех подвижных узлов и элементов механического привода является актуальной и проблемной задачей диагностики.

Цель работы, постановка задачи. В качестве проблемных узлов обжимных станов, работоспособность которых определяет надежность и долговечность эксплуатации всего силового привода в целом, являются: зубчатые муфты, универсальные шпиндели и устройства для их уравнивания, промежуточные валы, шестеренные клетки, силовые редукторы, рабочие и опорные валки обжимных клеток. Каждый из перечисленных узлов имеет свое функциональное назначение и работает в характерных условиях, а, следовательно, имеет специфический износ подвижных сопряжений [3]. Поэтому нахождение объективного критерия оценки, фиксирующего истинное техническое состояние кинематических пар, является центральной проблемой диагностики, так как выбранный критерий должен адекватно реагировать на особенности работы всех узлов. Кроме того, выбранный критерий оценки должен в условиях ограниченной информации о реальных условиях работы обжимного стана дать в режиме “online” интегральные показатели технического состояния всех кинематических пар, принимающих участие в передаче силового потока.

На практике для решения поставленной задачи существуют две схемы контроля. Согласно первой – фиксируются параметры, являющиеся производной от состояния кинематических пар, к которым относятся уровень шума, вибрации отдельных элементов конструкции, температура в зоне сопряжения, наличие примесей и продуктов износа в системе смазки, падение коэффициента полезного действия. Достоинством данного метода оценки технического уровня является простота проведения измерений, наличие приборов контроля параметров, возможность проведения измерений без остановки привода. Недостатки – низкая достоверность результатов, которая в большинстве случаев дает только качественную оценку и не может быть использована для прогнозирования остаточного ресурса работы. Данный метод в большинстве случаев используется как экспресс метод оценки состояния подвижных элементов протых и компактных приводов.

Второй метод диагностирования предусматривает фиксацию параметра, который непосредственно связан с техническим уровнем контролируемых узлов и, следовательно, позволяет прогнозировать остаточный ресурс их работы. Наиболее достоверным параметром, характеризующим техническое состояние сопряжения следует признать зазор в кинематической паре, так как его величина зависит от условий эксплуатации, а численное значение объективно фиксирует функциональное состояние кинематической пары. Контроль износа в каждой отдельно взятой кинематической паре является технически сложной задачей и не несет практически никакой информации, в то время как величина

суммарного зазора по всем кинематическим парам является интегральной характеристикой технического состояния всего силового привода в целом и может быть достаточно легко определена [4].

Измерение суммарного износа во всех кинематических парах, участвующих в передаче силового потока, предлагается оценивать по люфту, который определяется при реверсе механического привода. Для этого фиксируется момент начала движения ведущего звена (например, вращение вала электродвигателя) и момент, когда начинает движение ведомое звено (например, вращение рабочего вала клетки). Определив таким образом угол поворота, обусловленный люфтом в кинематической цепи, устанавливается суммарный зазор во всех подвижных узлах механизма.

Материалы исследования. Чтобы воспользоваться информацией, полученной при измерении суммарного зазора, необходимо оценить достоверность полученного результата, то есть установить, насколько данный параметр является универсальным и какому закону распределения он подчиняется. Так как изменение зазора в кинематических парах зависит от большого числа эксплуатационных параметров, которые в большинстве случаев не детерминированы и поэтому носят вероятностно-статистический характер, оценку надежности работы подвижных сопряжений можно выполнять только используя методы математической статистики.

Специфика работы заготовочных станов определяет многообразие параметров, влияющих на надежность их работы, и зависит от технологических особенностей прокатки [3, 5].

Полупродуктом рассматриваемого производства являются блюмы, слябы и заготовки, прокатываемые из слитков на обжимных заготовочных станах, которые разнятся не только формой, размерами и особенностями геометрии, но и весовыми характеристиками.

На современных металлургических предприятиях с несколькими прокатными переделами, когда конечная продукция одного передела является исходным металлом последующего, подготовка заготовки может включаться в технологический процесс готового проката.

Для определения темпа прокатки используют технологические схемы, которые учитывают не только профилазмер и длину раската, но и время пауз между проходами, которое зависит от вспомогательных механизмов, обслуживающих рабочую клетку, и коэффициента использования стана. Поэтому темп прокатки может изменяться в широком диапазоне.

Из всего вышперечисленного следует, что для оценки надежности работы всей кинематической цепи необходимо установить закон распределения отказов как случайных событий в виде статистической модели. Теоретически для главных приводов

заготовочных станов можно с высокой степенью вероятности предположить нормальный закон распределения отказов. Такое решение базируется на центральной предельной теореме для случайной величины, представляющей собой общий результат большого числа независимых воздействий. Согласно теореме, наиболее вероятным является нормальный закон распределения, и он тем вероятнее, чем большее число воздействий и чем меньше влияние каждого из них на конечный результат [6].

Данное положение было экспериментально подтверждено для главного привода непрерывного тонколистового стана «1680» цеха горячей прокатки тонкого листа металлургического комбината ПАО «Запорожсталь». В качестве независимого параметра, учитывающего все многообразие условий работы и фиксирующего нагруженность всего стана был выбран параметр крутящего момента на валу

электродвигателя AMZ1600GF12MSBA, который непосредственно соединен с вал-шестерней силового редуктора линии привода чистой клетки № 5 [7].

Для получения объективного результата, учитывающего все возможные независимые параметры эксплуатации методами математической статистики, была обработана выборка за время непрерывной работы стана в течение 120 часов. Такой объем выборки является репрезентативным, а учитывая, что она была взята случайным образом из генеральной совокупности в 4500 часов, данную выборку следует признать достоверной. Объем выборки включал в себя 10550 измерений крутящего момента, которые были разбиты на пять интервалов и для которых были определены частоты эмпирического и теоретического распределения. Результаты расчетов представлены на рисунке 1

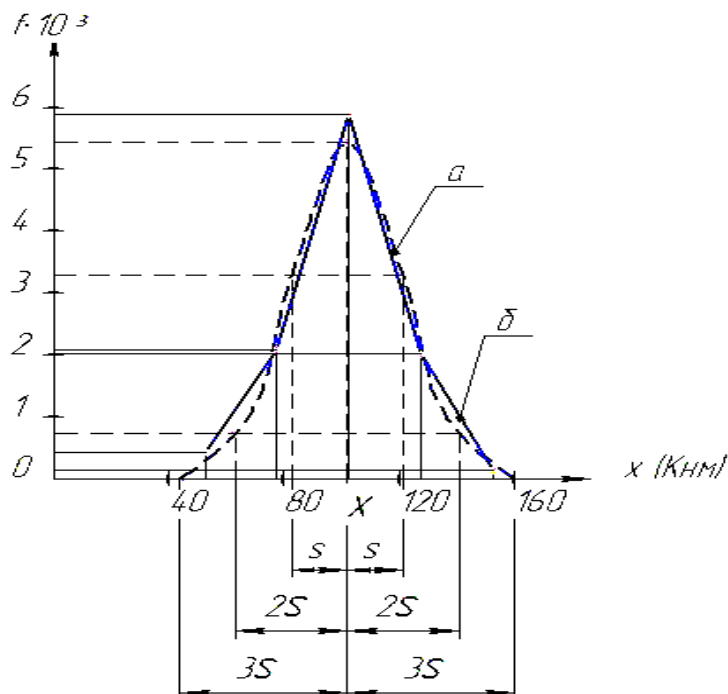


Рис. 1 – Кривые распределения? а – теоретическая; б – экспериментальная

Проведенное сравнение экспериментального и теоретического нормального законов распределения показало, что они хорошо согласуются и могут быть идентифицированы как аналогичные. Таким образом, результаты исследования позволяют утверждать, что отказы в кинематических парах по всей длине силового привода подчиняются нормальному закону распределения. Данное утверждение позволяет при определении остаточного ресурса безаварийной эксплуатации силового привода использовать принцип линейного суммирования повреждений. Применительно к рассматриваемой задаче, изменение величины зазора в сопряжениях, то есть

математическое ожидание, и вероятность их отклонения, то есть дисперсия, будут подчиняться нормальному закону распределения. В этом случае изменение суммарного зазора по всем кинематическим парам, который принимается в качестве интегрального параметра, характеризующего техническое состояние силового привода, может быть аппроксимировано прямой линией. В этом случае, величина остаточного ресурса безотказной работы привода, которая регламентирует плановую остановку заготовочного стана, будет определяться интервалом времени, необходимым для достижения заданной функцией своего предельного состояния.

Проверка сделанного утверждения, в каждом конкретном случае должна быть оценена коэффициентом линейной корреляции r_{xy} и параметром ошибки этого коэффициента m_r [6]

$$r_{xy} = \frac{\sum \Delta x_i \Delta y_i}{n \sigma_{\Delta x} \sigma_{\Delta y}},$$

где $\Delta x_i, \Delta y_i$ - отклонение от среднего значения параметра;

$\sigma_{\Delta x}, \sigma_{\Delta y}$ - среднее квадратичное отклонение;

n - объем исследуемой выборки.

Проведя сравнительный анализ, устанавливается достоверность сделанного предположения.

$r_{xy} = \pm 1$ - полная прямая или обратная корреляция;

$r_{xy} = 0$ - связь полностью отсутствует;

$r_{xy} \geq 0,5$ - корреляция зависимости велика.

Ошибка коэффициента корреляции

$$m_r = \pm \frac{1 - r_{xy}^2}{\sqrt{n}}.$$

Проверяется условие

$$r_{xy} \geq 3m_r.$$

В случае выполнения всех требований, наиболее достоверной аппроксимирующей функцией является прямая вида

$$y = a + bx.$$

Чтобы минимизировать влияние ошибки каждого конкретного измерения на конечный результат вычислений, при определении постоянных коэффициентов используется метод наименьших квадратов:

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2};$$

$$a = \frac{\sum y_i}{n} - b \frac{\sum x_i}{n},$$

где x_i, y_i - фиксированные значения параметров.

Переходя к переменным: зазор в кинематических парах (люфт) и интервал времени между проводимыми измерениями, остаточный ресурс безаварийной работы может быть определен

$$t_{ocm} = \frac{\varphi_{max} - \varphi_0 - \sum \Delta \varphi_i}{\sum \Delta \varphi_i} \sum \Delta t_i,$$

где φ_{max} - суммарный зазор (люфт) в кинематических парах, допускаемый в силовом приводе;

φ_0 - начальный зазор (люфт) в кинематических парах;

$\Delta \varphi_i$ - изменение зазора (люфт) между измерениями;

Δt_i - интервал времени между измерениями.

Достоверность полученного результата может быть оценена коэффициентом монотонности

$$K_\varphi = 1 - \frac{\Delta \varphi_i}{\sum \Delta \varphi_i} \cdot n.$$

При условии, что $K_\varphi \leq \pm 0,05$ полученный результат достоверен.

В случае нарушения данного условия, следует провести контроль износа в кинематических парах отдельных агрегатов. Для этого используются измерители угла поворота как в локальных узлах (зубчатая муфта, силовой редуктор, шестеренная клеть), так и в узлах со значительной протяженностью (универсальные шпиндели, промежуточные валы). Результаты измерений позволяют установить причину возникших отклонений.

Таким образом, предлагаемая методика диагностики технического состояния силового привода заготовочных станков, а также прогнозирование остаточного ресурса, как результат обработки экспериментальных данных, фиксирующих изменение зазора в сопряжениях кинематических пар, позволит предотвратить аварийные остановки заготовочных станков.

Выводы:

1. Проанализированы различные виды диагностирования силовых приводов и показано, что для прокатного оборудования наиболее перспективным является контроль суммарного зазора во всех кинематических парах, участвующих в передаче полезной нагрузки.

2. Показано, что на изменение величины суммарного зазора в сопряжениях влияет большое количество параметров, большинство из которых недетерминированы, а следовательно их влияние можно оценивать только в вероятностной постановке.

3. Представлены результаты статистических исследований изменения крутящего момента на валу приводного электродвигателя чистой клетки № 5 НТСЛ «1680» ЦПТЛ ПАО «Запорожсталь», и показано, что крутящий момент, как случайная величина, зависящая от многих внешних параметров, подчиняется нормальному закону распределения.

4. Результаты статистических исследований показали, что при оценке динамики изменения зазора в кинематических парах можно использовать принцип суперпозиции, а, следовательно, реализовывать условие линейного суммирования повреждений.

5. Показано, что для аппроксимации экспериментально полученных значений суммарного зазора по всем кинематическим парам следует использовать функцию в виде прямой, которая строится с учетом всех результатов выполненных измерений.

6. Мониторинг суммарного зазора, который следует рассматривать как интегральный показатель технического состояния всего механического

привода, позволяет прогнозировать остаточный ресурс безаварийной работы, а, следовательно, планировать техническое обслуживание и ремонтные работы проблемных узлов привода.

Список литературы

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин /И.И. Артоболевский.- М.: Наука, 1988.- 372 с.
2. Притыкин Д.П. Надежность, ремонт и монтаж металлургического оборудования /Д.П. Притыкин. – М.: Металлургия, 1985.- 368 с.
3. Авдеев В.А. Основы проектирования металлургических заводов. Справочник /В.А. Авдеев, В.М. Друян, Б.И. Кудрин.- М.: Интернет инжиниринг, 2002.- 462 с.
4. Когаев В.П. Прочность и износостойкость деталей машин /В.П. Когаев, Ю.Д. Дроздов.- М.: Высшая школа, 1991. – 319 с.
5. Целиков А.И. Современное развитие прокатных станов /А.И. Целиков, В.И. Зюзин.- М.: Металлургия, 1971.- 399 с.
6. Дисонсон Н. Статистика и планирование в технике /Н. Дисонсон, Ф. Лион.- М.: Мир, 1981.- 385 с.
7. Музыкин Ю.Д. Анализ работы зубчатых передач и пути предотвращения их аварийных отказов на непрерывном тонколистовом стане горячей прокатки «1680» ПАО «Запорозьсталь» /Ю.Д. Музыкин, С.Е. Мацко, П.П.

Москаленко, В.В. Татьков// Вісник НТУ «ХПІ». - 2016.- № 30(1202).- С. 42-48.

Bibliography (transliterated)

1. Artobolevskiy I.I. Teoriya mekhanizmov i mashin /I.I. Artobolevskiy.- M.: Nauka, 1988.- 372 s.
2. Prityikin D.P. Nadezhnost, remont i montazh metallurgicheskogo oborudovaniya /D.P. Prityikin. – M.: Metallurgiya, 1985.- 368 s.
3. Avdeev V.A. Osnovy proektirovaniya metallurgicheskikh zavodov. Spravochnik /V.A. Avdeev, V.M. Druyan, B.I. Kudrin.- M.: Internet inzhiniring, 2002.- 462 s.
4. Kogaev V.P. Prochnost i iznosostoykost detaley mashin /V.P. Kogaev, Yu.D. Drozdov.- M.: Vysshaya shkola, 1991. – 319 s.
5. Tselikov A.I. Sovremennoe razvitie prokatnykh stanov /A.I. Tselikov, V.I. Zyuzin.- M.: Metallurgiya, 1971.- 399 s.
6. Disonson N. Statistika i planirovanie v tekhnike /N. Disonson, F. Lion.- M.: Mir, 1981.- 385 s.
7. Muzyikin Yu.D. Analiz raboty zubchatykh peredach i puti predotvrashcheniya ih avariynykh otkazov na nepreryvnom tonkolistovom stane goryachey prokatki «1680» PAO «Zaporozhstal» /Yu.D. Muzyikin, S.E. Matsko, P.P. Moskalenko, V.V. Tatkov// Вісник НТУ «ХПІ». - 2016.- № 30(1202).- С. 42-48.

Поступила (received) 10.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Діагностика технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу роботи головних приводів заготовочних станів /Ю.Д. Музыкин, А.В. Гайдамака, В.В. Татьков, І.Н. Беліченко, А.Н. Дудаков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 49–48 – Библиогр.: 7 назв.– ISSN 2519-2671

Діагностика технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу роботи головних приводів заготовочних станів /Ю.Д. Музыкин, А.В. Гайдамака, В.В. Татьков, І.Н. Беліченко, А.М. Дудаков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 49–48 – Библиогр.: 7 назв.– ISSN 2519-2671

Diagnostics of technical condition and forecasting of the residual life of the main drives of billet mills / Yu.D. Muzykin, A.V. Gaydamak, V.V. Tat'kov, I.N. Belichenko, A.N. Dudakov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 43–48. – Bibl.:7. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Музыкин Юрий Дмитриевич – 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

Музыкин Юрий Дмитриевич – 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

Гайдамака Анатолий Владимирович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор, заведующий кафедры «Детали машин и мехатронных систем»; тел. +38-057-297-14-40; e-mail: gaydamaka.doc@ gmail.com

Гайдамака Анатолий Владимирович – доктор технічних наук, професор Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор, завідувач кафедрою «Деталі машин та мехатронних систем»; тел. +38-057-297-14-40; e-mail: gaydamaka.doc@ gmail.com

Gaydamaka Anatoly Vladimirovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Professor, Head of the Department "Parts of Machines and mechatronic systems"; Tel. + 38-057-297-14-40; e-mail: gaydamaka.doc @ gmail.com

Татков Владимир Викторович – 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

Татков 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

Беличенко Игорь Николаевич – зам. директора прокатного департамента по реконструкции и перспективному развитию ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог», тел. +38-097-946-95-77; e-mail: igor.belichenko@arcelormittal.com

Беліченко Ігор Миколайович – зам. директора прокатного департаменту по реконструкції та перспективному розвитку ПАО «Арселор Міттал Кривий Ріг», тел. +38-097-946-95-77; e-mail: igor.belichenko@arcelormittal.com

Belichenko Igor Nikolayevich - deputy. Director of the Rolling Department for Reconstruction and Prospective Development of PJSC "Arcelor Mittal Krivoy Rog", tel. + 38-097-946-95-77; e-mail: igor.belichenko@arcelormittal.com

Дудаков Артур Николаевич – зам. начальника цеха Блюминг по стану 1250 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог», тел. +38-097-594-85-89; e-mail: artyr.dudakov@arcelormittal.com

Дудаков Артур Миколайович – зам. керівникаа цеху Блюмінг по стану 1250 ПАО «Арселор Міттал Кривий Ріг», тел. +38-097-594-85-89; e-mail: artyr.dudakov@arcelormittal.com

Dudakov Arthur – deputy Head of the Blooming workshop at 1250 PJSC "Arcelor Mittal Kryvyi Rih", tel. + 38-097-594-85-89; e-mail: artyr.dudakov@arcelormittal.com

УДК 620.179.16: 620.179.17

С.Ю. ПЛЕСНЕЦОВ

МЕТОДИ І ЗАСОБИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ МЕТАЛОВИРОБІВ ТРУБЧАТОГО, СТРИЖНЕВОГО ТА ПЛАСТИНЧАТОГО ТИПУ (ОГЛЯД Ч.1)

Розглянуті основні засоби для проведення контролю металовиробів ультразвуковими та електромагнітно-акустичними засобами. Серед контрольованих виробів присутні стрижнеподібні, трубчаті, пластинчаті та інші вироби, які виготовляються на вітчизняних та зарубіжних підприємствах, як нові, так і ті, що знаходяться в експлуатації. Описані переваги та недоліки методів, їх вплив на продуктивність та якість оцінювання стану продукції, виявлення дефектів. Охарактеризовано типи коливань, що використовуються у наведених методах, та їх вплив на кінцевий результат тестування. Розглянуто взаємовплив матеріалів та ультразвукових коливань, а також вплив матеріалів на кінцеві результати контролю.

Ключові слова: трубчастий вироб, труба, стрижень, пластина, контроль електромагнітно-акустичний, методи, засоби, хвиля, коливання

Рассмотрены основные средства для проведения контроля металлоизделий ультразвуковыми и электромагнитно-акустическими средствами. Среди контролируемых изделий присутствуют стрижнеподобные, трубчатые, пластинчатые и другие изделия, которые изготавливаются на отечественных и зарубежных предприятиях, как новые, так и находящиеся в эксплуатации. Описаны преимущества и недостатки методов, их влияние на производительность и качество оценки состояния продукции, выявления дефектов. Охарактеризованы типы колебаний, что используются в приведенных методах, и их влияние на конечный результат тестирования. Рассмотрены взаимовлияние материалов и ультразвуковых колебаний, а также влияние материалов на конечные результаты контроля.

Ключевые слова: трубчатое изделие, труба, стержень, пластина, контроль электромагнитно-акустический, методы, средства, волна, колебания.

The basic means for control of metal products by ultrasonic and electromagnetic acoustic means are considered. Among the controlled products, there are pivot, tubular, plate and other products that are manufactured at domestic and foreign enterprises, both new and in service. The advantages and disadvantages of the methods, their influence on productivity and quality of the estimation of the state of products, defects detection are described. The types of bumps used in the above methods and their influence on the final result of testing are described. The mutual influence of materials and ultrasonic vibrations, as well as the influence of materials on the final results of control are considered. Contact and non-contact ultrasonic electromagnetic-acoustic transducers are considered. Physical principles of electromagnetic-acoustic transduction are provided. Mathematical equations for evaluation of physical parameters required for sample testing are provided. Theoretical and experimental concepts and prototype schematics for non-contact electromagnetic-acoustic ultrasonic experimental transducer are given. Results of experimental evaluation of electromagnetic-acoustic prototype transducer are given. Calculative schemes for methodology of developed electromagnetic-acoustic transducer are provided. Effectiveness of non-contact transducers of electromagnetic-acoustic type for testing of tubular, plate and rod-type samples is evaluated and considered superior to contact-type transducers.

Keywords: tubular product, tube, rod, plate, electromagnetic acoustic control, methods, means, wave, oscillations

Актуальність теми. Підтримувати якість виробів, що виготовляються в промисловості можливо за рахунок використання неруйнівних методів контролю. Одним з основних неруйнівних методів є ультразвуковий [1–18]. Він дає можливість проведення контролю та діагностики в різних умовах, портативними приладами та автоматичними системами. Контролюватися можуть вироби з металу, пластиків, бетону, багатошарові конструкції тощо. До цього часу найбільші об'єми контролю та діагностики мають вироби з металу, як такі, що мають великі об'єми випуску та що знаходяться в експлуатації. Традиційні методи контролю та діагностики застосовують контактні методи з використанням спеціальних рідин, що не завжди може бути ефективним. Так контроль при використанні виробів з забрудненою або кородованою поверхнею, з різними покриттями, в гарячому або холодному стані тощо не завжди можливий [3, 10–11, 16] чи має низьку достовірність. Контактний контроль часто має недостатню ефективність при діагностиці поверхонь металовиробів трубчатого та стрижневого типу та листів.

Суттєво підвищити можливості дефектоскопії можливо за рахунок використання безконтактних методів, тобто без використання контактної рідини.

Найбільш розвиненим на цей час є електромагнітно – акустичний (ЕМА) спосіб збудження і прийому ультразвукових імпульсів [3, 6, 11, 13, 16, 18]. ЕМА спосіб дозволяє збуджувати всі відомі типи ультразвукових хвиль [3], в тому числі поверхневі та нормального типу, які можуть ефективно використовуватися для дефектоскопії виробів трубчатого та стрижневого типу, особливо невеликого діаметру.

Електромагнітно-акустичний спосіб неруйнівного контролю зародився на стику декількох наукових напрямів, що мають різну фізичну сутність. Для його опису потрібне використання апаратів електродинаміки і термодинаміки, теорії пружності, феромагнетизму, акустики, матеріалознавства, а застосування поширюється на дефектоскопію, товщинометрії і визначення фізико-механічних властивостей матеріалів. Багатогранність і обсяг необхідних наукових і технічних рішень призвели до значних труднощів при створенні приладів і пристроїв, що використовують ЕМА спосіб на практиці. В відомих теоретичних дослідженнях на цей час не достатній мірі розглянуто питання збудження та прийому ультразвукових хвиль нормального типу: крутильних, Релея, Лемба тощо. Особливо це важливо для дефектоскопії виробів з феромагнітних матеріалів. У літературі також відзначається [10–11],

що цей спосіб має низьку чутливість, значну «мертву» зону, істотну складність апаратури.

Багатогранність і обсяг необхідних наукових і технічних рішень призвели до значних труднощів при створенні приладів і пристроїв, що використовують ЕМА спосіб на практиці. Проте рішення поставленої проблеми вимагають підприємства, які випускають трубки, стрижні, листи, виготовлені з феромагнітних і не феромагнітних електропровідних матеріалів.

Таким чином, значні потенційні переваги, з одного боку, недоліки і складність реалізації, з іншого боку, призвели до появи важливої для промисловості наукової проблеми. Її суть полягає в розвитку теорії і практики створення нових методів та приладів на основі ЕМА способу, що забезпечують виявлення дефектів в електропровідних феромагнітних виробках.

Отже, вирішення проблеми створення теоретичних та практичних засад з підвищення ефективності ультразвукового ЕМА контролю є соціально значущим, актуальним і своєчасним.

Основна частина

Серед методів неруйнівного контролю протяжних виробів при виробництві та експлуатації ультразвукові методи займають основне місце і вельми інтенсивно розвиваються. Одною з основних причин широкого поширення ультразвукових методів полягає в тому, що збудження і поширення механічних коливань тісно пов'язане з пружними і іншими характеристиками матеріалів. Найбільш широко застосовуються традиційні методи, для яких є обов'язковим застосування контактної рідини. Інтенсивно розвиваються і безконтактні методи контролю без використання контактної рідини.

Кожний з наведених методів мають свої переваги і недоліки. Аналіз цих методів дозволить визначити їх можливості і умови застосування, а також галузі використання.

Простеживши основні тенденції розвитку контактних і безконтактних методів неруйнівного контролю можна оцінити загальні напрямки і стан розробок засобів ультразвукового контролю (УЗК) якості виробів, що важливо для подальшого його розвитку.

Контактний акустичний контроль

1. Різновиди контактних методів контролю

Згідно ГОСТ 23829 акустичні методи контролю ділять на дві групи: ті що використовують випромінювання і прийом акустичних коливань і хвиль (активні методи) і засновані тільки на прийомі коливань і хвиль (пасивні методи) [10]. Далі, як найбільш поширені, будуть розглянуті активні методи контролю та вимірювань [10–13]. Найчастіше використовують методи проходження і методи відбиття [10, 19–20]. Застосовують як безперервне, так і імпульсне випромінювання [11]. Серед методів проходження слід зазначити наступні методи [10, 19]. Амплітудний метод проходження, заснований на реєстрації зменшення амплітуди наскрізного сигналу під впливом дефекту, що утрудняє проходження сигналу і створює звукову тінь [20]. Часовий метод проходження, заснований на вимірюванні запізнювання імпульсу, викликаного обминанням дефекту хвилею [21].

Методи відображення базуються на аналізі

сигналів, відбитих з об'єкту контролю [10–18]. Прийнятий сигнал залежить від форми, орієнтації, розташування дефекту і заповнюючого його матеріалу [22], а також від характеристик об'єкту контролю (ОК). Крім згаданого, використовують різновиди методів відлуння: луна - дзеркальний, дельта - метод, дифракційно - часовий та інші [10, 21, 23–25]. Ці методи в промислових умовах реалізуються рідко, оскільки вимагають особливих умов використання та більш складної і дорогої апаратури.

Досить широко застосовують комбіновані методи акустичного контролю і вимірювань. Серед них слід відзначити дзеркально-тінювий, луна-тінювий, луна-наскрізний [10, 20, 24, 27].

Для реалізації описаних ультразвукових контактних методів контролю застосовуються різні способи передачі і прийому пружних коливань: контактний, щілинний і імерсійний [10].

Контактний спосіб полягає в розміщенні п'єзоелектричного перетворювача (ПЕП) на поверхні ОК, попередньо змащеної, наприклад оливою. При цьому постійно витрачається контактна рідина. Для реалізації контактного способу поверхню ОК має бути дуже гладкою (нерівності не повинні перевищувати 10...40 мкм). Якщо поверхня виробу шорстка, то випадкові зміни амплітуди корисних сигналів досягають 20 дБ [3, 16, 28] і більше, що істотно знижує достовірність контролю.

Щілинний спосіб передбачає створення між ПЕП і поверхнею ОК зазору величиною, який приблизно дорівнює довжині хвилі пружних коливань. Чутливість цього методу приблизно в 10 разів нижче контактного [11].

При імерсійному способі між ПЕП і поверхнею ОК розміщують товстий шар контактної рідини [10–11, 25]. Чутливість цього методу приблизно в 100 разів нижче контактного.

Згадані контактні методи неруйнівного контролю не дозволяють ефективно використовувати поверхневі хвилі [10–11], так як загасання їх амплітуди залежить від наявності рідини на поверхні виробу. Не знайшли широкого застосування зсувні хвилі з різною орієнтацією вектора поляризації [3, 10, 28–30]. Не використовуються перспективні горизонтально - поляризовані хвилі [10–11]. Значні технічні труднощі становить контроль гарячих і холодних виробів, а також контроль з високою швидкістю переміщення виробу відносно ультразвукових перетворювачів [10–11]. Практично не використовуються в промислових умовах хвилі Релея, Лемба та перспективні крутильні коливання.

2. *Типи пружних коливань, які використовуються в неруйнівному контролі ультразвуковим методом.*

Типи пружних хвиль, які можуть існувати в матеріалах і середовищах, визначені шляхом вирішення хвильових рівнянь [31 - 33]. За допомогою рішення цих рівнянь можна показати, що в необмеженому просторі існують два типи хвиль: поздовжні хвилі і хвилі зсуву (поперечні), які поширюються з різною швидкістю. Об'ємні поздовжні і поперечні хвилі з частотою 0,5 ... 10 МГц найбільш широко використовують для контролю матеріалів

[10]. Ці хвилі оптимально виявляють дефекти при нормальному падінні на поверхню найбільшого їх розвитку. Майже не використовуються, зважаючи на неможливість їх збудження контактним методом, горизонтально - поляризовані хвилі, що мають цілий ряд позитивних експлуатаційних якостей [3, 34–36].

В обмежених тілах існують поверхневі (Релея) і нормальні хвилі [10, 31–33] різного типу. Уздовж вільної поверхні твердого тіла можуть розповсюджуватися поверхневі хвилі. З їх допомогою виявляються дефекти, що виходять на поверхню. На глибині більшої довжини хвилі ультразвукових коливань поверхневими хвилями дефекти практично не виявляються [10, 31]. Слід зазначити, що контактним методом поверхневі хвилі використовуються для практичного контролю і вимірювань недостатньо. Це обумовлено необхідністю застосування контактної рідини, що є значним недоліком.

Якщо тіло має дві вільні поверхні (пластина), то в ньому можуть існувати нормальні хвилі, тобто хвилі, що біжать уздовж границь середовища і стоячі в перпендикулярному напрямку [10, 32–33]. Їх успішно застосовують для контролю тонких листів, оболонок, труб [10, 37–38]. Проте через вплив рідини на поверхні матеріалів на результати вимірювань практичне застосування контактної методу сильно обмежена. Через неможливість ефективного збудження не використовуються хвилі зсувного типу.

Хвилі, що виникають в стрижнях та трубах, подібні хвилям в пластинах [10, 39–41]. Їх успішно застосовують для контролю прутків різної форми, дроту, виробів зі складною формою перетину: рейки, швелери та інші. Проте і в цьому випадку використання контактної методу УЗК мало ефективне, оскільки на ультразвукові імпульси суттєво впливає наявність на поверхні виробу рідини. Достовірність контролю стає недостатньою. Окрім того, потрібна операція зачищення поверхні від бруду, окалини, окисів різного типу. В результаті процес використання УЗК значно дорожчає.

3. Вплив акустичних властивостей матеріалів на УЗК і вимірювання.

Властивості пружного середовища з точки зору поширення ультразвукових хвиль [6–7, 10–11, 13, 42–43] визначаються в першу чергу швидкостями поширення об'ємних хвиль. З їх допомогою обчислюються швидкості інших типів хвиль, а також константи пружності середовища. Важливим акустичним властивістю середовища є характеристичний імпеданс [11].

Ще одна важлива для поширення акустичних хвиль властивість середовища - загасання акустичних хвиль. Зазвичай коефіцієнт загасання δ визначають числом негативних децибел на ділянці шляху в 1м [4, 7, 11]. Коефіцієнт загасання складається з коефіцієнтів поглинання та розсіювання.

Ослаблення амплітуди ультразвукових імпульсів є однією з основних характеристик при оцінці якості виробу [10].

Відомо, що коефіцієнт поглинання для

поздовжніх хвиль більше, ніж для поперечних [4, 10–11]. Тому зсувним хвилям віддають перевагу при інших однакових умовах.

Істотним недоліком вимірювання загасання ультразвуку контактним методом є демпфірування ПЕП поверхнею матеріалу [44]. Усунути цей та вище відзначені недоліки можливо шляхом застосування безконтактного способу збудження та прийому ультразвукових імпульсів. Тому при виконанні неруйнівного контролю слід враховувати фактори загасання ультразвуку в ОК та в рідинному переході ПЕП - виріб.

Якщо існує два матеріали, то падаюча на границю розділу двох середовищ акустична хвиля частково проходить через границю, а частково відбивається від неї [10–11]. При цьому може відбуватися трансформація типів хвиль. У загальному випадку на границі виникають кілька типів хвиль - поздовжня і поперечна, поверхнева і т.п. В результаті може формуватися когерентна акустична перешкода. Цей фактор необхідно враховувати при розробці технологій і засобів контролю.

Зменшити кількість когерентних перешкод на границі введення УЗК в ОК можливо шляхом збудження ультразвукових коливань безпосередньо в метали, наприклад, електромагнітно - акустичним (ЕМА) способом [3, 10, 34–36, 41, 45–57]. При цьому прийом пружних коливань також слід проводити безпосередньо з поверхні металу.

4. Контактні електроакустичні перетворювачі.

В сучасних ультразвукових пристроях для збудження і прийому ультразвуку найчастіше використовують п'єзоелектричний ефект [58 - 59]. П'єзопластина ПЕП працює в умовах досить складного акустичного навантаження. Це призводить до більш жорстких вимог щодо вибору матеріалу елементів ПЕП, його розташування щодо поверхні ОК, якості поверхні матеріалу, його температури і т.д. В результаті, при контролі виробів з захисними покриттями (фарба, пластик і т.п.), забруднених, гарячих і холодних і т.д., акустичний контакт буде порушений і контроль буде ненадійним або зовсім неможливим. Ще більш складна ситуація виникає при скануванні ОК з високою швидкістю. Тобто високопродуктивний контроль за допомогою ПЕП майже неможливий.

Аналогічні недоліки має магнітострикційний метод ультразвукового контролю.

Вказані вище недоліки обумовлені збудженням ультразвукових імпульсів в окремому перетворювачі і в необхідності передачі збуджених імпульсів в ОК через контактну рідину (для високих частот). Відповідно, для забезпечення прийому необхідна контактна рідина для передачі ультразвукових імпульсів з ОК в перетворювач.

Виключити значне число зазначених недоліків можливо за рахунок застосування безконтактних методів ультразвукового контролю і вимірювань [3, 10]. Такий механізм можливо реалізувати, якщо в якості перетворювача (збуджувача та приймача) буде використано поверхню ОК.

Безконтактні методи збудження і прийому ультразвукових імпульсів

На сьогодні відомі різні способи безконтактного збудження і прийому ультразвукових імпульсів в твердих тілах, які не потребують для реалізації контактної рідини: механічне ударне [10]; термічні способи [10, 60–62]; електростатичним [10]; електромагнітно-акустичним [3, 10,]. В роботах [60–62] показана висока ефективність збудження ультразвукових хвиль з допомогою лазерного променя. Проте, прийом УЗК за допомогою інтерферометрів в промислових умовах практично не можливий. Автори роботи [65] пропонують використовувати для прийому збуджених лазером імпульсів електромагнітно – акустичний спосіб, що значно ускладнює і здорожує засоби ультразвукового контролю. Окрім того, при лазерному збудженні одночасно в виробі формується декілька типів ультразвукових хвиль, які формують когерентні завади, які важко врахувати при оцінці якості ОК. Тому, серед безконтактних методів ультразвукового контролю доцільно вибрати такі, що дають можливість як збуджувати так і приймати ультразвукові імпульси в традиційному діапазоні частот 0,1...10 МГц. На сьогодні найбільш розвиненими з них є електростатичний [10, 63–89,] та електромагнітно-акустичний [3, 10, 34–36] способи

безконтактного збудження і прийому ультразвукових імпульсів в твердих електропровідних та (або) феромагнітних матеріалах.

1. Електростатичний спосіб безконтактного збудження і прийому ультразвукових імпульсів в металовиробах

Електростатичний спосіб безконтактного збудження пружних коливань реалізується у двох варіантах. У першому з них – перетворювачі мікрофонного типу, він працює як конденсаторний мікрофон [10]. Рухливим елементом у ньому служить тонка фольга, натягнута над плоскою підставою й відділена від нього дуже малим зазором. Фольга з підставою утворюють конденсатор. При подачі на обкладки конденсатора змінної збудливої електричної напруги фольга притягується до підстави. Коливання від фольги до ОК передаються по повітрю, тобто використовується повітряно-акустичний зв'язок. Такий спосіб може бути реалізований тільки для низькочастотних УЗ коливань.

У другому (конденсаторному) варіанті однією з обкладок конденсатора служить сам ОК, рис.1. В такому датчику використовується пондеромоторна взаємодія зовнішньої пластини з електродом – ОК [73].

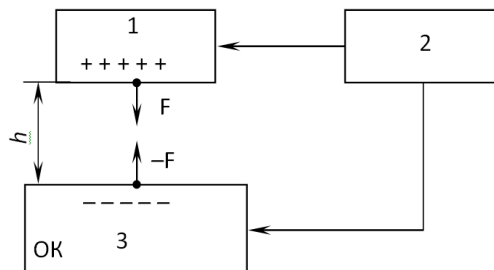


Рис. 1 – Схема взаємодії при перетворенні електричної енергії в акустичну:

1 – електрод ЄП; 2 – генератор змінної напруги; h – товщина прошарку; F – сила, яка діє між обкладками ЄП

Напруженість, що формує акустичне поле при його збудженні, можна оцінити, розглядаючи силу як похідну від енергії електричного поля конденсатора за напрямком переміщення поверхні об'єкта контролю, рис. 1. Для такої моделі запишемо

$$T = \frac{1}{S} \frac{d}{dh} \left(\frac{1}{2} V_{\approx}^2 C \right) = \frac{1}{S} \frac{d}{dh} \left(\frac{1}{2} V_{\approx}^2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h} \right) = -\frac{V_{\approx}^2 \varepsilon_0 \varepsilon}{h^2}, \quad (1)$$

де C і S – ємність і площа конденсатора, V_{\approx} – амплітуда змінної гармонійної напруги між обкладкою ємнісного перетворювача (ЄП) і виробом, h – відстань між обкладками ЄП і виробом, ε – відносна діелектрична проникність матеріалу, що заповнює h , ε_0 – абсолютна діелектрична постійна.

При різнойменних зарядах на обкладках конденсатора пластини й виріб притягуються. Максимальна сила притягання досягається двічі за

один період коливань змінної напруги високої частоти. Таким чином, виникає ефект подвоєння частоти акустичних коливань. Щоб уникнути подвоєння частоти акустичних коливань і підвищення в 2 рази ефективності перетворення електричної енергії в акустичну [75–76], необхідно подати на конденсатор постійну поляризуєчу напругу V_{\approx} , що рівняється або перевищує змінну напругу V_{\approx} . Тоді

$$T = -\frac{V_{\approx} V_{\approx} \varepsilon_0 \varepsilon}{h^2}. \quad (2)$$

Скориставшись результатами роботи [68–69] визначимо ефективність перетворення ЄП шляхом спрощеного прорахунку у випадку збудження ультразвукових імпульсів. Нехай верхній електрод конденсатора нерухомий, $\varepsilon = 1$ (конденсатор повітряний), $V_{\approx} / h = 5 \cdot 10^6$ В/м (виходячи із припустимої пробійної напруги), $V_{\approx} = 0,5V_{\approx}$. Звідси

знаходимо $T \approx 100$ Па, що приблизно в 1000 разів менше значення, що досягається за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів. Аналогічна величина має місце й у випадку прийому акустичних імпульсів. Тоді, відповідно до загальноприйнятих теоретичних підходів, коефіцієнт перетворення для ЄП при збудженні й наступному прийомі акустичних

коливань буде майже в 10^6 разів менше, ніж для ПЕП. Для знаходження шляхів підвищення коефіцієнта перетворення розглянемо більш істотно випадок прийому акустичних коливань ЄП. Паралельно до однієї з торцевих поверхонь зразка, призначеної для ультразвукового дослідження, на відстані h розташовується електрод ЄП, рис. 2 [83–84, 88].

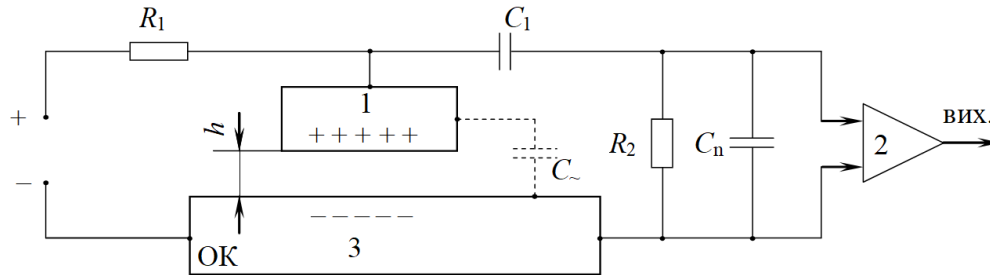


Рис. 2 – Модель для оцінки коефіцієнта перетворення при конденсаторному прийомі акустичних коливань з ОК: 1 - електрод ЄП; 2 - підсилювач; 3 - ОК; C_{\sim} - змінна ємність конденсаторного перетворювача R_{\sim} - баластний опір; C_i - розділюючий конденсатор; R_2 - вхідний опір підсилювача

Цей повітряний конденсатор поляризований постійною напругою, що подається через великий опір R . Ультразвукові імпульси змушують вібрувати поверхню зразка й тим самим модулюють повітряний прошарок, що є складовою частиною повітряного конденсатора. Високочастотний імпульс, що виникає на обкладках конденсатора може бути посилений і відповідним чином оцінений. У цьому випадку змінна напруга V_{\sim} , яка розвивається ЄП, описується виразом

$$U_{\sim} = \frac{A_{\sim}}{h} \frac{C_0}{C_0 + C_{\Pi}} U_{=} \quad (3)$$

де A_{\sim} – зміщення, сформоване ультразвуковою хвилею; h і C_0 – зазор і статична ємність прийомного ЄП; C_{Π} – сумарна паразитна ємність; $U_{=}$ – поляризуюча напруга.

Модель для виконання досліджень наведена на рис. 2 [81].

Коефіцієнт передачі для ланцюга, наведеного на рис. 2, без врахування струмів в опорах R_1 , R_2 ($R_1 \geq 1$ МОм), буде визначатися величиною [66–67]

$$K(f) = \frac{1}{\left(1 + \frac{C_{\Pi}}{C_0} + \frac{C_{\Pi}}{C_1}\right) - \frac{j}{2\pi f} \left(\frac{1}{R_1 C_0} + \frac{1}{R_2 C_1}\right)} \quad (4)$$

де f – частота прийнятих акустичних коливань.

Тому, враховуючи максимальний коефіцієнт передачі, бажано мати C_0 максимальним. Однак збільшення ємності за рахунок зменшення прошарку h вимагає зниження поляризуючої напруги $U_{=}$. Крім того, при проведенні неруйнівного контролю прошарок між електродами і виробом повинен бути більше декількох десятків часток міліметра. Збільшувати площу ЄП більше 20...30 мм не доцільно з точки зору забезпечення технології контролю [10]. Тому наявність цих двох суперечливих умов приводить до того, що оптимальний діаметр обкладки ЄП повинен бути не більше 25–30 мм. Проте конкретну його величину потрібно визначати експериментально.

Аналіз формул (3–4) показує, що іншим шляхом підвищення чутливості ЄП є використання проміжних шарів матеріалу з високим значенням величини

відносної діелектричної проникності. Такий висновок підтверджується експериментальними даними, отриманими при дослідженні матеріалів з різною діелектричною проникністю [68, 82–84]. В табл. 1 наведена експериментальна залежність величини співвідношення амплітуд A ультразвукового імпульсу й завад при прийманні ЄП імпульсів, збуджених ПЕП на частоті 2,5 МГц, $h = 1$ мм.

Таблиця 1 – Залежність величини A співвідношення амплітуд ультразвукового імпульсу й перешкод при прийманні ЄП імпульсів ПЕП

Матеріал прошарку ЄП	Повітря	Лавсан	Папір 80 г/м ²	Спечений окис алюмінію	Гетинакс
A , дБ	7	20	30	32	42

Очевидно, що вибір матеріалу прошарку має принципове значення. Амплітуду корисного сигналу можливо підвищити у багато разів. При цьому посилюючий матеріал повинен одночасно відігравати роль захисної плівки, оскільки ЄП може бути ушкоджений під час сканування поверхні виробу, що контролюється. Тому при проведенні експериментів була використана лавсанова плівка товщиною 0,2 мм, яка одночасно є прошарком стійким до стирання. Однак, під час експериментальних досліджень установлено, що чутливість таких ЄП істотно змінюється в часі. Причиною цього ефекту є поступове накопичення об'ємного заряду (міграційна поляризація) [68], який створює зворотне електричне поле в діелектричному прошарку (наприклад, лавсановій плівці), що не дозволяє проводити неруйнівний контроль. Аналогічні результати отримано при використанні фторопластових плівок, слюди й ін. Різні заходи щодо попередньої підготовки діелектричних прошарків з різних матеріалів не приводять до зменшення нестабільності ЄП, як при прийманні акустичних імпульсів, так і під час їхнього збудження, рис. 3 (поляризуюча напруга 937 В, змінна напруга – 1000 В, прошарок між електродами і виробом – лавсанова плівка товщиною 0,2 мм, $\varepsilon = 3,2$ [73, 82–84]).

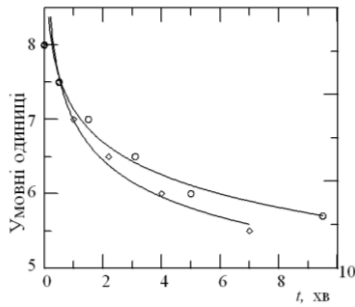


Рис. 3 – Залежність прийнятого (○) і збудженого (◇) ЄП сигналу від часу вимірювання

Для усунення такого недоліку й збереження підвищеної чутливості ЄП за рахунок використання посилюючих захисних прошарків з матеріалів з високою діелектричною проникністю використовують замість постійного поляризуючого

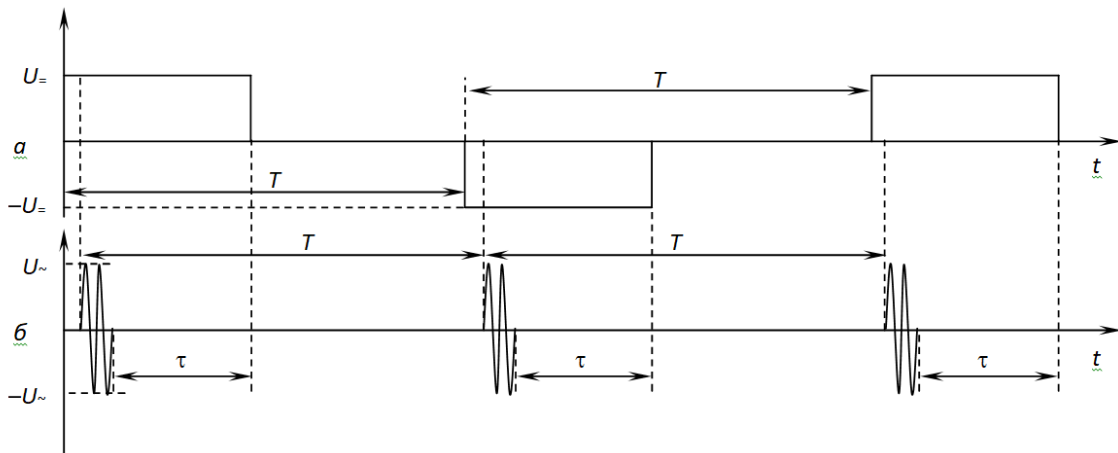


Рис. 4 – Форма поляризуючих імпульсів: а - ефективного ЄП і б - високочастотних імпульсів збудження; T – період зондування ОК; – час, протягом якого приймають акустичні імпульси з ОК [85–86]

Важливою перевагою такого способу живлення ЄП є також те, що короткі поляризуючі імпульси за амплітудою можуть перевищувати постійну поляризуючу напругу без пробою посилюючої захисної діелектричної плівки. Це дає можливість додатково підвищити чутливість ЄП.

Чутливість такого перетворювача з урахуванням діелектричного h_2 й повітряного h_1 прошарків (який завжди є при дефектоскопії й товщинометрії) описується виразом [88

$$\eta^{A\sim} = \frac{U_{\sim}}{A_{\sim}} = \varepsilon \cdot E / \left(\varepsilon \cdot \frac{h_1}{h_2} + 1 \right), \quad (5)$$

де U_{\sim} – напруга на виході датчика, викликана зміщеннями часток матеріалу A_{\sim} в акустичній хвилі; ε – відносна діелектрична проникність плівки (відносна діелектрична проникність повітря прийнята рівною 1); $E = U_{\sim} / h_2$ – електрична стійкість діелектричної захисної плівки; U_{\sim} – величина поляризуючої напруги на обкладках ЄП.

Оскільки для прийнятних діелектричних плівок E становить близько 30 В/мкм, то елементарні розрахунки показують, що чутливість буде рівнятися $\approx 10^8$ В/м. Ця величина відрізняється від аналогічної

поля імпульсне – зі зміною полярності кожного наступного поляризуючого імпульсу, рис. 4 [85–86].

Результати експериментальної перевірки підтвердили, що при перемиканні полярності поляризуючих імпульсів, амплітуда прийнятих інформаційних сигналів залишається стабільною [85–86]. При цьому амплітуда сигналів на алюмінієвих зразках відносно до перешкод становить не менше 100 разів. Це достатня величина для проведення ультразвукової товщинометрії і навіть дефектоскопії.

Крім того, короткі (біля декількох сотень мікросекунд і частоті посилок (зондування виробу) таких імпульсів не більше 100 разів на секунду) імпульси високої напруги не мають помітної небезпечної дії на обслуговуючий персонал, як постійна напруга. З точки зору техніки безпеки це значна перевага.

для ПЕП на істотно меншу величину, ніж теоретично розраховану раніше [10–11].

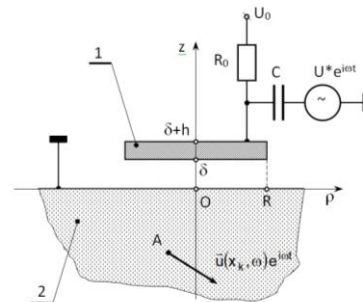


Рис. 5 – Розрахункова схема моделі перетворювача смісного типу з дисковим електродом в режимі збудження ультразвукових хвиль [66]

Тому рядом авторів були додатково розглянуті теоретичні засади збудження та прийому ультразвукових імпульсів електростатичним способом [66–68, 89]. В цих роботах в загальному вигляді розглянута задача з математичного моделювання процесу збудження ультразвукових імпульсів гармонічним електричним полем згідно з рис. 5.

Електростатичне поле, яке створюється електрично зарядженим диском (рис. 5) в навколишньому повітряному просторі, можна описати за допомогою скалярного осесиметричного електричного потенціалу $\Phi^0(\rho, z)$, де ρ і z радіальна і осьова координати циліндричної системи координат ρ, φ, z з центром в точці O (рис. 5). Скалярний потенціал $\Phi^0(\rho, z)$ задовольняє рівнянню Пуассона [90]

$$\nabla^2 \Phi^0(\rho, z) = -\rho_e / \chi_0, \quad (6)$$

де ρ_e - об'ємна щільність статичного електричного заряду в металевому диску; $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ - діелектрична проникність навколишнього до диску простору.

Будемо вважати, що статичний електричний заряд в обсязі диска $V = \pi R^2 h$ (R - радіус диска, h - його товщина) розподілений рівномірно і тому

$$\rho_e = \frac{C_0 U_0}{\pi R^2 h} f(\rho) f(z), \quad (7)$$

де $C_0 \approx \pi R^2 \chi_0 / \delta$ - статична електрична ємність диска над поверхнею металевого виробу. Металевий зразок для спрощення подальших викладок замінимо півпростором $z \leq 0$ з ізотропною питомою електричну провідністю r з розмірністю сіменс, помножений на метр, і магнітною проникністю μ (розмірність - Генрі, поділений на метр). Функції $f(\rho)$ і $f(z)$ задаються наступним чином

$$f(\rho) = \begin{cases} 1 & \forall \rho \in [0, R], \\ 0 & \forall \rho \notin [0, R], \end{cases} \quad f(z) = \begin{cases} 1 & \forall z \in [\delta, \delta + h], \\ 0 & \forall z \notin [\delta, \delta + h]. \end{cases} \quad (8)$$

Оскільки в статичній ситуації електричний струм по поверхні не протікає, то радіальний компонент вектора напруженості статичного електричного поля на поверхні металу має дорівнювати нулю. В іншому випадку по поверхні металу протікав би електричний струм з поверхневою щільністю і статичний заряд в цьому випадку був би рівний нулю. Таким чином, рішення рівняння (6) на границі має задовольняти наступні умови

$$\left. \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial \rho} \right|_{z=0} = 0 \quad (9)$$

Крім цього, скалярний потенціал $\Phi^0(\rho, z)$ і його перші похідні $\partial \Phi^0(\rho, z) / \partial \rho$ і $\partial \Phi^0(\rho, z) / \partial z$ повинні задовольняти умові фізичної можливості бути реалізованим джерела поля, т. Е. Відповідати таким граничним умовам

$$\lim_{R_0 \rightarrow \infty} \left\{ R_0 \Phi^0(\rho, z), R_0 \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial \rho}, R_0 \frac{\partial \Phi^0(\rho, z)}{\partial z} \right\} = 0, \quad (10)$$

де $R_0 = \sqrt{\rho^2 + z^2}$ відстань від металевого диска.

Фізичний сенс умови (10) очевидний - джерело кінцевої потужності створює електричне поле,

потенціал якого і компоненти вектора напруженості зменшуються швидше, ніж $1/R_0$ та звертаються в нуль при нескінченному віддаленні від нього.

В результаті вирішення сформульованої задачі було отримано аналітичне рушення щодо збудження ультразвукових хвиль ємнісним способом.

Проте, задача з прийому ультразвукових хвиль ємнісним методом не вирішена.

Окрім того, у реальних вимірювальних схемах ЄП підключаються до підсилювачів, які мають вхідну ємність, що знижує чутливість перетворювача. Тому для досягнення максимальної чутливості необхідно зменшувати довжину з'єднувального кабелю й зменшувати вхідну ємність підсилювача.

Недостатньо даних з практичного використання ємнісного методу в режимі збудження і прийому ультразвукових коливань.

Необхідно проаналізувати інші способи збудження і прийому ультразвукових коливань безконтактним методом які б дали можливість проводити безконтактний контроль трубчатих, стрижневих та пластинчатих виробів.

Висновки

1. В результаті аналізу літературних джерел встановлена недоцільність контролю та діагностики трубчатих, стрижневих та пластинчатих виробів традиційним контактним методом.

2. Показано, що ефективно можливо виконувати контроль та діагностику трубчатих, стрижневих та пластинчатих виробів безконтактним методом без використання контактної рідини.

Список літератури

1. Патон Б. Є., Троїцький В. О., Посипайко Ю. М. Неруйнівний контроль в Україні // Інформ. бюл. Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. -2003. - № 2(18). - С. 5-9.
2. Троїцький В.А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. - К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 1997. - 224 с.
3. Сучков Г.М. Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно - акустического контроля металлоизделий / дис. д.т.н., 2005. Харьков. - 521 с.
4. Білокур І.П. Основи дефектоскопії: Підручник - К.: «Азимут-Україна», 2004. - 496 с.
5. Карпаш О.М. Неруйнівний контроль та технічна діагностика нафтогазового обладнання та інструменту // Методи та прилади контролю якості. - 1997. - № 1. - С. 22-24.
7. Сучков Г.М. Прилади і методи акустичного контролю: навч. пос. / Г.М. Сучков, К.Л. Ноздрачова, Е.В. Міщанчук, В.М. Єроценков. - Харків: НТУ «ХП», 2011. - 220 с.
8. Цепенко В.К., Куц Ю.В. Основи ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник. К.: НТУУ «КП», - 2010. - 448 с.
9. Маєвський С.М., Бабак В.П., Щербак Л.М. Основи побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі. - К.: Либідь, 1993. - 200 с.
10. Термінологічний словник з неруйнівного контролю / І.П Білокур, О.С. Боровіков, В.В. Луб'янний. - К.: ІСДО, 1995. - 228 с.
11. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. - М.: Машиностроение, 2008. - 864 с.
12. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. - М.: Машиностроение, 1981. - 240 с.
13. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова. - М.: Высш. шк., 1991. - 283 с.
14. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд. Й. Крауткреммер, Г. Крауткреммер; Пер. с нем. - М.:

- Металлургия, 1991. – 752 с.
15. Гусев Е. А., Королев М. В., Карпельсон А. Е. и др. Приборы неразрушающего контроля толщины в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1993. – 144 с.
 16. Ультразвуковой контроль. Алешин Н.П., Клюев В.В., Бобров В.Т., Ланге Ю.В., Щербинский В.Г. Учебное пособие: учебное пособие для подготовки специалистов по неразрушающему контролю и технической диагностике / Под общей редакцией В. В. Клюева; Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД). Москва, 2011. Серия Диагностика безопасности.
 17. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, В.Н.Филипов и др. Под ред. В.В. Клюева. – М. Машиностроение, 1995. – 488 с.
 18. Аттестация персонала в области неразрушающего контроля метрология в неразрушающем контроле Клюев С.В., Коновалов Н.Н., Копытов С.Г., Соловьева М.О., Муравская Н.П. под общей редакцией В.В. Клюева, Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД). Москва, 2011. Серия Диагностика Безопасности.
 19. А1208 -простой и сложный ультразвуковой толщиномер Самокрутов А.А., Шевальдыкин В.Г., Козлов В. Н., Пастушков П.С., Алехин С.Г., Жуков А.В. В мире неразрушающего контроля. 2003. № 2. С. 38.
 20. Ермолов И.Н., Вопилкин А.Х., Бадалян В.Г. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии (краткий справочник). – М.: "ЭХО+", 2000. – 108 с.
 21. Ермолов И.Н., Зенкова Л.С. Исследование зеркально-теневое метода ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия. – 1976. – № 2. – С. 16–23.
 22. Ермолов И.Н. Дифракционно – временной метод контроля // В мире неразрушающего контроля. – 2001. – № 2. – С. 7–11.
 23. Дымкин Г.Я. Акустический тракт при эхоимпульсном контроле ограниченных протяженных изделий // Дефектоскопия. – 1990. – № 6. – С. 18–24.
 24. Баранов, В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. — М.: Энерго-атомиздат, 1990. — 320 с.
 25. Белокуров, И.П. Дефектология и неразрушающий контроль: Учеб. пособие. — Киев: Вища шк, 1990: — 200 с.
 26. Гурвич А.К., Давыдкин А.В. Схемы прозвучивания и эффективность средств сплошного УЗК рельсов // В мире неразрушающего контроля. – 2003. – № 3. – С. 71–73.
 27. Колбин И. Б., Сучков Г. М. Разработка и совершенствование методики и технологической оснастки для проведения ультразвукового контроля цилиндрических изделий с использованием хордового способа // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2002. – № 1. - С. 39–42.
 28. Щербинский В.Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. – М.: ЦНИИТМАШ, 2003. – 396 с.
 29. Сучков Г.М. О главном преимуществе ЭМА способа // Дефектоскопия. – Екатеринбург, 2000. – № 10.
 30. ГСТУ 32.2.04.001-2000. Дефектоскопи ультразвукові для контролю рейок при їх експлуатації. Технічні вимоги. / Зареєстр. 07. 09. 2000 р. Держ. ком. України по стандартизації, метрології та сертифікації. – Київ, 2000. – 16 с.
 31. ПНАЭ Г-7-030-91. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Часть II. Контроль сварных соединений и наплавки. – М.: ЦНИИатоминформ, 1992. – 157 с.
 32. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 288 с.
 33. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 384 с.
 34. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. – М.: Наука, 1989. – 412 с.
 35. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Хомяк Ю.В. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 3. Методы и средства повышения чувствительности ультразвукового контроля ЭМА способом: монография. – Харьков: Изд-во «Щедра садиба плюс», 2015. – 124 с.
 36. Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Глоба С.Н. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 4. Экспериментальные исследования возможностей ультразвукового контроля ЭМА способом: монография. – Харьков: Изд-во «Щедра садиба плюс», 2015. – 104 с.
 37. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств ультразвукового контроля металлоизделий. Монография. Харьков: ТОВ «Планета-принт», 2016 – 230 с.
 38. Гольден А.Д. Ультразвуковой контроль резиноталлических конструкций волнами Лэмба при одностороннем доступе со стороны резины // Дефектоскопия. – 1993. – № 1. – С. 39–42.
 39. Перов Д.В. Определение геометрических параметров цилиндрических тел с использованием дисперсионных характеристик мод упругого цилиндрического волновода // Дефектоскопия. – 2000. – №5. – С. 21–30.
 40. Колбин И. Б., Сучков Г. М. Разработка и совершенствование методики и технологической оснастки для проведения ультразвукового контроля цилиндрических изделий с использованием хордового способа // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2002. – № 1. - С. 39–40.
 - Буденков, Г.А. Акустическая дефектоскопия прутков с использованием многократных отражений / Г.А. Буденков, О.В. Недзвецкая, Б.А. Буденков, Т.Н. Лебедева, Д.В. Злобин. — Дефектоскопия. — 2004. — №8. — С. 50–55.
 41. Буденков, Г.А. Взаимодействие крутильных волн с продольными трещинами труб / Г.А. Буденков, О.В. Недзвецкая, Д.В. Злобин, С.А. Мурашов // Дефектоскопия, 2006, №6. — С. 57–66.
 42. Лебедев А.А., Шарко А.В. Акустический контроль механических свойств стальных изделий поверхностными волнами Рэлея // Дефектоскопия. – 1990. – № 10. – С. 36–41.
 43. Abraham O. The use of surface waves for non-destructive testing of concrete structures // Insight. – 2000. – V. 42, № 7. – P. 444–446.
 44. ПНАЭ Г-7-014-89 ОСТ. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Часть I. Контроль основных материалов (полуфабрикатов). – М.: ЦНИИатоминформ, 1990. – 41 с.
 45. Grubin H.L. Direct electromagnetic generation of compressional waves in metals in static magnetic fields // IEEE Trans. – SU-17, 1970. – P. 227–229.
 46. Dickhaut E. Rechnergestützte Ultraschallprüfung von Turbinenscheiben // Jahrestag d. DGZfP Essen. – 1984. – Vortrag Nr 35. – P. 881–890.
 47. Wallace. W.D. Electromagnetic generation of ultrasound in metals // Int. Non Destr. Test. - 1971. – № 2. – P. 309–334.
 48. Кириков А.В., Забродин А.Н., Комлик А.В. Методы и средства ультразвукового контроля проката с применением электромагнитно – акустических преобразователей // В мире неразрушающего контроля. – 1999. – № 3. – С. 18–20.
 49. Cole P. The generation and reception of ultrasonic surface waves in mild steel, at high temperatures // Ultrasonics. – 1978. – № 4 (16). – P. 151–155.
 50. Moran T., Panos R. Electromagnetic generation of electronically steered ultrasonic bulk waves // Journ. Appl. Phys. – 1976. № 5 (47). – P. 2225.
 51. Whittington K.R. Ultrasonic testing at high temperatures // Phys. Techn. - 1978. - № 2. - P. 62 – 67.
 52. Вісков О.В. Підвищення вірогідності та інформативності акустичного контролю трубних виробів : Автореф. канд. дис. Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2003. – 20 с.
 53. Сучков Г.М. Новые методы ультразвукового контроля ЭМА способом на основе адаптации радиолокационных технологий // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005. – № 3. – С. 38–42.
 54. Aliouane S., Hassam M. Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) / Design Evaluation of their Performances. 15-th WCNDT. Roma. 2000. – P. 334–341.
 55. Сучков Г.М. Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 12. – С. 36–39.
 56. Никифорова Ж. Г., Булавин А.Н., Ягер В. и др. УЗК трубопроводов с изоляционными покрытиями с применением ЭМА – преобразователей // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – № 2. – С. 42–45.
 57. Руженцев И.В., Сучков Г.М., Марченко А.В. Электромагнитно-акустический способ измерений. Электромагнитно -

- акустические преобразователи // Радиотехника: Всеукр. міжведомственный н.-т. сб. Харьков: ХНУРЭ, 2004. – Вып. 136. – С. 62–66.
58. Домаркас В.И., Кажис Р.-И.Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. – Вильнюс: Минтае, 1975. – 258 с.
 59. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
 60. Чабанов В.Е. Лазерный ультразвуковой контроль материалов. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. – 232 с.
 61. Чабанов В.Е. Термоупругое возбуждение акустических сигналов лазером в твердых телах со свободной границей // Дефектоскопия. – 1995. – № 7. – С. 25–33.
 62. Гуревич С.Ю., Петров Ю.В., Шульгинов А.А., Прокопьев К.В. О границах механизмов термоакустического преобразования при лазерной генерации ультразвука в металлах // Дефектоскопия. – 2001. – №4. – С. 69-75.
 63. Кондратьев А.И., Луговой В.А. Датчик акустических сигналов для высокоточных измерений // Дефектоскопия. – 1990. – №3. – С. 30–38.
 64. О возбуждении ультразвуковых волн в металлах емкостным преобразователем. Часть 1/ Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Ноздрачева Е.Л., Карпусь В.В. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев. – 2015 – № 2
 65. Забродин А.Н., Малинка С.А. Применение лазеров в промышленных системах автоматизированного УЗК проката и труб // В мире неразрушающего контроля. 2004. - №3. – С.11-13.
 66. Ноздрачева К.Л., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Романок М.И. О возбуждении ультразвуковых волн в металлах емкостным преобразователем. Часть 1 // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2015, №1, с. 45-50.
 67. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Ноздрачева Е.Л. Модель ультразвуковых электромеханических приемных преобразователей ультразвуковых волн Релея // Техническая электродинамика. - 2016. - № 6. – С. 83–89
 68. Ноздрачева Е.Л., Сучков Г.М., Петрищев О.Н. Особенности возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным преобразователем // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація», 2015, с.165-171
 69. Дробот Ю.В. Возбуждение коротких упругих импульсов емкостным методом / Ю.В. Дробот, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Дефектоскопия. – 1983. – №3. – С.35-37.
 70. Кондратьев А.И. Датчик акустических сигналов для высокоточных измерений/ А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Дефектоскопия. – 1990. – № 3. – С. 30–38.
 71. Кондратьев А.И., Луговой В.А. Измерение скорости и затухания Рэлеевских волн емкостным преобразователем / А.И. Кондратьев, В.А. Луговой // Измерительная техника. – 1991. – №5. – С. 43–44.
 72. Измерение скорости распространения и коэффициента затухания продольных волн в тонких образцах /А. И. Кондратьев, А. А. Кондратьев, В. И. Римлянд, К. А. Драчѳв // Вестник ТОГУ. 2013. № 4(31). – С. 17-24
 73. Безконтактний емнісний спосіб збудження і прийому пружних хвиль / Сучков Г.М., Ноздрачева К.Л. // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. – № 2(31). – С. 3-6
 74. Сучков Г.М. Энерго- и ресурсосберегающие приборы и технологии неразрушающего контроля / Г.М. Сучков, С.А. Алексеев, В.В. Захаренко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев, 2006. – № 4. С. 29-34.
 75. Глебова Л.В., Сучков Г.М., Петрищев О.М., Глоба С.М. Патент на корисну модель №UA72010. G01N29/34. Заявка №u201112741/ Опубл. 10.08.2012. Бюл. №15. - 3 с.
 76. Сучков Г.М., Глоба С.Н., Глебова Л.В. Возможность приема ультразвуковых импульсов преобразователями емкостного типа. – Вісник Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ», 2007, № 35, – С. 29–32.
 77. Boler F.M., Spetzel H.A., Getting I.C. Capacitance transducer with point like probe for receiving acoustic emissions // Rev. Sci. Instrum – 1984. – 55. – N 8 – P.1293-1297.
 78. Ким К.Ю. Самоустанавливающийся емкостной датчик для регистрации широкополосных ультразвуковых сигналов смещения / К.Ю. Ким, В. Сакс // Приборы для научных исследований. – 1986. – №2. – С. 133–136.
 79. Луговой В.А. Высокостабильный емкостной преобразователь ультразвуковых сигналов / В.А. Луговой, В.П. Троценко // Приборы и техника экспериментов. – 1986. – № 3. – С. 194–195.
 80. Сучков Г.М. Работы НТУ «Харьковский политехнический институт» / Сучков Г.М., Тюпа И.В., Хомяк Ю.В., Ноздрачева Е.Л., Глебова Л.В. // VII Международная конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» 11-13 марта 2008 г., Тезисы докладов – СК «Олимпийский». Москва, 2008 г. – С.191-193.
 81. Глебова Л.В. Макет засобу для збудження і прийому ультразвукових імпульсів емнісним способом / Глебова Л.В., Сучков Г.М. // II Університетська науково-практична студентська конференція магістрів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» 25-27 березня 2008 р., Тези доповідей – НТУ «ХПІ». Харків, 2008 р. – С.50-52.
 82. Сучков Г.М. Дослідження прийому акустичних імпульсів емнісним способом / Сучков Г.М., Донченко А.В., Глебова Л.В. // VII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2008: стан і перспективи» 22-23 квітня 2008 р., Збірник тез доповідей – НТУУ «КПІ». Київ, 2008 р. – С. 217–218.
 83. Сучков Г.М. Дослідження прийому акустичних імпульсів емнісним способом / Сучков Г.М., Донченко А.В., Глебова Л.В. // Перша студентська науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» 23 квітня 2008 р., Тези доповідей – НТУУ «КПІ». Київ, 2008 р. – С.94–95.
 84. Сучков Г.М. Дослідження факторів, які впливають на збудження акустичних імпульсів емнісним способом. / Сучков Г.М., Глебова Л.В. // Вестник НТУ «ХПІ»: Тематический выпуск "Приборы и методы контроля и определения состава вещества" – 2008. – №48. – С. 116–123.
 85. Сучков Г.М. Збудження ультразвукових імпульсів емнісним способом / Сучков Г.М., Глебова Л.В. // XVI Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» 4-6 червня 2008 р., Збірник тез доповідей – НТУ «ХПІ»: Харків, 2008. – С.442.
 86. Глебова Л.В. Емкостные методы неразрушающего контроля / Глебова Л.В., Сучков Г.М. // III Університетська науково-практична студентська конференція магістрів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» 14-16 квітня 2009 р., Тези доповідей Частина 2 – НТУ «ХПІ»: Харків, 2009 р. – С.170–172.
 87. Глебова Л.В. Возбуждение ультразвуковых колебаний емкостным преобразователем. / Глебова Л.В., Тюпа И.В., Григорьев А.Л., Глоба С.Н. // Вестник НТУ «ХПІ»: Сборник научных трудов "Электроэнергетика и преобразовательная техника" – 2010. – №12. – С. 192–195.
 88. Сучков Г.М. Теоретичні дослідження ультразвукового емнісного перетворювача / Сучков Г.М., Глоба С.М., Глебова Л.В. // IX Міжнародна науково-технічна конференція «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2010: стан і перспективи» 27-28 квітня 2010 р., Збірник тез доповідей – НТУУ «КПІ»: Київ, 2010 р. – С. 216–217.
 89. Григорьев А.Л. Математическая модель емкостного метода возбуждения колебаний в упругих средах. / Григорьев А.Л., Тюпа И.В., Глебова Л.В. // Вісник НТУ «ХПІ»: Тематичний випуск "Математичне моделювання в техніці та технологіях" – 2010. – №68. – С.38–51.
 90. Смирнов В. И. Курс высшей математики. Том III. Часть 2. – М.: Наука, 1974. – 672 с.

Bibliography (transliterated)

1. Paton V. E., Troyitskiy V. O., Posipayko Yu. M. Neruynivniy kontrol v Ukraini [Nondestructive testing in Ukraine] // Inform. byul. Ukrainskogo tovaristva neruynivnogo kontrolyu ta tehnicnoyi diagnostiki. –2003. – No 2(18). – P. 5–9.
2. Troitskiy V.A. Kratkoe posobie po kontrolyu kachestva svaryih soedineniy [Abridged guide to welded connections quality testing]. – Kyiv: IES im. E.O. Patona, 1997. – 224 p.
3. Suchkov G.M. Razvitie teorii i praktiki sozdaniya priborov dlya elektromagnitno – akusticheskogo kontrolya metalloizdeliy [Development of theory and practice of electromagnetic-acoustic device development for metal product testing] / dis. d.t.n., 2005. Kharkiv. - 521 p.
4. Bilokur I.P. Osnovi defektoskopiyi: Pidruchnik [Fundamentals of

- Defectoscopy: Textbook*] – Kyiv: «Azimut-Ukrayina», 2004. – 496 p.
5. Karpash O.M. Neruynivnyy kontrol ta tehnicna diagnostika naftogazovogo obladnannya ta instrumentu [*Non-destructive testing and technical diagnostics of oil and gas equipment and tools*] // Metodi ta priladi kontrolyu yakosti. – 1997. – No 1. – P. 22–24.
 6. Suchkov G.M. Priladi i metodi akustichnogo kontrolyu: navch. pos. [*Instruments and mats of acoustic control*] / G.M. Suchkov, K.L. Nozdrachova, E.V. Mischanchuk, V.M. Eroschenkov. – Harkiv: NTU «HPI», 2011. – 220 p.
 7. Tsapenko V.K., Kuts Yu.V. Osnovi ultrazvukovogo neruynivnogo kontrolyu: Pidruchnik. [*Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Control: Textbook*] Kyiv: NTUU «KPI». – 2010. – 448 p.
 8. MaEvskiy S.M., Babak V.P., Scherbak L.M. Osnovi pobudovi sistem analizu signaliv u neruynivnomu kontroli [*Fundamentals of construction of signal analysis systems in non-destructive control*]. – Kyiv: Libid, 1993. – 200 p.
 9. Terminologichnyy slovnik z neruynuyuchogo kontrolyu [*Terminological dictionary on non-destructive testing*] / I.P. Bilokur, O.S. Borovikov, V.V. Lub'yaniy. – Kyiv: iSDO, 1995. – 228 p.
 10. Nerazrushayuschiy kontrol: Spravochnik: in 7 vol. Ed. V.V. Klyuev. V.3: Ultrazvukovoy control [*Nondestructive testing: Handbook: in 7 volumes. Ed. V.V. Klyuev*] / I.N. Ermolov, Yu.V. Lange. – Moscow: Mashinostroenie, 2008. – 864 p.
 11. Ermolov I. N. Teoriya i praktika ultrazvukovogo kontrolya [*Theory and practice of ultrasonic testing*]. – Moscow: Mashinostroenie, 1981. – 240 P.
 12. Nerazrushayuschiy kontrol. In 5 books Book 2. Akusticheskie metody kontrolya: Prakt. Posobie [*Nondestructive testing. in 5 bks. V. 2. Acoustic testing methods*] / I.N. Ermolov, N.P. Aleshin, A.I. Potapov; Pod red. V.V. Suhorukova. – Moscow: Vyssh. shk., 1991. – 283 p.
 13. Ultrazvukovoy kontrol materialov: Sprav. izd. [*Ultrasonic inspection of materials*] Y. Krautkremmer, G. Krautkremmer; Tr. from German. – Moscow: Metallurgiya, 1991. – 752 P.
 14. Gusev E. A., Korolev M. V., Karpelson A. E. i dr. Pribory nerazrushayuschego kontrolya tolschiny v mashinostroenii [*Instruments for non-destructive testing of thickness in mechanical engineering*]. – Moscow: Mashinostroenie, 1993. – 144 P.
 15. Ultrazvukovoy kontrol [*Textbook: a training manual for training specialists in nondestructive testing and technical diagnostics*]. Aleshin N.P., Klyuev V.V., Bobrov V.T., Lange Yu.V., Scherbinskiy V.G. Uchebnoe posobie: uchebnoe posobie dlya podgotovki spetsialistov po nerazrushayuschemu kontrolyu i tehnichekskoy diagnostike / Pod obschey redaktsiyey V. V. Klyueva; Rossiyskoe o-vo po nerazrushayuschemu kontrolyu i tehnichekskoy diagnostike (RONKTD). Moskva, 2011. Seriya Diagnostika bezopasnosti.
 16. Nerazrushayuschiy kontrol i diagnostika. Spravochnik [*Non-destructive testing and diagnostics. Directory*] / V.V.Klyuev, F.R.Sosnin, V.N.Filipov i dr. Pod red. V.V. Klyueva. – Moscow: Mashinostroenie, 1995. – 488 p.
 17. Attestatsiya personala v oblasti nerazrushayuschego kontrolya metrologiya v nerazrushayuschem kontrole [*Certification of personnel in the field of nondestructive testing. metrology in nondestructive testing*] Klyuev S.V., Konovalov N.N., Kopyitov S.G., Soloveva M.O., Muravskaya N.P. pod obschey redaktsiyey V.V. Klyueva, Rossiyskoe obschestvo po nerazrushayuschemu kontrolyu i tehnichekskoy diagnostike (RONKTD). Moskva, 2011. Seriya Diagnostika Bezopasnosti.
 18. A1208 -prostoy i slozhnyy ultrazvukovoy tolschinomer [*A1208 - simple and complex ultrasonic thickness gauge*] Samokrutov A.A., Shevaldyikin V.G., Kozlov V. N., Pastushkov P.S., Alehin S.G., Zhukov A.V. V mire nerazrushayuschego kontrolya. 2003. No 2. P. 38.
 19. Ermolov I.N., Vopilkin A.H., Badalyan V.G. Raschety v ultrazvukovoy defektoskopii (kratkiy spravochnik) [*Calculations in ultrasonic flaw detection (short reference book)*]. – Moscow: "EHO", 2000. – 108 p.
 20. Ermolov I.N., Zenkova L.S. issledovanie zerkalno-tenevogo metoda ultrazvukovoy defektoskopii [*investigation of the mirror-shadow method of ultrasonic flaw detection*] // Defektoskopiya. – 1976. – No 2. – P. 16–23.
 21. Ermolov I.N. Difraktsionno – vremennoy metod kontrolya [*Diffraction-time control method*] // V mire nerazrushayuschego kontrolya. – 2001. – No 2. – P. 7–11.
 22. Dymkin G.Ya. Akusticheskiy trakt pri ehoimpulsnom kontrole ogranichennykh protyazhennykh izdeliy [*Acoustic path with echo impulse control of limited long products*] // Defektoskopiya. – 1990. – No 6. – P. 18–24.
 23. Baranov, V.M. Akusticheskie izmereniya v yadernoy energetike [*Acoustic measurements in nuclear power engineering*]. – Moscow: Energo-atomizdat, 1990. – 320 p.
 24. Belokurov, I.P. Defektologiya i nerazrushayuschiy kontrol: Ucheb. Posobie [*Defectology and Nondestructive Testing: Proc. allowance*]. – Kiev: Vischa shk, 1990: – 200 p.
 25. Gurvich A.K., Davyidkin A.V. Shemyi prozvuchivaniya i effektivnost sredstv sploshnogo UZK relsov [*Schemes of sounding and efficiency of means of continuous ultrasonic testing of rails*] // V mire nerazrushayuschego kontrolya. – 2003. – No 3. – P. 71–73.
 26. Kolbin I. B., Suchkov G. M. Razrabotka i sovershenstvovanie metodiki i tehnologicheskoy osnastki dlya provedeniya ultrazvukovogo kontrolya tsilindricheskikh izdeliy s ispolzovaniem hordovogo sposoba [*Development and improvement of methods and technological equipment for ultrasonic testing of cylindrical products using the chord method*] // Tehnichekskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol. – 2002. – No 1. P. 39–42.
 27. Scherbinskiy V.G. Tehnologiya ultrazvukovogo kontrolya svarnykh soedineniy [*Technology of ultrasonic testing of welded joints*]. – Moscow: TsNiiTMASh, 2003. – 396 p.
 28. Suchkov G.M. O glavnom preimushchestve EMA sposoba [*The main advantage of the EMA method*] // Defektoskopiya. – Ekaterinburg, 2000. – No 10.
 29. GSTU 32.2.04.001-2000. Defektoskopi ultrazvukovi dlya kontrolyu reoyk pri yih ekspluatatsiyi. Tehnicni vmogi. [*GSTU 32.2.04.001-2000. Ultrasonic defectoscopes for monitoring rails during their operation. Technical requirements*] // Zareestr. 07.09.2000 r. Derzh. kom. Ukraini po standartizatsiyi, metrologiyi ta sertifikatsiyi. – Kiyiv, 2000. – 16 p.
 30. PNAE G-7-030-91. Unifitsirovannyye metodiki kontrolya osnovnykh materialov (polufabrikatov), svarnykh soedineniy i naplavki oborudovaniya atomnykh energeticheskikh ustanovok. Ultrazvukovoy kontrol. Chast II. Kontrol svarnykh soedineniy i naplavki [*Unified methods for controlling basic materials (semi-finished products), welded joints and surfacing equipment for nuclear power plants. Ultrasonic inspection. Part II. inspection of welded joints and surfacing*]. – Moscow: TsNiiatominform, 1992. – 157 p.
 31. Viktorov I.A. Zvukovyye poverhnostnyie volny v tverdykh telakh [*Sound Surface Waves in Solids*]. – Moscow: Nauka, 1981. – 288 P.
 32. Vinogradova M.B., Rudenko O.V., Suhorukov A.P. Teoriya voln [*Theory of waves*]. – Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. – 384 P.
 33. Brehovskikh L.M., Godin O.A. Akustika sloistykh sred [*Acoustics of layered media*]. – Moscow: Nauka, 1989. – 412 p.
 34. Suchkov G.M., Petrishev O.N., Homyak Yu.V. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 3. Metody i sredstva povysheniya chuvstvitelnosti ultrazvukovogo kontrolya EMA sposobom: monografiya [*Theory and practice of electromagnetic-acoustic control. Part 3. Methods and means of increasing the sensitivity of ultrasonic monitoring of the EMA method: monograph*]. – Kharkiv: «Schedra sadiba plyus», 2015. – 124 p.
 35. Suchkov G.M., Petrishev O.N., Globa S.N. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 4. Eksperimentalnyie issledovaniya vozmozhnostey ultrazvukovogo kontrolya EMA sposobom: monografiya [*Theory and practice of electromagnetic-acoustic control. Part 4. Experimental studies of the possibilities of ultrasonic monitoring of the EMA method: monograph*]. – Kharkiv: «Schedra sadiba plyus», 2015. – 104 p.
 36. Migushchenko R.P., Suchkov G.M., Petrishev O.N., Desyatnichenko A.V. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 5. Osobennosti konstruirovaniya i prakticheskogo primeneniya EMA ustroystv ultrazvukovogo kontrolya metalloizdeliy. Monografiya. [*Theory and practice of electromagnetic-acoustic control. Part 5. Features of designing and practical application of EMA devices for ultrasonic inspection of metal products. Monograph*] Kharkiv: TOV «Planeta-print», 2016 – 230 p.
 37. Golden A.D. Ultrazvukovoy kontrol rezinometallicheskh konstruktivnykh volnami Lemba pri odnostoronnem dostupe so storony reziny [*Ultrasonic inspection of rubber-metal constructions by Lamb waves with unilateral access from rubber*] // Defektoskopiya. – 1993. – No 1. – P. 39–42.

38. Perov D.V. Opredelenie geometricheskikh parametrov tsilindricheskikh tel s ispolzovaniem dispersionnykh harakteristik mod uprugogo tsilindricheskogo volnovoda [Determination of the geometric parameters of cylindrical bodies using the dispersion characteristics of the modes of an elastic cylindrical waveguide] // Defektoskopiya. – 2000. – No 5. – P. 21–30.
39. Kolbin I. B., Suchkov G. M. Razrabotka i sovershenstvovanie metodiki i tehnologicheskoy osnastki dlya provedeniya ultrazvukovogo kontrolya tsilindricheskikh izdeliy s ispolzovaniem hordovogo sposoba [Development and improvement of methods and technological equipment for ultrasonic testing of cylindrical products using the chord method] // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushiy kontrol. – 2002. – No 1.
40. Budenkov, G.A. Akusticheskaya defektoskopiya prutkov s ispolzovaniem mnogokratnykh otrazheniy [Acoustic defectoscopy of rods using multiple reflections] / G.A. Budenkov, O.V. Nedzvetskaya, B.A. Budenkov, T.N. Lebedeva, D.V. Zlobin. — Defektoskopiya. — 2004. — No 8. — P. 50–55.
41. Budenkov, G.A. Vzaimodeystvie krutilnykh voln s prodolnymi treschinami trub [interaction of torsional waves with longitudinal cracks in pipes] / G.A. Budenkov, O.V. Nedzvetskaya, D.V. Zlobin, S.A. Murashov // Defektoskopiya, 2006, No 6. — P. 57–66.
42. Lebedev A.A., Sharko A.V. Akusticheskiy kontrol mekhanicheskikh svoystv stalnykh izdeliy poverhnostnyimi volnami Releya [Acoustic control of the mechanical properties of steel products by surface Rayleigh waves] // Defektoskopiya. – 1990. – No 10. – P. 36–41.
43. Abraham O. The use of surface waves for non-destructive testing of concrete structures // Insight. – 2000. – V. 42, No 7. – P. 444–446.
44. PNAE G-7-014-89 OST. Unifitsirovannyye metodiki kontrolya osnovnykh materialov (polufabrikatov), svarnykh soedineniy i naplavki oborudovaniya atomnykh energeticheskikh ustanovok. Ultrazvukovoy kontrol. Chast 1. Kontrol osnovnykh materialov (polufabrikatov) [Unified methods for controlling basic materials (semi-finished products), welded joints and surfacing equipment for nuclear power plants. Ultrasonic inspection. Part 1. Control of basic materials (semi-finished products)]. – Moscow: TsNiiatominform, 1990. – 41 p.
45. Grubin H.L. Direct electromagnetic generation of compressional waves in metals in static magnetic fields [Direct electromagnetic generation of compressional waves in metals] // IEEE Trans. – SU-17, 1970. – P. 227–229.
46. Dickhaut E. Rechnergestützte Ultraschallprüfung von Turbinenscheiben [Rechnergestützte Ultraschallprüfung von Turbinenscheiben] // Jahrestag d. DGZfP Essen. – 1984. – Vortrag Nr 35. – P. 881–890.
47. Wallace. W.D. Electromagnetic generation of ultrasound in metals [Electromagnetic generation of ultrasound in metals] // int. Non Destr. Test. - 1971. – No 2. – P. 309–334.
48. Kirikov A.V., Zabrodin A.N., Komlik A.V. Metody i sredstva ultrazvukovogo kontrolya prokata s primeneniem elektromagnitno – akusticheskikh preobrazovateley [Methods and means of ultrasonic inspection of rolled metal with the use of electromagnetic-acoustic transducers] // V mire nerazrushayushchego kontrolya. – 1999. – No 3. – P. 18–20.
49. Cole P. The generation and reception of ultrasonic surface waves in mild steel, at high temperatures // Ultrasonics. – 1978. – No 4 (16). – P. 151–155.
50. Mogan T., Ranos R. Electromagnetic generation of electronically steered ultrasonic bulk waves // Journ. Appl. Phys. – 1976. No 5 (47). – P. 2225.
51. Whittington K.R. Ultrasonic testing at high temperatures // Phys. Techn. - 1978. - No 2. - P. 62–67.
52. Viskov O.V. Pidvischennya virogidnosti ta informativnosti akustichnogo kontrolyu trubnih virobiv : Avtoref. kand. dis. [increase of probability and informativeness of acoustic control of pipe products: Author's abstract. Cand. Dis] Ivano-Frankivsk: ivano-Frankivskiy natsionalniy tehničniy universitet nafti i gazu, 2003. – 20 p.
53. Suchkov G.M. Novyye metody ultrazvukovogo kontrolya EMA sposobom na osnove adaptatsii radiolokatsionnykh tehnologiy [New methods of ultrasonic control of the EMA method based on the adaptation of radar technologies] // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushiy kontrol. – 2005. – No 3. – P. 38–42.
54. Aliouane S., Hassam M. Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) / Design Evaluation of their Performances. 15-th WCNDT. Roma. 2000. – P. 334–341.
55. Suchkov G.M. issledovanie osobennosti rasprostraneniya uprugikh voln, vzbuzhdaemykh EMA sposobom [investigation of the propagation of elastic waves excited by the EMA method] // Kontrol. Diagnostika. – 2001. – No 12. – P. 36–39.
56. Nikiforenko Zh. G., Bulavin A.N., Yager V. i dr. UZK truboprovodov s izolyatsionnymi pokrytiyami s primeneniem EMA – preobrazovateley [Ultrasonic testing of pipelines with insulating coatings using EMA converters] // V mire nerazrushayushchego kontrolya. – 2004. – No 2. – P. 42–45.
57. Ruzhentsev I.V., Suchkov G.M., Marchenko A.V. Elektromagnitno-akusticheskiy sposob izmereniy. Elektromagnitno - akusticheskie preobrazovately [Electromagnetic-acoustic method of measurements. Electromagnetic-acoustic transducers] // Radiotekhnika: Vseukr. mezhdromstvennyy n.-t. sb. Kharkiv: HNURE, 2004. – Vyip. 136. – P. 62–66.
58. Domarkas V.L., Kazhis R.-I.Yu. Kontrolno-izmeritelnyye pezoelektricheskie preobrazovately [Control and measuring piezoelectric transducers.]. – Vilnyus: Mintae, 1975. – 258 p.
59. Ultrazvukovyye pezoobrazovately dlya nerazrushayushchego kontrolya [Ultrasonic piezoelectric transducers for non-destructive testing] / Pod red. I.N. Ermolova. – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 280 p.
60. Chabanov V.E. Lazernyy ultrazvukovoy kontrol materialov [Laser ultrasonic inspection of materials]. – L.: LGU, 1986. – 232P.
61. Chabanov V.E. Termouprugoe vzbuzhdenie akusticheskikh signalov lazerom v tverdykh telah so svobodnoy granitsey [Thermoelastic excitation of acoustic signals by a laser in solids with a free boundary] // Defektoskopiya. – 1995. – No 7. – P. 25–33.
62. Gurevich S.Yu., Petrov Yu.V., Shulginov A.A., Prokopev K.V. O granitsah mekhanizmov termoakusticheskogo preobrazovaniya pri lazernoy generatsii ultrazvuka v metallakh [On the boundaries of the mechanisms of thermoacoustic transformation during laser generation of ultrasound in metals] // Defektoskopiya. – 2001. – No 4. – P. 69–75.
63. Kondratev A.I., Lugovoy V.A. Datchik akusticheskikh signalov dlya vyisokotochnykh izmereniy [Acoustic signal sensor for high-precision measurements] // Defektoskopiya. – 1990. – No 3. - P. 30–38.
64. vzbuzhdenii ultrazvukovykh voln v metallakh emkostnym preobrazovatelem. Chast 1 [On the excitation of ultrasonic waves in metals by a capacitive converter. Part 1] // Suchkov G.M., Petrishev O.N., Nozdracheva E.L., Karpus V.V. // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushiy kontrol. – Kiev. – 2015 – No 2
65. Zabrodin A.N., Malinka S.A. Primenenie lazerov v promyshlennykh sistemah avtomatizirovannogo UZK prokata i trub [Application of lasers in industrial systems of automated ultrasonic rolling and pipes] // V mire nerazrushayushchego kontrolya. 2004. - No 3. – P.11–13.
66. Nozdracheva K.L., Suchkov G.M., Petrishev O.N., Romanyuk M.I. O vzbuzhdenii ultrazvukovykh voln v metallakh emkostnym preobrazovatelem. Chast 1 [On the excitation of ultrasonic waves in metals by a capacitive converter. Part 1] // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushiy kontrol, 2015, No 1, P. 45–50.
67. Miguschenko R.P., Suchkov G.M., Petrishev O.N., Nozdrachova E.L. Model ultrazvukovykh elektromekhanicheskikh priemnykh preobrazovateley ultrazvukovykh voln Releya [Model of ultrasonic electromechanical receiving transducers of ultrasonic waves of Rayleigh] // Tehnichna elektrodinamika. - 2016. - No 6. – P. 83–89
68. Nozdracheva E.L., Suchkov G.M., Petrishev O.N. Osobennosti vzbuzhdeniya ultrazvukovykh impulsiv emkostnym preobrazovatelem [Features of excitation of ultrasonic pulses by a capacitive converter] // Naukovi pratsi Donets'kogo natsionalnogo tehnichnogo universitetu, seriya: «Obchislyvalna tehnika ta avtomatizatsiya», 2015, P.165-171.
69. Drobot Yu.V. Vzbuzhdenie korotkikh uprugikh impulsiv emkostnym metodom / Yu.V. Drobot, A.I. Kondratev, V.A. Lugovoy [Excitation of short elastic pulses by the capacitive method] // Defektoskopiya. – 1983. – No 3. – P.35–37.
70. Kondratev A.I. Datchik akusticheskikh signalov dlya vyisokotochnykh izmereniy/ A.I. Kondratev, V.A. Lugovoy [Acoustic signal sensor for high-precision measurements] // Defektoskopiya. – 1990. – No 3. – P. 30–38.
71. Kondratev A.I., Lugovoy V.A. izmerenie skorosti i zatushaniya Releevskikh voln emkostnym preobrazovatelem [Measuring the velocity and damping of Rayleigh waves by a capacitive converter] / A.I. Kondratev, V.A. Lugovoy // izmeritel'naya tehnika. – 1991. – No 5. – P. 43–44.

72. izmerenie skorosti rasprostraneniya i koeffitsienta zатуhaniya prodolnykh voln v tonkih obraztsah [Measurement of the propagation velocity and the attenuation coefficient of longitudinal waves in thin samples] / A. I. Kondratev, A. A. Kondratev, V. I. Rimlyand, K. A. Drachyov // Vestnik TOGU. 2013. No 4(31). – P. 17-24
73. Bezkontaktniy Emnisniy sposib zbudzhennya i priyomu pruzhnykh hvil / Suchkov G.M., Nozdrachova K.L. // Metodi ta priladi kontrolyu yakosti [Contactless volume method of excitation and receive of elastic waves]. – ivano-Frankivsk: iFNTUNG, 2013. – No 2(31). – P. 3–6
74. Suchkov G.M. Energo- i resursosberegayushchie pribory i tehnologii nerazrushayushchego kontrolya / G.M. Suchkov, E.A. Alekseev, V.V. Zaharenko [Energy and resource-saving devices and technologies of nondestructive testing] // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol. – Kiev, 2006. – No 4. – P. 29–34.
75. GIEbova L.V., Suchkov G.M., Petrishev O.M., Globa S.M. Patent na korisnu model No UA72010. G01N29/34. Zayavka No u201112741 / Opubl. 10.08.2012. Byul. No 15. – 3 P.
76. Suchkov G.M., Globa S.N., Glebova L.V. Vozmozhnost priema ultrazvukovykh impulsiv preobrazovatelyami emkostnogo tipa [The possibility of receiving ultrasonic pulses by capacitive type converters]. – Visnik Nats. tehn. un-tu «Harkivskiy politehniichniy institut». – Harkiv: NTU «HPI», 2007, No 35, – P. 29–32.
77. Boler F.M., Spetzler H.A., Getting I.C. Capacitance transducer with point like probe for receiving acoustic emissions // Rev. Sci. Instrum – 1984. – 55. – N 8 – R.1293-1297.
78. Kim K.Yu. Samoustanavlivayushchiysya emkostnoy datchik dlya registratsii shirokopolosnykh ultrazvukovykh signalov smescheniya / K.yu. Kim, V. Saks [Self-Mounting Capacitive Sensor for Detection of Broadband Ultrasonic Offset Signals] // Pribory dlya nauchnykh issledovaniy. – 1986. – No 2. – P. 133–136.
79. Lugovoy V.A. Vvisokostabilniy emkostnoy preobrazovatel ultrazvukovykh signalov [Highly stable capacitive ultrasonic transducer] / V.A. Lugovoy, V.P. Trotsenko // Pribory i tehnika eksperimentov. – 1986. – No 3. – P. 194–195.
80. Suchkov G.M. Raboty NTU «Kharkivskiy politehniicheskiiy institut» / Suchkov G.M., Tyupa I.V., Homyak Yu.V., Nozdracheva E.L., Glebova L.V. // VII Mezhdunarodnaya konferentsiya «Nerazrushayushchiy kontrol i tehnicheskaya diagnostika v promyshlennosti» [VII international Conference "Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in industry"] 11–13 marta 2008 g., Tezisy dokladov – SK «Olimniyskiy». Moscow, 2008 g. – P.191–193.
81. Glebova L.V. Maket zasobu dlya zbudzhennya i priyomu ultrazvukovykh impulsiv Emnisnim sposobom / Glebova L.V., Suchkov G.M. [Layout of a means for excitation and reception of ultrasonic pulses in a capacitive way] // ii Universitetska naukovopraktichna studentska konferentsiya magistrantiv Natsionalnogo tehniichnogo universitetu «Harkivskiy politehniichniy institut» 25–27 bereznya 2008 r., Tezi dopovidey – NTU «HPI». KHarkiv, 2008 r. – P.50–52.
82. Suchkov G.M. Doslidzhennya priyomu akustichnykh impulsiv Emnisnim sposobom [investigation of reception of acoustic impulses by a capacitive way] / Suchkov G.M., Donchenko A.V., Glebova L.V. // VII Mizhnarodna naukovotehnichna konferentsiya «Priladobuduvannya 2008: stan i perspektivi» 22-23 kvitnya 2008 r., Zbirnik tez dopovidey – NTUU «KPI». Kiyiv, 2008 r. – P. 217–218.
83. Suchkov G.M. Doslidzhennya priyomu akustichnykh impulsiv Emnisnim sposobom [investigation of reception of acoustic impulses by a capacitive way] / Suchkov G.M., Donchenko A.V., GIEbova L.V. // Persha studentska naukovotehnichna konferentsiya «Priladobuduvannya: stan i perspektivi» 23 kvitnya 2008 r., Tezi dopovidey – NTUU «KPI». Kiyiv, 2008 r. – P.94–95.
84. Suchkov G.M. Doslidzhennya faktoriv, yaki vplyvayut na zbudzhennya akustichnykh impulsiv Emnisnim sposobom [investigation of factors that influence the excitation of acoustic impulses by capacitive way]. / Suchkov G.M., GIEbova L.V. // Vestnik NTU «HPi»: Tematicheskyy vyipusk "Pribory i metody kontrolya i opredeleniya sostava veschestva" – 2008. – No 48. – P. 116–123.
85. Suchkov G.M. Zbudzhennya ultrazvukovykh impulsiv Emnisnim sposobom / Suchkov G.M., Glebova L.V. [Excitation of ultrasonic pulses by a capacitive way] // XVI Mizhnarodna naukovopraktichna konferentsiya «informatsiyni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya» 4-6 chervnya 2008 r., Zbirnik tez dopovidey – NTU «HPI». Harkiv, 2008. – P.442.
86. Glebova L.V. Emkostnyie metody nerazrushayushchego kontrolya [Volumetric methods of nondestructive testing] / Glebova L.V., Suchkov G.M. // iii Universitetska naukovopraktichna studentska konferentsiya magistriv Natsionalnogo tehniichnogo universitetu «Harkivskiy politehniichniy institut» 14-16 kvitnya 2009 r., Tezi dopovidey Chastina 2 – NTU «HPi». Harkiv, 2009 r. – P.170-172.
87. Glebova L.V. Vozbuzhdenie ultrazvukovykh kolebaniy emkostnyim preobrazovatelem. [Excitation of ultrasonic oscillations by a capacitive transducer] / Glebova L.V., Tyupa I.V., Grigorev A.L., Globa S.N. // Vestnik NTU "HPI": Sbornik nauchnykh trudov "Elektroenergetika i preobrazovatel'naya tehnika" – 2010. – No 12. – P. 192-195.
88. Suchkov G.M. Teoretichni doslidzhennya ultrazvukovogo Emnisnogo peretvoryuvacha [Theoretical studies of ultrasonic capacitive transducer] / Suchkov G.M., Globa S.M., Glebova L.V. // III Mizhnarodna naukovotehnichna konferentsiya «PRILADOBUDUVANNYA 2010: stan i perspektivi» 27–28 kvitnya 2010 r., Zbirnik tez dopovidey – NTUU «KPI». Kiyiv, 2010 r. – P. 216-217.
89. Grigorev A.L. Matematicheskaya model emkostnogo metoda vzbuzhdeniya kolebaniy v uprugih sredah. / Grigorev A.L., Tyupa I.V., Glebova L.V. [Mathematical model of the capacitive method of excitation of oscillations in elastic media] // Visnik NTU "HPI": Tematichniy vipusk "Matematichne modelyuvannya v tehniitsi ta tehnologiyah" – 2010. – No 68. – P.38-51.
90. Smirnov V. I. Kurs vyisshhey matematiki. Vol. III. Chast 2 [Course of higher mathematics. Volume III. Part 2]. – Moscow: Nauka, 1974. – 672 p.

Надійшла (received) 12.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Методи и средства ультразвукового контроля металлоизделий трубчатого, стержневого и пластинчатого типа (Обзор ч.1) / С.Ю. Плеснецов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С 49–61 – Библиогр.: 90 назв. – ISSN 2519-2671

Методи і засоби ультразвукового контролю металовиробів трубчатого, стрижневого та пластинчатого типу (Огляд ч.1) / С.Ю. Плеснецов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С 49–61 – Библиогр.: 90 назв. – ISSN 2519-2671

Methods and means of ultrasonic control of metal products of tubular, rod and plate type (Review p.1) / S.Yu. Plesnetsov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 49–61. – Bibl.:90. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плеснецов Сергій Юрійович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Комп’ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (050) 841-30-09; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com.

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

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

УДК 621.771.63

Ю.А. ПЛЕСНЕЦОВ, Е.Н. ХРИСТИЧЕНКО, А.Н. ХРИСТИЧЕНКО**АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ
С ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОВТОРЯЮЩИМИСЯ ГОФРАМИ**

Выполнены исследования процесса валковой формовки профилей с периодически повторяющимися гофрами (высокой жесткости). Получены результаты, адекватно отражающие качественную сторону процесса формовки продольных периодических гофров, вместе с тем, заданные граничные условия требуют дальнейшего уточнения. Для отработки модели формообразования продольных периодических гофров и оценки ее достоверности необходимы экспериментальные исследования характера распределения поверхностных деформаций в очаге деформации. Для более точного анализа процесса формообразования профилей с периодически повторяющимися гофрами применен метод конечных элементов. Расчеты поверхности очага деформации, показали, что длина очага, соответствующая минимуму суммарной работы деформации, равна 110 мм при высоте гофра 36 мм. Получено хорошее совпадение объемов всех конечных элементов. Расхождения не превышали 5%. Рассчитаны поверхности очага деформации для двух задач с различными граничными условиями. При нахождении работы деформирования принята упругопластическая модель с упрочнением по линейному закону. При решении задачи, варьировались граничные условия в осевой плоскости валков и длина очага деформации. Получены зависимости для определения параметров очага деформации, усилий на валках, крутящих моментов и др.

Ключевые слова: профили с периодически повторяющимися гофрами, формовка в валках, метод конечных элементов, очаг деформации, усилия на валках, крутящие моменты.

Виконані дослідження процесу валкового формування профілів з періодично повторюваними гофрами (високої жорсткості). Отримані результати, які адекватно відображають якісну сторону процесу формування поздовжніх періодичних гофрів, разом з тим, задані граничні умови вимагають подальшого уточнення. Для відпрацювання моделі формоутворення поздовжніх періодичних гофрів і оцінки її достовірності необхідні експериментальні дослідження характеру розподілу поверхневих деформацій в осередку деформації. Для більш точного аналізу процесу формоутворення профілів з періодично повторюваними гофрами застосований метод скінчених елементів. Розрахунки поверхні осередку деформації, показали, що довжина осередку, відповідна мінімуму сумарної роботи деформації, дорівнює 110 мм при висоті гофра 36 мм. Отримано гарний збіг обсягів усіх скінчених елементів. Розбіжності не перевищували 5%. Розраховані поверхні осередку деформації для двох задач з різними граничними умовами. При знаходженні роботи деформування прийнята пружно-пластична модель зі зміцненням за лінійним законом. При вирішенні задачі, варіювалися граничні умови в осевій площині валків і довжина осередку деформації. Отримано залежності для визначення параметрів осередку деформації, зусиль на валках, обертових моментів і ін.

Ключові слова: профілі з періодично повторюваними гофрами, формування в валках, метод скінчених елементів, осередок деформації, зусилля на валках, обертові моменти.

The process of roll forming of profiles with periodically repeating corrugations (high rigidity) is performed. The results that adequately reflect the qualitative aspect of the shaping process of longitudinal periodic corrugations are obtained, at the same time, the specified boundary conditions require further refinement. To test the model for forming longitudinal periodic corrugations and to evaluate its reliability, experimental studies of the nature of the distribution of surface deformations in the deformation zone are necessary. For a more accurate analysis of the process of shaping profiles with periodically repeating corrugations, the finite element method is applied. Calculations of the surface of the deformation center showed that the length of the focus corresponding to a minimum of the total deformation work is 110 mm with a corrugation height of 36 mm. A good coincidence of the volumes of all finite elements is obtained. Divergences did not exceed 5%. The surfaces of the deformation center are calculated for two problems with different boundary conditions. When the deformation work is done, an elastic-plastic model is adopted with linear-law hardening. When solving the problem, the boundary conditions in the axial plane of the rolls and the length of the deformation center varied. Dependences are obtained for determining the parameters of the deformation center, the forces on the rolls, the torque moments, and so on.

Keywords: profiles with periodically repeating corrugations, forming in rolls, finite element method, deformation center, roll forces, torques.

Введение. Исследованиям процесса валковой формовки профилей с периодически повторяющимися гофрами (высокой жесткости) посвящен ряд работ, в которых вариационными методами с использованием полей скоростей перемещений, задаваемых по объему очага деформации, получены зависимости для определения параметров очага деформации, усилий на валках, моментов и др.

Однако в этих работах принимались многочисленные упрощения и допущения, например:

- боковые элементы профилей считались идеальными пластинами;

- не учитывалась реальная конфигурация очага деформации перед осевой плоскостью валков и т.п.; вследствие чего, расчеты по полученным зависимостям не обеспечивали необходимой точности результатов.

Методика проведения исследований. Для более точного решения целесообразно применение метода конечных элементов [1-3], позволяющего учитывать все особенности геометрии заготовки и

калибра. Метод достаточно легко реализуется на ПК, что существенно повышает точность расчета и обеспечивает возможность его корректировки для получения качественно правильной картины деформированной сетки.

Основные результаты исследований. Для решения большинства задач при разработке технологии производства профилей высокой жесткости необходимо предварительно найти форму свободной поверхности перед осевой плоскостью валков при известных условиях, заданных в координатах выделенной для рассмотрения области. При этом принимаются следующие допущения:

- после деформации сохраняется первоначальный объем каждого конечного элемента;

- узлы конечных элементов не разрываются;

- поверхность действительного очага деформации принимает форму, соответствующую минимуму суммарной работы деформации всех конечных элементов.

При нахождении работы деформации принята упруго-пластическая модель с упрочнением по

линейному закону. Используя алгоритм решения основной задачи, а также варьируя граничные условия в осевой плоскости валков и длину очага деформации, можно решать следующие задачи:

а) известны форма инструмента и усилие P формовки одного гофра. Требуется определить (без учета пружинения профиля) высоту Δh получаемого гофра из условия минимума полной потенциальной энергии

$$\sum_{k=1}^m A_{\text{деф}} k - P \cdot \Delta h \rightarrow \min, \quad (1)$$

где m - число конечных элементов

$A_{\text{деф}} k$ - расчетная работа деформации конечного элемента.

б) известны формы инструмента, жесткость клетки G , зазор между валками до начала формовки h_3 . Требуется определить Δh из условий минимума суммарной работы деформации металла клетки:

$$\sum_{k=1}^m A_{\text{деф}} k + \frac{1}{2} G (h_3 - h_{31})^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где h_{31} - зазор между валками под нагрузкой.

Если обозначить высоту элемента, формирующего гофр, через h , легко получить Δh (без учета пружинения) как разность между h и пружиной клетки ($h_3 - h_{31}$).

Для того, чтобы начать расчет координат узлов конечных элементов, необходимо задать произвольные координаты поверхности очага деформации. В настоящей работе они получены путем линейной интерполяции координат узлов конечных элементов в осевой плоскости валков и на входе в очаг деформации (считая, что здесь они те же, что и до деформации).

Алгоритм решения основной задачи (определения действительной формы очага деформации) состоит из 10 парных этапов. На каждом этапе рассчитываются координаты узлов деформированных конечных элементов:

- 1) из условия сохранения их объемов;
- 2) из условий минимума суммарной работы деформации.

Алгоритм для первой части каждого этапа заключается в последовательном (три инерции) уменьшении для каждого общего узла четырех смежных конечных элементов (имеющего номер l) величины

$$\Phi_{l1} = \sum_{k=1}^4 (V_{0kl} - V_{1kl})^2, \quad (3)$$

где V_{0kl}, V_{1kl} - расчетный объем конечного элемента до и после деформации, соответственно.

Поскольку объем тонкой оболочки (рассматриваемый очаг деформации) равен произведению площади ее поверхности на толщину листа, то условие (3) эквивалентно следующему функционалу:

$$\Phi_{l1} = \sum_{k=1}^4 (\mu_{kl} F_{0kl} - F_{1kl})^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где F_{0kl}, F_{1kl} - площадь конечного элемента до и после деформации, соответственно;

μ_{kl} - отношения начальной и конечной толщин конечного элемента, определяемое его растяжением:

$$\mu_{kl} > 1.$$

Площадь четырехугольного конечного элемента рассчитывается как площадь двух треугольных элементов. Площадь треугольных конечных элементов в пространстве рассчитывали по формуле Герона

$$S = \sqrt{p(p - a_1)(p - a_2)(p - a_3)}, \quad (5)$$

где p - полупериметр;

a_1, a_2, a_3 - длины сторон треугольника, каждая из которых рассчитывается по формуле

$$a_k =$$

$$\sqrt{(x_{1k} - x_{2k})^2 + (y_{1k} - y_{2k})^2 + (z_{1k} - z_{2k})^2}. \quad (6)$$

Здесь x_{1k}, y_{1k}, z_{1k} - координаты одной из точек отрезка (с номером $1k$);

x_{2k}, y_{2k}, z_{2k} - координаты второй точки (с номером $2k$).

Значения координат, соответствующие минимуму (4), запоминаются в массиве координат вместо прежних и используются в расчете координат узлов следующих четырех смежных конечных элементов.

В алгоритме для второй части каждого этапа (одна инерция) также используется метод покоординатного спуска. При этом должно соблюдаться условие

$$\Phi_{2l} = \sum_{k=1}^4 A_{\text{деф}} k_l \rightarrow \min. \quad (7)$$

Поскольку при валковой формовке профилей высокой жесткости преобладает деформация вытяжки, величиной работы деформации изгиба пренебрегаем.

Работу деформации каждого конечного элемента рассчитывали по зависимости

$$A_{\text{деф}} k = \sigma_{ik} \varepsilon_{ik} F_{0k} s, \quad (8)$$

где σ_{ik} - интенсивность напряжений;

ε_{ik} - интенсивность деформации;

F_{0k} - площадь конечного элемента до деформации;

s - толщина полосы, из которой изготавливается профиль.

Интенсивность деформации рассчитывали по формуле

$$\varepsilon_{lk} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{xk} - e_{yk})^2 + (e_{yk} - e_{zk})^2 + (e_{zk} - e_{xk})^2}. \quad (9)$$

Составляющие интенсивности деформации определяли по формулам

$$e_{xk} = \frac{a_{0k} - a_{1k}}{a_{0k}};$$

$$e_{yk} = \frac{b_{0k} - b_{1k}}{b_{0k}};$$

$$e_{zk} = -e_{xk} - e_{yk}, \quad (10)$$

где a_{0k}, a_{1k} - длина конечного элемента в направлении, перпендикулярном накоплению формовки, соответственно до и после деформации;

b_{0k}, b_{1k} - то же в направлении формовки.

Интенсивность напряжений рассчитывали по зависимости

$$\sigma_{ik} = \begin{cases} E_{\varepsilon k} & \text{при } E_{\varepsilon k} \leq \sigma_T \\ \sigma_T + \alpha(\varepsilon_k - \frac{\sigma_T}{E}) & \text{при } E_{\varepsilon k} > \sigma_T \end{cases} \quad (11)$$

где E - модуль упругости;

σ_T - предел текучести;

α - коэффициент упрочнения.

Усилие формообразования гофров определяли по зависимости

$$P = \frac{\sum_{k=1}^m A_{\text{деф } k}}{\Delta h} \quad (12)$$

Крутящий момент, необходимый для формообразования гофра определяли по зависимости

$$M = \frac{\sum_{k=1}^m A_{\text{деф } k} R}{l_{\text{од}}} \quad (13)$$

где $l_{\text{од}}$ - длина очага деформации.

Особенностью данной работы является учет растяжения каждого конечного элемента посредством отношения $F_1/F_Q = \mu_k$, входящего в формулу (4), в соответствии с реальной геометрией очага деформации при формовке профилей высокой жесткости.

Рассмотрим форму очага деформации при установившемся процессе формовки периодических гофров (то есть при формовке их участков, имеющих постоянную высоту). Геометрию очага деформации наблюдали в заторможенных валках.

На участке заготовки между продольными осями двух соседних формируемых гофров перед осевой плоскостью валков можно выделить три характерные зоны (рис. 1). Зона I ограничена спереди осевой плоскостью валков, сзади - дугой некоторой кривизны, идущей от одного гофра к другому, с боков - основаниями гофров. В этой зоне металла сжат и полностью находится в плоскости формовки. Далее расположена зона II, в которой металл выпучивается от плоскости формовки до максимальной высоты (примерно равной высоте формируемого гофра), а затем выпучивание постепенно уменьшается до нуля. Гребни располагаются под углом примерно 45° к продольной оси гофров и доходят до середины плоского участка между ними. В зоне III весь металл находится в плоскости заготовки.

Осевая плоскость валков

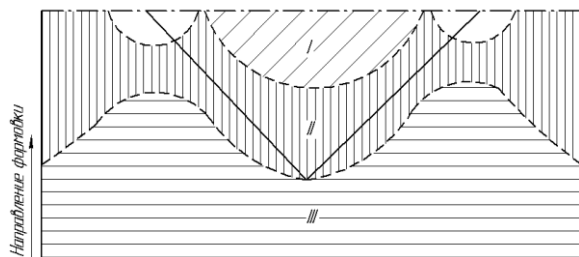


Рис. 1 - Характерные зоны очага деформации перед осевой плоскостью валков (вид сверху)

Если снять внешнюю нагрузку, подняв один из валков, почти вся зона выпучивается, изменяет форму. Четко выявляются небольшие пластические растянутые изогнутые (в плане) участки, примыкающие к гофрам под углом примерно 45° по отношению к их продольной оси. Внутри прямого

угла, образуемого двумя такими участками, примыкающими к одному и тому же гофру, полоса поднимается от плоскости формовки до максимальной высоты гофра.

Рассматривая участок, ограниченный продольной осью гофра и серединой плоского участка между двумя соседними гофрами (половина симметричного очага деформации), в первом приближении считаем, что расположенная под углом 45° к направлению формовки деформирования зона условно делит рассматриваемый очаг на два участка (рис. 2). На участке I между осевой плоскостью валков и названной зоной металл в основном растянут в поперечном направлении, на участке II преобладает растяжение в продольном направлении.

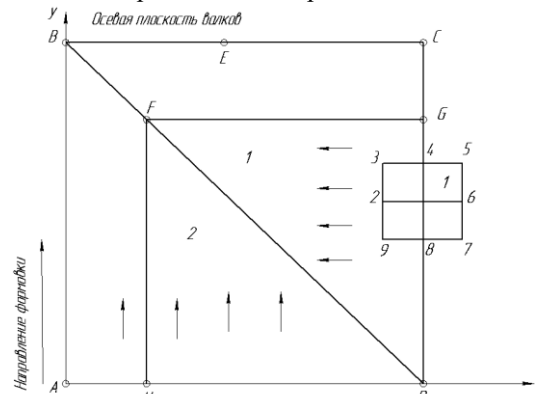


Рис. 2 - Расчетная схема растяжения очага деформации при формовке продольного гофра

На рис. 2 точка E - точка на контуре гофра, точка B соответствует наибольшей его высоте. Отрезок $AD=BC$ - половина шага между гофрами, $AB=CD$ - длина очага деформации, BE - половина ширины гофра. Точками 1, 2...9 обозначены номера узлов четырех смежных конечных элементов для пояснения условий симметрии, которые будут рассмотрены ниже.

Величину μ , характеризующую растяжение, определяли следующим образом.

Обозначим через h_B высоту гофра, через h_F - высоту очага деформации в произвольной точке F на диагонали BD. Величина h_F определяется путем линейной интерполяции:

$$h_F = h_B \frac{DF}{BD} \quad (14)$$

Для зоны BCD

$$\mu_1 = \frac{FG}{l_x} = \sqrt{\frac{h_F^2 + l_x^2}{l_x^2}} \approx 1 + \frac{h_F^2}{2l_x^2} \quad (15)$$

Для зоны ABD

$$\mu_2 = \frac{FH}{l_y} \approx 1 + \frac{h_F^2}{2l_y^2} \quad (16)$$

Для конечных элементов, расположенных на диагонали BD

$$\mu_3 = \mu_1 \cdot \mu_2$$

Были рассчитаны поверхности очага деформации для двух задач с различными граничными условиями на линиях AB и CD.

Граничные условия на линиях BC и AD для обеих задач принимали одни и те же. Отрезки оси X между линиями AB и EC разбивали на n равных частей. Координаты z на отрезке AD и EC принимали равными нулю, на отрезке BE - в соответствии с формой гофра.

Для первой задачи граничные условия на линиях AB и CD принимали следующим образом: отрезки оси между линиями BC и AD разбивали на равные части; координаты z на линии AB задавали по форме инструмента, на линии CD принимали равными нулю.

Для второй задачи на линиях AB и CD принимали условия симметрии. При расчете координат узлов конечных элементов, лежащих на линиях, принимали условия симметрии. При расчете координат узлов конечных элементов, лежащих на линиях AB и CD, координаты симметричных точек определяли по формулам:

$$\begin{aligned}x_3 - x_4 &= x_4 - x_5; x_2 - x_1 = x_1 - x_6; x_9 - x_1 \\ &= x_8 - x_7; \\ y_3 &= y_5; y_2 = y_6; y_9 = y_7; \\ z_3 &= z_5; z_2 = z_6; z_9 = z_7.\end{aligned}\quad (17)$$

Расчеты поверхности очага деформации для первой задачи, показали, что длина очага, соответствующая минимуму суммарной работы деформации, равна 110 мм при высоте гофра 36 мм (профиль боковой обшивки вагонеток «Корум Дружковский машиностроительный завод»). Получено хорошее совпадение объемов всех конечных элементов. Расхождения не превышали 5%.

На модели, построенной по результатам расчета (рис. 3), видна зона растяжения в поперечном направлении (см. рис. 2). Однако изгиб проекции линий в сторону слишком велик, следовательно, расчетная величина поперечного растяжения значительно завышена по сравнению с фактической величиной.

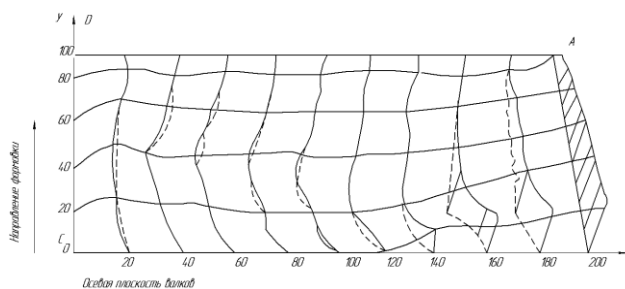


Рис. 3 - Расчетная форма очага деформации, полученная методом конечных элементов с использованием граничных условий для первой задачи

Расчеты для второй задачи дают меньшую на 40% (по сравнению с первой) длину очага деформации. Волна (выпучивание поверхности) расположена под углом 15° к линии. При экспериментальной формовке профиля этот угол значительно больше ($30-45^\circ$). Расчетная высота волны в два раза меньше максимальной высотой гофра. Фактическая высота волны в процессе формовки профиля равна максимальной высоте гофра.

Выводы.

1. Получены результаты, правильно отражающие качественную сторону процесса формовки продольных периодических гофров, вместе с тем, заданные граничные условия требуют дальнейшего уточнения.

2. Для отработки модели формообразования продольных периодических гофров и оценки ее достоверности необходимы экспериментальные исследования характера распределения поверхностных деформаций в очаге деформации.

Список літератури

1. *Зенкевич О.* Конечные элементы и аппроксимация. / *О. Зенкевич, К. Морган.* - Москва: Мир, 1986. - 318 с.
2. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов / - Москва: Мир, 1979. - 392 с.
3. *Тришевский, И.С.* Теоретические основы процесса профилирования: монография / *И.С. Тришевский, М.Е. Докторов.* - Москва: Металлургия, 1980. - 287 с.

Bibliography (transliterated)

1. *Zenkevich O., Morgan K.* Konechnyye elementy i approksimatsiya. - Mosvov: Mir. 1986. - 318 p.
2. *Segerlind L.* Primeneniye metoda konechnykh elementov / - Mosvov: Mir. 1979. - 392 p.
3. *Trishevskiy. I.S.* Teoreticheskiye osnovy protsessu profilirovaniya: monografiya / *I.S. Trishevskiy. M.E. Doktorov.* - Mosvov: Metallurgiya. 1980. - 287 p.

Поступила (received) 13.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Разработка и исследование технологии производства профилей переменного сечения / Ю.А. Плеснецов, Е.Н. Христиненко, А.Н. Христиненко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – №36(1258). – С. 62–66 – Библиогр.: 3 назви.– ISSN 2519-2671

Розробка та дослідження технології виробництва профілів змінного перетину / Ю.О. Плеснецов, С.М. Христиненко, А.М. Христиненко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – №36(1258). – С. 62–66 – Библиогр.: 3 назви.– ISSN 2519-2671

Development and research of production technology of profiles of variable cross-section / Yu. A. Plesnetsov, E.N. Khristichenko, A.N. Khristichenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 62–66. – Bibl.:3. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плесецов 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.

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

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

Khristichenko 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.

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

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

Khristichenko 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.

УДК 621.762.4.043

Н. О. РУДЕНКО**ВИРОБНИЦТВО ТА СТРУКТУРА ПОРИСТОГО ЗАЛІЗА
З КОНТРОЛЬОВАНОЮ ПОРИСТІСТЮ ТА РОЗМІРОМ ПОР**

Розглянуто технологію виготовлення високопористих матеріалів на основі порошку заліза. Для створення високої пористості застосовували порошки бікарбонату амонію, хлориду натрія, гідрокарбонату натрія. Вивчено закономірності пресування порошкових сумішей, спікання пресовок. Для отримання якісних високопористих виробів рекомендується застосовувати бікарбонат амонію. Встановлено вплив тиску пресування і складу сумішей на основі заліза та бікарбонату амонію на мікроструктуру пористих зразків. Після спікання відносна пористість зразків незначно зменшується, бо пористість визначається порами, що утворюються після видалення пороутворювача.

Ключові слова: високопористі матеріали, пороутворювач, ущільнення, усадка, мікроструктура, спечені вироби.

Рассмотрена технология изготовления высокопористых материалов на основе порошка железа. Для создания высокой пористости применяли порошки бикарбоната аммония, хлорида натрия, гидрокарбоната натрия. Изучены закономерности прессования порошковых смесей, спекания пресовок. Для получения качественных высокопористых изделий рекомендуется применять бикарбонат аммония. Установлено влияние давления прессования и состава смесей на основе железа и бикарбоната аммония на микроструктуру пористых образцов. После спекания относительная пористость образцов незначительно уменьшается, потому что пористость определяется порами, образующимися после удаления порообразователя.

Ключевые слова: высокопористые материалы, порообразователь, уплотнение, усадка, микроструктура, спеченные изделия.

The powder metallurgy route for manufacturing of highly porous iron based materials was considered. To increase porosity the powders of ammonium, bicarbonate sodium chloride and sodium bicarbonate were mixed with iron powder. The mixtures of basic iron powder and pore-forming materials were compacted and sintered. Pore-formers were removed during or after sintering leaving additional pores. The influence of mixture composition on compaction, amount of pore-former on sintering and microstructure of sintered parts were studied. Ammonium bicarbonate suits to this requirement and can be recommended for usage at production of high quality porous parts. The influence of compaction pressure and mixture composition on the microstructure of porous samples is provided. After sintering the relative porosity of the samples decreases insufficient, because porosity is determined by large pores formed after pore-former removal. With increase of pore-former content in the mixture the porosity of sintered products increases and with increase of compaction pressure their porosity slightly decreases.

Keywords: highly porous materials, pore-former, densification, microstructure, shrinkage, sintered parts.

Вступ. Пористі металеві матеріали знаходять широке застосування в машинобудуванні, хімічній, медичній, харчовій і інших галузях промисловості. Найчастіше для їхнього виготовлення застосовують технологію порошкової металургії, що включає пресування та спікання порошоків або їх сумішей. У деяких випадках здійснюється спікання засипання порошоків без пресування [1]. Рівень пористості, що досягається при цьому (відношення об'єму пор до загального об'єму виробу) не перевищує 30–40 % [2]. Останнім часом з'явилася потреба в матеріалах з більш високою пористістю. Такі матеріали знаходять застосування у фільтрах, гасителях вібрацій, у якості звукобірних елементів, анодів і катодів теплових осередків, а також при виготовленні медичних імплантатів [3]. Для підвищення пористості вихідні порошки змішують із пороутворювачами, у якості яких використовують поліметилметакрилат, бікарбонат амонію, хлорид амонію, хлорид натрію, карбамід і інші матеріали [4–8].

Метою роботи є визначення впливу виду деяких типових пороутворювачів на процес пресування порошкових сумішей і спікання отриманих пресовок, а також вивчення їх мікроструктури.

Методика експериментальних досліджень. У якості базового матеріалу використовували порошок заліза, отриманий розпиленням розплаву водою (ГОСТ 9849–86), а в якості пороутворювачів порошок хлориду натрію (ГОСТ 13830–97), порошок бікарбонату амонію (ТУ У 6–04687973.025) і порошок

гідрокарбонату натрію (ГОСТ 2156–76). Морфологію часток порошоків показано на рис. 1.

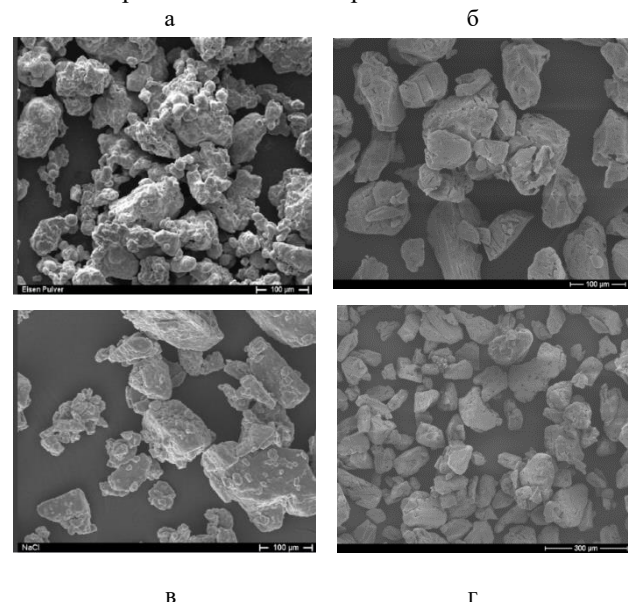


Рис. 1 – Морфологія часток: а - порошок заліза, б – бікарбонату амонію, в – хлориду натрію та г – гідрокарбонату натрію

Для одержання відтворюваних результатів порошки розсіювали на ситах і виділяли для наступних експериментів найбільш характерні фракції: для заліза та бікарбонату амонію – 125–250 мкм, для хлориду натрію – 500–1000 мкм, для

гідрокарбонату натрію – 63–125 мкм. Готували суміш, що містить 50 % порошку пороутворювача та 50 % порошку заліза (за об'ємом). Щільності заліза та пороутворювачів суттєво різняться, тому для запобігання сегрегації цих порошків при змішуванні до суміші додавали гас у кількості 0,5 % по масі [9]. Змішування здійснювали вручну протягом 15 хвилин. Однорідність суміші контролювали візуально. При дослідженні процесу ущільнення суміші пресували в циліндричній матриці із внутрішнім діаметром 16,8 мм. Навіски порошків вибирали так, щоб висота пресовок приблизно дорівнювала їхньому діаметру. Застосовувалася одnobічна схема пресування. Пресували серії зразків тиском від 100 до 800 МПа із кроком 100 МПа. Фіксували зусилля випресовування зразків із матриці. Напруження випресовування розраховували за формулою

$$\sigma_{\text{вип}} = \frac{P_{\text{вип}}}{\pi \cdot d \cdot h}, \quad (1)$$

де $P_{\text{вип}}$ – зусилля випресовування;
 d, h – діаметр і висота зразка.

Щільність отриманих зразків ρ визначали виходячи з їхньої маси та розмірів, а відносну щільність $\rho_{\text{відн}}$ розраховували згідно залежності

$$\rho_{\text{відн}} = \rho / \rho_{\text{теор}} \quad (2)$$

де $\rho_{\text{теор}}$ – теоретична щільність порошкової суміші, яку визначали за формулою

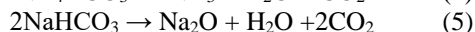
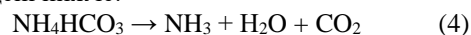
$$\rho_{\text{теор}} = (1-x) \cdot \rho_{\text{Fe}} + x \cdot \rho_{\text{ПО}}, \quad (3)$$

де x – вміст пороутворювача в суміші;

ρ_{Fe} – щільність заліза – 7,874 г/см³;

$\rho_{\text{ПО}}$ – щільність матеріалу пороутворювача: бікарбонату амонію – 1,586 г/см³, хлориду натрію – 2,165 г/см³, гідрокарбонату натрію – 2,874 г/см³.

Спикання пресовок проводили при температурі 1150 °С протягом 1 години у відновлюваному середовищі СО [10]. Нагрівання здійснювали зі швидкістю 7 °С/хв із проміжною витримкою при 850 °С протягом 30 хвилин. Зразки охолоджували спочатку разом з піччю до 300 °С, а потім поза робочою зоною печі до кімнатної температури. При спиканні бікарбонат амонію повністю віддалявся із пресовок (початкова температура його розкладання 60 °С). Гідрокарбонат натрію розкладався на оксид натрію та вуглекислий газ. Оксид натрію виплавлявся зі зразків при 1132 °С; хлорид натрію виплавлявся при 801 °С, а потім додатково вимивався в дистильованій воді протягом 12 годин при температурі 50 °С. Реакції розкладання бікарбонату амонію та гідрокарбонату натрію наведені нижче:



Після спикання зразки вимірювали, зважували та розраховували відносну щільність спечених пресовок.

Усадку за об'ємом v_v , діаметром v_d і висотою v_h визначали за формулами

$$v_v = (V_{\text{нп}} - V_{\text{сп}}) / V_{\text{нп}}; \quad (6)$$

$$v_d = (d_{\text{нп}} - d_{\text{сп}}) / d_{\text{нп}}; \quad (7)$$

$$v_h = (h_{\text{нп}} - h_{\text{сп}}) / h_{\text{нп}}, \quad (8)$$

де $V_{\text{нп}}$ і $V_{\text{сп}}$ – об'єми пресовок до та після спикання.

Для дослідження мікроструктур спечених зразків використовували бінокулярний стереомікроскоп Olympus SZX 12, оптичний мікроскоп Olympus PMG 3 та растровий електронний мікроскоп Zeiss Ultra 55, що оснащений енергодисперсійним спектрометром Inca Energy 355.

У всіх випадках мікроструктура вивчалася безпосередньо після шліфування, без травлення зразків.

Аналіз результатів. На рис. 2 показані криві ущільнення порошку заліза та його сумішей з об'ємним вмістом пороутворювачів 50 %. Найбільша щільність при однаковому тиску досягається для зразків, що містять хлорид натрію. Найменшу щільність мали зразки, що містять гідрокарбонат натрію. Це пов'язане з різною ущільнюваністю порошків пороутворювачів. Найбільша ущільнюваність характерна для порошку хлориду натрію, а найменша – для порошку гідрокарбонату натрію. Для всіх сумішей заліза та пороутворювачів спостерігалася більш висока ущільнюваність, ніж для чистого порошку заліза [11].

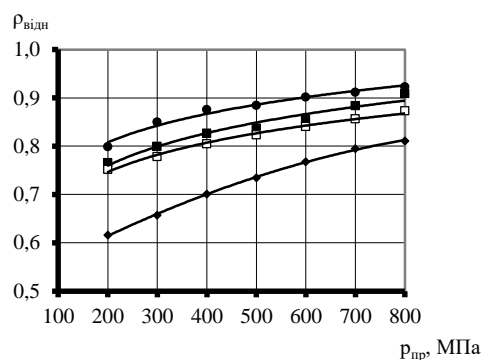


Рис. 2 – Криві ущільнення порошку заліза та сумішей: ● – Fe; ◆ – Fe–NaHCO₃; ▲ – Fe–NH₄HCO₃; ■ – Fe–NaCl

На рис. 3 показана залежність напруження випресовування зразків від тиску пресування.

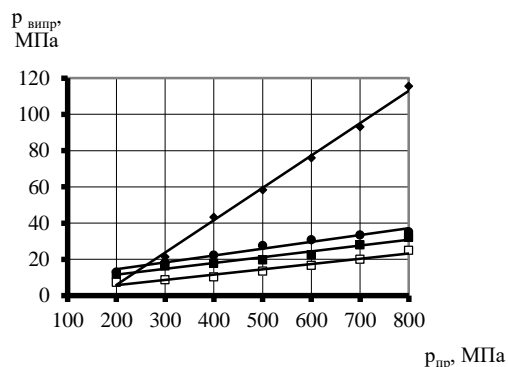
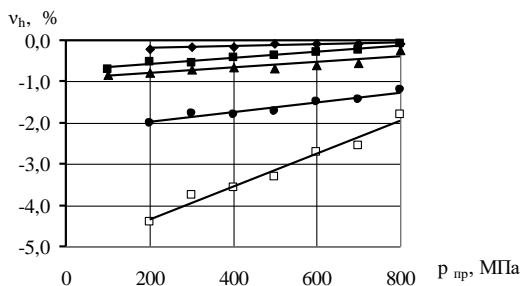


Рис. 3 – Криві випресовування пресовок з порошку заліза та сумішей: ● – Fe; ■ – Fe–NaCl; ▲ – Fe–NH₄HCO₃; ◆ – Fe–NaHCO₃

При фіксованих значеннях тиску пресування найбільші напруження випресовування спостерігалися в зразків з порошку заліза. Напруження випресовування для сумішей були набагато нижче, що пояснюється змащувальними властивостями пороутворювачів. При цьому можна зробити висновок, що найкращими змащувальні властивості має порошок хлориду натрію. Напруження випресовування для порошку заліза становило 12 %, для сумішей – 3–4% від тиску пресування [12]. У дослідженому діапазоні тиску пресування зразки всіх складів не мали розшарувань і тріщин.

При спіканні гідрокарбонат натрію розкладався на оксид натрію та вуглекислий газ. Потім оксид натрію розплавлявся в зразку. Після охолодження на підкладці і на зразку спостерігалися білі кристали оксиду натрію. Хлорид натрію також не виплавлявся зі зразків при спіканні. Крім того, спечені зразки кородіювали через тривале перебування у воді. Присутність солі підсилювала процес корозії. У підсумку, через 2–3 місяці зразки повністю іржавіли та руйнувалися. Таким чином, ані вимивання, ані термічне розкладання не забезпечує повного видалення хлориду натрію та гідрокарбонату натрію зі зразків, що робить їх непридатними для використання при виготовленні якісних високопористих виробів на основі заліза. У подальшому дослідженнях у якості пороутворювача застосовувався тільки порошок бікарбонату амонію у кількості 20 %, 40 %, 60 % та 80 % (за об'ємом).

На рис. 4 показані графічні залежності усадки зразків по висоті від тиску пресування та вмісту пороутворювача у вихідній суміші.



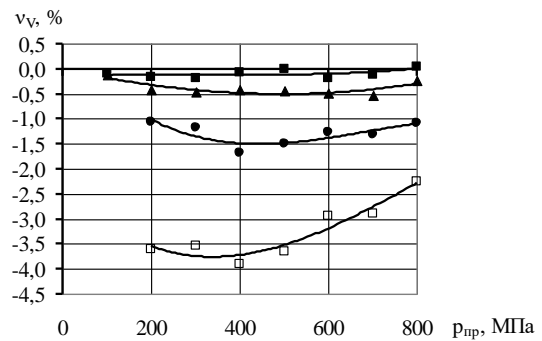
◆ – 100 % Fe; ■ – 20 % NH₄HCO₃; ▲ – 40 % NH₄HCO₃; ● – 60 % NH₄HCO₃; □ – 80 % NH₄HCO₃; решта – залізо

Рис. 4 – Залежність усадки по висоті від тиску пресування

Як видно із рис. 3, зі збільшенням тиску пресування усадка по висоті зменшується. Це пояснюється зменшенням загальної пористості матеріалу при збільшенні тиску пресування. Усадка по висоті суттєво збільшується з ростом вмісту бікарбонату амонію у вихідній суміші та, отже, при збільшенні пористості другого роду, що виникає після видалення пороутворювача. Найбільш інтенсивне збільшення усадки спостерігається при вмісті пороутворювача 60 % та 80 %.

Ріст і усадка зразків по діаметру по абсолютній величині були значно менше ніж усадка по висоті. Таким чином, спостерігалася виражена анізотропія усадки зразків, що пояснюється витягнутою формою пор. Незважаючи на відносно невелику величину, ріст і усадка по діаметру впливають на об'ємну усадку пористих зразків.

Вплив тиску пресування та вмісту бікарбонату амонію у вихідній суміші на величину об'ємної усадки ілюструється графіками на рис. 5.



■ – 20 % NH₄HCO₃; ▲ – 40 % NH₄HCO₃; ● – 60 % NH₄HCO₃; □ – 80 % NH₄HCO₃; решта – залізо

Рис. 5 – Залежність об'ємної усадки від тиску пресування

Як впливає із рис. 5, об'ємна усадка зростає зі збільшенням вмісту пороутворювача. Зі збільшенням тиску пресування об'ємна усадка спочатку зростає, а потім зменшується. Це пояснюється зменшенням росту зразків по діаметру зі збільшенням тиску пресування, який, як відзначалося вище, у деяких випадках переходить в усадку.

На рис. 6 показані залежності відносної щільності спечених зразків від тиску пресування та від вмісту бікарбонату амонію у вихідній порошковій суміші. Відносна щільність збільшується при зростанні тиску пресування. Разом з тим, цей ріст знижується при збільшенні вмісту пороутворювача у вихідній суміші та, отже, зі збільшенням пористості перед спіканням. Це пояснюється меншим впливом усадки на кінцеву відносну щільність і пористість при збільшенні пористості другого роду. Величина усадки при спіканні визначається формулою

$$v_V = (V_{cn} - V_{yn}) / V_{yn} = (\rho_{yn} - \rho_{cn}) / \rho_{cn}, \quad (9)$$

де V_{yn} та ρ_{yn} – об'єм і відносна щільність пресовок після видалення пороутворювача.

З формули (9) випливає, що при відносно невеликій зміні відносної щільності при спіканні, вплив на розрахункову величину об'ємної усадки має відносна щільність спечених пресовок.

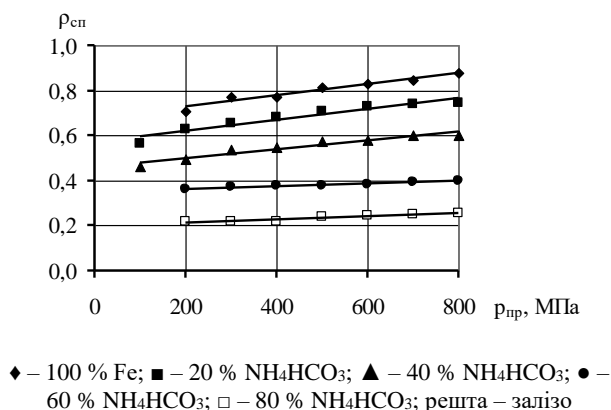


Рис. 6 – Залежність об'ємної усадки від тиску пресування

Мікроструктури спечених пористих залізних зразків представлено на рис. 7

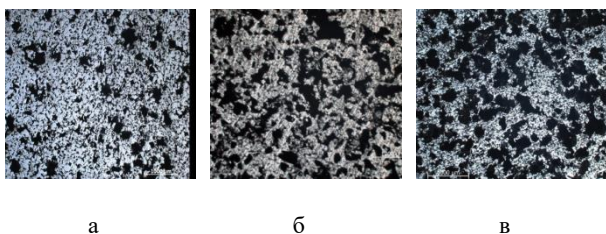


Рис. 7 – Мікроструктура пористих зразків, відпресованих при тиску 400 МПа, з об'ємним вмістом бікарбонату амонію а – 20 %, б – 40 %, в – 60 %

Структура зразків складається з декількох характерних елементів. Темні області відповідають порам. Світлі області утворюють більшість і являють собою спечені частки заліза. Видні більш дрібні пори, що є пористістю спеченого заліза та великі, що утворювалися при видаленні пороутворювача.

Пори, утворені в результаті видалення пороутворювача за формою та розмірами приблизно відповідають часткам бікарбонату амонію. Зі збільшенням вмісту пороутворювача в суміші пористість виробів зростає, що пов'язане з утворенням більшої кількості пор, що утворюються після розкладання бікарбонату амонію. Зі збільшенням тиску пресування пористість спечених виробів трохи зменшується.

Висновки. Установлено, що зразки з різними пороутворювачами при однаковому об'ємному їхньому вмісті мають різну ущільнюваність. При однаковому тиску найбільша щільність досягається для зразків, що містять хлорид натрію, найменша – для зразків, що містять гідрокарбонат натрію. Це пов'язане з різною ущільнюваністю порошків пороутворювачів. Ущільнення сумішей у всіх випадках було набагато більше, ніж ущільнюваність порошку заліза. Напруження випресовування для сумішей, що містять пороутворювачі, були приблизно в 3 рази менше, ніж для чистого заліза. Це пов'язане зі змащувальними властивостями пороутворювачів.

Частки бікарбонату амонію повністю видаляються при спіканні в результаті їх термічного розкладання на аміак, вуглекислий газ і воду. Ні вимивання, ні термічне розкладання не забезпечують повного видалення хлориду натрію та гідрокарбонату натрію зі зразків, що робить їх непридатними для використання при виготовленні якісних високопористих виробів на основі заліза. Для всіх зразків з кінцевою пористістю до 80 % усадка при спіканні була невеликою. По висоті зразків вона не перевищувала 4,5 %, за об'ємом вона була менше 4 %. З ростом тиску пресування, зміна розмірів і об'єму зменшувалися. Таким чином, збільшення тиску пресування сприяє зниженню лінійної та об'ємної усадки при спіканні пористих матеріалів і, як наслідок, сприяє стабілізації розмірів спечених виробів. Ріст вмісту пороутворювача у вихідній суміші приводить до збільшення лінійної та об'ємної усадки, однак зменшує зміну відносної щільності при спіканні. Отже, при великому вмісті пороутворювача можна точніше контролювати щільність і пористість спечених виробів. Спечені пористі зразки мають біпористу структуру, яка утворена порами малих розмірів між частками базового порошку і порами більших розмірів, що утворювалися в результаті видалення пороутворювача. Зі збільшенням тиску пресування розмір міжчасткових пор зменшується в результаті ущільнення матеріалу каркаса, утвореного частками базового порошку.

Список літератури

1. Пористые порошковые материалы и изделия на их основе для защиты здоровья человека и защиты окружающей среды: получение, свойства, применение / М. В. Тумилович [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 365 с.
2. Пористые проницаемые материалы и изделия на их основе: материалы 5-го международного симпозиума (Минск, 30-31 октября 2014 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] : редкол. П. А. Витязь [и др.] – Минск : Беларус. навука, 2014. – 362 с.
3. Рябичева Л. А. Развитие технологий изготовления изделий из порошковых материалов / Л. А. Рябичева // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки матеріалів тиском у машинобудуванні: зб. наук. пр. – Луганськ. – 2009. – С. 3–11.
4. Processing of Porous Copper by Powder Metallurgy Route with different types of Space Holder Materials / R. S Athirani, M. Mazlan, N. Amalina, J. Aidah, I. M. Hussain // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1113. – P. 110–115.
5. Processing and characterization of porous Ti₂AlC with controlled porosity and pore size / L. Hu, R. Benitez, S. Basu, I. Karaman, M. Radovic // Acta Materialia. – 2012. – Vol 60. – P. 6266–6277.
6. Capek J. Properties of porous magnesium prepared by powder metallurgy / J. Capek, D. Vojtech // Materials Science and Engineering: C. – 2013. – Vol. 33, Iss. 1. – P. 564–569.
7. Dissolution Sintering Technique to Create Porous Copper with Sodium Chloride Using Polyvinyl Alcohol Solution through Powder Metallurgy / C. Waters, S. Ajinola, M. Salih // American Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 9, Iss. 1. – P. 155–165.
8. Synthesis and Characterization of Stainless Steel Foam Via Powder Metallurgy Taking Acicular Urea As Space Holder / S. Joshi, G. K. Gupta, M. Sharma, A. Telang, T. Mahra // Materials Science Research India. – 2015. – Vol. 12 (1). – P. 43–49.
9. Руденко Н. А. Прессование смеси железа и хлорида натрия / Н. А. Руденко, А. М. Лантев, Л. В. Попивненко // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск. – 2009. – №2 (21). – С. 326–329.

10. Лантев А. М. Влияние вида порообразователя на уплотняемость смеси при изготовлении высокопористых материалов. / А. М. Лантев, Н. А. Руденко // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки матеріалів тиском у машинобудуванні: зб. наук. пр. – Луганськ. – 2009. – С. 27–34.
11. Руденко Н. А. Получение и свойства высокопористого материала на основе порошка железа / Н. А. Руденко, А. М. Лантев // Вестник ХНАДУ. – Харьков. – 2009. – Вып. 46. – С. 105–107.
12. Rudenko N. A. Compaction and properties of highly porous powder parts produced with various pore formers / N. A. Rudenko, A. M. Laptev // Mechanical Testing and Diagnosis. – 2011. – Iss. 1. – P. 82–87.
5. Hu L., Benitez R., Basu S., Karaman I., Radovic M. Processing and characterization of porous Ti₂AlC with controlled porosity and pore size. *Acta Materialia*. 2012, vol 60, pp. 6266–6277.
6. Capek J., Vojtech D. Properties of porous magnesium prepared by powder metallurgy. *Materials Science and Engineering: C*. 2013, vol. 33, issue 1, pp. 564–569.
7. Waters C., Ajinola S., Salih M. Dissolution Sintering Technique to Create Porous Copper with Sodium Chloride Using Polyvinyl Alcohol Solution through Powder Metallurgy. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016, vol. 9, issue 1, pp. 155–165.
8. Joshi S., Gupta G. K., Sharma M., Telang A., Mahra T. Synthesis and Characterization of Stainless Steel Foam Via Powder Metallurgy Taking Acicular Urea As Space Holder. *Materials Science Research India*. 2015, vol. 12 (1), pp. 43–49.
9. Rudenko N. A., Laptev A. M. Pressovanie smesi zheleza i hlorida natrija [Pressing of a mixture containing iron and sodium chloride powders]. *Obrabotka materialov davleniem* [Plastic working of materials]. Kramatorsk, DGMA Publ., 2009, №2 (21), pp. 326–329.
10. Laptev A. M., Rudenko N. A. Vlijanie vida poroobrazovatelja na uplotnjaemost' smesi pri izgotovlenii vysokoporistykh materialov [Influence of space-holder type on mixture pressing during manufacturing of highly-porous materials]. *Resursozberigajuchi tehnologii virobnictva ta obrobki materialiv tiskom u mashinobuduvanni* [Resource-saving technologies for manufacturing and processing of materials by plastic working]. Lugansk, SNU im. V. Dalja Publ., 2009, pp. 27–34.
11. Rudenko N. A., Laptev A. M. Poluchenie i svojstva vysokoporistogo materiala na osnove poroshka zheleza [Manufacturing and properties of highly-porous material based on iron powder]. *Vestnik HNADU* [Bulletin of the Kharkov National Automotive and Highway University]. Kharkov, KHADU Publ., 2009, Vyp. 46, pp. 105–107.
12. Rudenko N. A., Laptev A. M. Compaction and properties of highly porous powder parts produced with various pore formers. *Mechanical Testing and Diagnosis*, 2011, issue 1, pp. 82–87.

References (transliterated)

1. *Poristye poroshkovye materialy i izdeliya na ikh osnove dlya zashchity zdorov'ya cheloveka i zashchity okruzhayushchey sredy: poluchenie, svoystva, primeneniye* [Porous powder materials and products based on them to protect human health and environment: receipt, properties, application] / M. V. Tumilovich [i dr.]. – Minsk, Belarus. Navuka Publ., 2010, 365 p.
2. P. A. Vityaz', ed. *Poristye pronitsaemye materialy i izdeliya na ikh osnove* [Porous permeable materials: technologies and products thereof]: materialy 5-go mezhdunarodnogo simpoziuma [Proc. of 5 Int. Conf.] / Nats. akad. nauk Belarusi [i dr.] : redkol. P. A. Vityaz' [et al.]. – Minsk, Belarus. Navuka Publ., 2014, 362 p.
3. Ryabicheva L. A. Razvitie tekhnologiy izgotovleniya izdeliy iz poroshkovykh materialov [Development of technologies for production powder parts] / L. A. Ryabicheva. // *Resursozberigayuchi tekhnologii virobnictva ta obrobki materialiv tiskom u mashinobuduvanni: zb. nauk. pr.* [Resource-saving technologies for manufacturing and processing of materials by plastic working], Lugansk, 2009, pp. 3–11.
4. Athiran R. S., Mazlan M., Amalina N., Aidah J., Hussain I. M. Processing of Porous Copper by Powder Metallurgy Route with different types of Space Holder Materials. *Advanced Materials Research*. 2015, vol. 1113, pp. 110–115.

Надійшла (received) 29.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Виробництво та структура пористого заліза з контрольованою пористістю та розміром пор / Н. О. Руденко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 67–71 – Библиогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2671

Производство и структура пористого железа с контролируемой пористостью и размером пор / Н. А. Руденко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 67–71 – Библиогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2671

Processing and structure of porous iron with controlled porosity and pore size / N. O. Rudenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 67–71. – Bibl.:12. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Руденко Наталія Олександрівна – кандидат технічних наук, Донбаська державна машинобудівна академія, старший викладач кафедри «Механіка пластичного формування»; тел. (06264) 41-81-22; e-mail: RudenkoNataliia@gmail.com.

Руденко Наталия Александровна – кандидат технических наук, Донбасская государственная машиностроительная академия, старший преподаватель кафедры «Механика пластического формования»; тел. (06264) 41-81-22; e-mail: RudenkoNataliia@gmail.com.

Rudenko Nataliia Oleksandrivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Dondass State Engineering Academy, Senior Lecturer at the Department of «Plastic forming mechanics»; tel. (06264) 41-81-22; e-mail: RudenkoNataliia@gmail.com.

УДК 621.983

С.Ф. САБОЛ, В.М. ГОРНОСТАЙ, К.О. ВЛАСЕНКО

ОБТИСК ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ТРУБЧАТИХ ВИРОБІВ
З ГОРЛОВИНОЮ В ПРОФІЛЬОВАНИХ МАТРИЦЯХ

Методом скінченних елементів в програмному середовищі «DEFORM» проведено дослідження процесу обтиску трубчатих виробів з горловиною. Використання такого способу направлено на підвищення коефіцієнту обтиску $K_{об}$ та зниження впливу тертя на формоутворення виробів при холодному обтиску. Такий спосіб не потребує нагрівального обладнання та складних конструкцій штампів. В результаті проведення чисельних експериментів визначено оптимальну форму профіля матриці для обтиску, яка складається з послідовно розташованих

торових поверхонь. Центри торових поверхонь розміщені вздовж радіусу: $R_1 = R_{сф} - \frac{d_k}{2}$, при чому діаметри $-d_k$ розташовані під кутом з

однаковим кроком $-t$. Проводився порівняльний аналіз енерго- силових параметрів обтиску трубчастих заготовок в традиційній та профільованій матрицях для обтиску з різних матеріалів при різних коефіцієнтах тертя. Встановлено характер розподілу інтенсивності

напружень σ_r , осьових напружень σ_z , інтенсивності деформації ϵ_i , а також ступеню використання ресурсу пластичності Ψ по об'єму циліндричної деталі, що піддається обтиску в традиційній матриці та матриці спеціального профілю, при різних коефіцієнтах тертя та різних товщинах стінок для різних матеріалів.

Ключові слова: обтиснення, трубчасті заготовки, коефіцієнт обтиску, традиційна матриця, матриця спеціального профілю, метод скінченних елементів, зусилля обтиснення, напружено - деформований стан, ступінь використання ресурсу пластичності.

Методом конечных элементов в программной среде «DEFORM» проведено исследование процесса обжима трубчатых изделий с горловиной. Использование такого способа направлено на повышение коэффициента обжима $K_{об}$ и снижения влияния трения на формообразования изделий при холодном обжиме. Такой способ не требует нагревательного оборудования и сложных конструкций штампа. В результате проведения численных экспериментов, определена оптимальную форму профиля матрицы для обжима, которая состоит из последовательно расположенных торговых поверхностей. Центры торговых поверхностей размещены вдоль радиуса, причем диаметры $-d_k$ расположены под углом с одинаковым шагом $-t$. Проводился сравнительный анализ энерго- силовых параметров обжима трубчатых заготовок в традиционной и профилированной матрицах для обжима из различных материалов при различных коэффициентах трения. Установлен

характер распределения интенсивности напряжений σ_r , осевых напряжений σ_z , интенсивности деформации ϵ_i , а также степени использования ресурса пластичности по объему цилиндрической детали Ψ , подвергающейся обжиму в традиционной матрице и матрице специального профиля, при различных коэффициентах трения и различных толщинах стенок для различных материалов.

Ключевые слова: обжатия, трубчатые заготовки, коэффициент обжима, традиционная матрица, матрица специального профиля, метод конечных элементов усиления обжатия, напряженно - деформированное состояние, степень использования ресурса пластичности.

Study of the process of bending tubular products with a neck is provided by the method of finite elements in the software environment "DEFORM". The use of this method is aimed to increase the coefficient of compression $K_{об}$ and to reduce the effect of friction on the shaping of products under cold pressure. This method does not require heating equipment and complicated stamp constructions. As a result of numerous experiments, the optimal shape of the matrix profile for compression was determined. It consists of successively located tor surfaces. The centers of the tor surfaces are located along

the radius: $R_1 = R_{сф} - \frac{d_k}{2}$, at which the diameters $-d_k$ are located at an angle with the same step $-t$. A comparative analysis of power-strength parameters of bending of tubular billets in the traditional and profiled matrices for compression of different materials at various friction coefficients was carried

out. There were identified nature of distribution of stresses intensity σ_r , axial stresses σ_z , intensity of deformation ϵ_i , as well as level of use of the plasticity resource Ψ through the volume of cylindrical detail, which is squeezed in the traditional matrix and special matrix profile, under different coefficients of friction and different wall thicknesses for different materials

Keywords: compression, tubular blanks, crimping factor, traditional matrix, special profile matrix, finite element method of compression force, stress - strain state, degree of plastic resource utilization.

Вступ Отримання трубчастих виробів з горловиною за допомогою операції обтиску широко розповсюджено для виготовлення деталей балонів, гільз, перехідників для трубопроводів та трубопровідної арматури та ін.

Постійною задачею при обробці металів тиском є збільшення ступенів деформації, яка досягається за один перехід при мінімальних енерговитратах.

Однак, не завжди можливо застосування однієї операції обтиску, для отримання потрібної деталі, через те, що можливості формозміни при обтиску циліндричних заготовок обмежені втратою стійкості, яка виражається в утворенні повздовжніх та поперечних складок. Це призводить до того, що собівартість отриманих виробів збільшується.

Методи підвищення ефективності обтиску дозволяють значно підвищити ступінь деформації, але використання цих методів обмежене розмірами заготовки та параметрами процесу.

Мета роботи: підвищення ефективності процесу обтиску трубчастих заготовок з горловиною шляхом зниження сил тертя на контактуючих поверхнях, отримання більших коефіцієнтів обтиску за один технологічний перехід, в порівнянні з традиційними методами обтиску.

Дану задачу можна вирішити шляхом зменшення площі контакту між матрицею і заготовкою, змінюючи та оптимізуючи традиційну сферичну поверхню матриці профільною, форма

поверхні якої складається із послідовно розташованих під кутом торових поверхонь.

Досліджується спосіб обтиску циліндричних трубчастих заготовок з горловиною в профільованих матрицях. Такий спосіб не потребує нагрівального обладнання та складних конструкцій штампу.

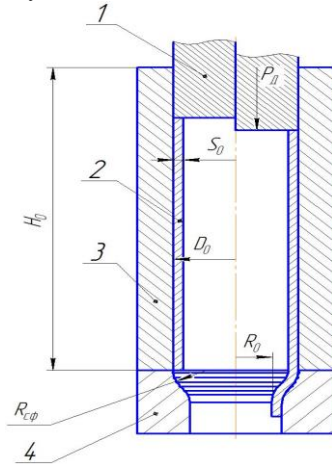


Рис.1 – Схема обтиску трубчастої заготовки в профільованій матриці (1-пуансон, 2 - заготовка, 3 - оправка, 4 - матриця)

Задачами дослідження є визначення, за допомогою МСЕ, впливу таких параметрів як: діаметр торової поверхні матриці спеціального профілю; крок розташування торових поверхонь - t ; коефіцієнт тертя заготовки, на закономірності формозміни металу при холодному обтиску заготовки;

Поверхня матриці спеціального профілю складається з послідовно розташованих торових поверхонь. Центри торових поверхонь розміщені вздовж радіуса R_1 , при чому діаметри d_k розташовані під кутом з однаковим кроком - t . На рис. 2. показана із профільована поверхня матриці. Проводився порівняльний аналіз обтиску трубчастих заготовок p в традиційній та профільованій матрицях.

Моделювання проводили для трубчастих заготовок із такими розмірами: діаметр - $D_0 = 38$ мм, товщина стінки - $S_0 = 2$ мм, висота заготовки - $H_0 = 100$ мм.

Таблиця 1 - Значення зусиль процесу обтиску в залежності від геометричних параметрів матриці спеціального профілю для заготовок із товщиною стінки $S_0 = 2$ мм із найбільш вживаних матеріалів, при коефіцієнту тертя $\mu = 0,08$

Параметри	Застосований матеріал		
	Сталь 10	Д16	03X16H15M3
Обтиск у традиційній матриці	259,32 кН	152,16 кН	323,66 кН
$d_k = 4$ мм, $t = 3$ мм	294,82 кН	168,92 кН	368,77 кН
$d_k = 5$ мм, $t = 4$ мм	328,68 кН	189,11 кН	343,69 кН
$d_k = 10$ мм, $t = 4$ мм	254,27 кН	164,03 кН	319,91 кН
$d_k = 4$ мм, $t = 1$ мм	267,58 кН	148,26 кН	326,86 кН

Виходячи з отриманих результатів, найбільш оптимальними розмірами діаметрів кіл та їх крок, які забезпечують мінімальні силові параметри процесу $\epsilon = 10$ мм і $t = 4$ мм .

Використання такого способу направлене на підвищення коефіцієнту обтиску $K_{об}$ та зниження впливу тертя на формоутворення виробів при холодному обтиску.

Схема обтиску трубчастої заготовки в профільованій матриці приведена на рис. 1.

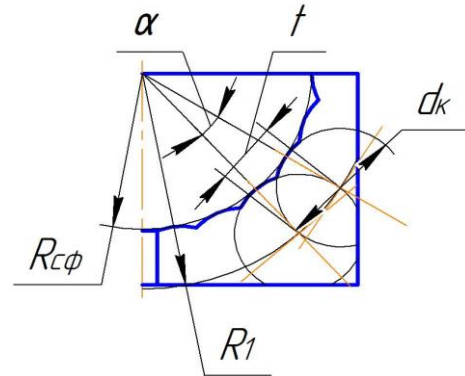


Рис. 2 – Вигляд поверхні профільованої матриці

Фізико-механічні параметри матеріалів, що деформуються: сталь 10, $\sigma_T = 200$ МПа; сплав алюмінію – Д16, $\sigma_T = 255$ МПа; нержавіюча сталь $\sigma_T = 03X16H15M3$, $\sigma_T = 420$ МПа.

Швидкість деформуючому інструменту задавали постійною, - вона становила 2 мм/с.

Вплив параметрів на процес обтиску досліджували шляхом введення змінних параметрів, таких, як: коефіцієнт тертя на контактуючих поверхнях задавали $\mu = 0,08$, $\mu = 0,12$ та зміною товщин стінок: $S_0 = 2$ мм.

В результаті проведення чисельних експериментів були отримані наступні значення зусилля процесу в залежності від геометричних параметрів матриці спеціального профілю, які зведено в таблицю 1

На рис. 3–5 показано розрахункові залежності зусиль обтиску в традиційній матриці та матриці спеціального профілю для заготовок зі сталі 10, сплаву алюмінію – Д16, нержавіючої сталі –

03X16H15M3, від переміщення пуансону.
Дослідження проведені для товщини стінки $S_0=2\text{мм}$.
Коефіцієнт тертя $\mu=0,08$

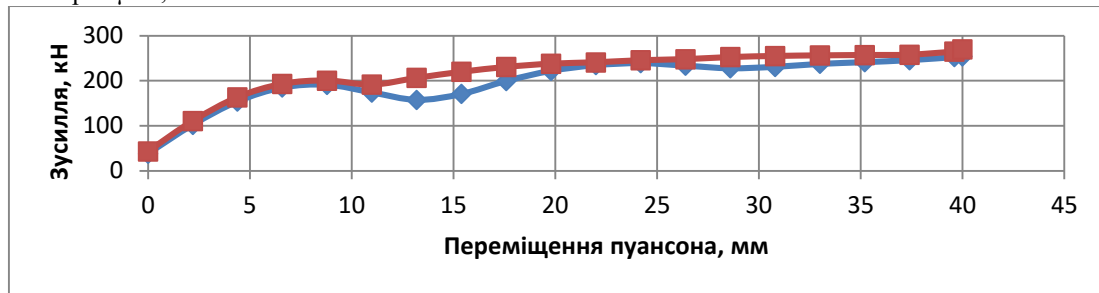


Рис. 3 – Залежність зусилля обтиску від переміщення пуансону для трубочастої заготовки зі сталі 10 із товщиною стінки $S_0 = 2,0$ мм. Синя лінія - матриця спеціального профілю, червона лінія – традиційна матриця.

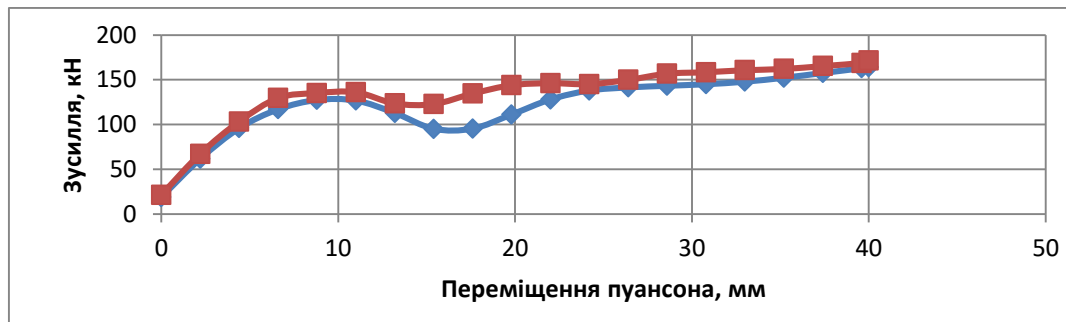


Рис. 4 – Залежність зусилля обтиску від переміщення пуансону для трубочастої заготовки зі сплаву алюмінію Д16 із товщиною стінки $S_0 = 2,0$ мм. Синя лінія - матриця спеціального профілю, червона лінія – традиційна матриця

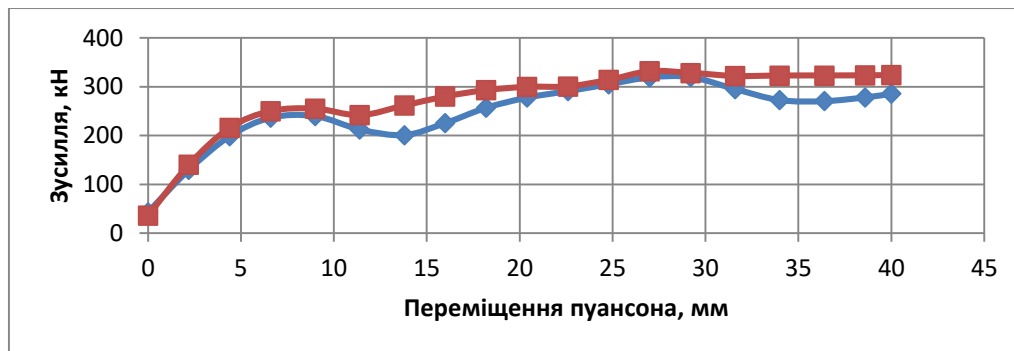


Рис. 5 – Залежність зусилля обтиску від переміщення пуансону для трубочастої заготовки із нержавіючої сталі 03X16H15M3 із товщиною стінки $S_0 = 2,0$ мм. Синя лінія - матриця спеціального профілю, червона лінія – традиційна матриця.

В результаті проведення чисельних експериментів було встановлено характер розподілу інтенсивності напружень σ_i , осьових напружень σ_z , інтенсивності деформації ε_i , а також ступеню використання ресурсу пластичності ψ по об'єму

циліндричної деталі, що піддається обтиску в традиційній матриці та матриці спеціального профілю, при різних коефіцієнтах тертя та різних товщинах стінок для різних матеріалів. Характери розподілу вказаних величин для сталі 10 при коефіцієнті тертя 0,08 приведено на рис.6–9.

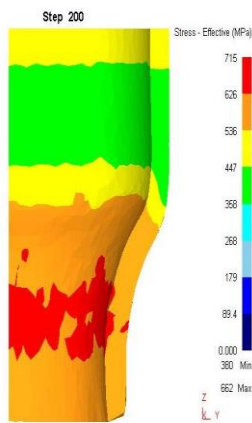


Рис.6 – Розподіл інтенсивності напружень σ_i

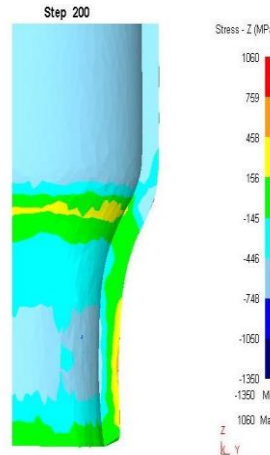


Рис.7 – Розподіл осевих напружень σ_z

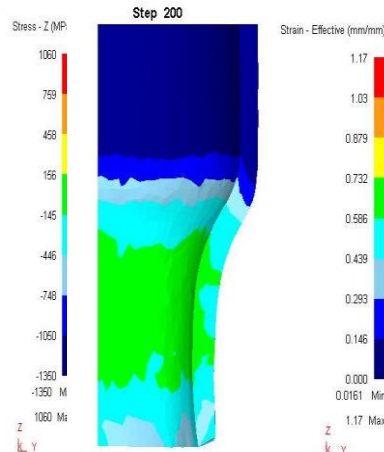


Рис. 8 – Розподіл інтенсивності деформації ϵ_i

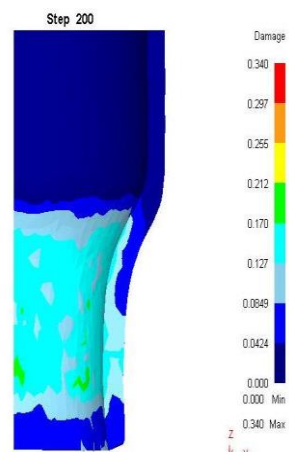


Рис.9 – Розподіл ступеню використання ресурсу пластичності ψ_i

Висновки:

1. Методом скінченних елементів, за допомогою програмного середовища «DEFORM», встановлено оптимальні геометричні параметри матриці спеціального профілю для обтиснення трубчастих заготовок з горловиною із найбільш поширених матеріалів при різних значеннях коефіцієнту тертя. Для вказаного процесу, який характеризується постійним радіусом скруглення матриці, товщиною матеріалу, найбільш ефективним з точки зору зниження зусилля обтиску є матриця спеціального профілю з параметрами: $dk = 10\text{ мм}$, $t = 4\text{ мм}$.

2. Здійснено порівняльний аналіз впливу геометричних параметрів матриці спеціального

профілю з традиційною матрицею на енерго - силові параметри процесу: σ_i , σ_z , ϵ_i . Виявлено, що вказані величини, для процесу обтиснення в матрицях спеціального профілю, менші ніж при традиційному обтисненні в середньому 7-13%.

3. Виявлено причини зниження зусилля обтиснення, які зумовлені зменшенням площі контакту матеріалу інструменту та матеріалу деталі.

В результаті проведення чисельних експериментів виявлено, що допустимий коефіцієнт обтиснення для сталі 10 - Коб. = 2,02; для Д16 - Коб. = 2,37; для 03X16H15M3 - Коб. = 1,96.

Список літератури

1. Аверкиев Ю. А. Холодная штамповка / Ю. А. Аверкиев. Издательство Ростовского университета, 1984. - 288 с.
2. Аверкиев Ю. А. Технология холодной штамповки / Ю. А. Аверкиев., А. Ю. Аверкиев. - М: Машиностроение, 1989. - 304 с.
4. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под ред. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. - М.: Машиностроение, 1985-1987. - 544 с.
5. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. / В. П. Романовский. - Ленингр. отд-ние: Машиностроение. 1979. - 520 с.
6. Непершин Р.И. Идеальные процессы обжима и раздачи толстостенных трубных заготовок / Р.И.Непершин //Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. - 2010. - №6. - С.23-29.
7. Кривошеин В.А. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных при исследовании процесса обжима в матрице с кольцевыми канавками / А.В. Кривошеин // Известия вузов. Машиностроение. - 2011. - № 3. - С. 49-53

References (transliterated)

1. Averkyyev Yu. A. Kholodnaya shtampovka / Yu. A. Averkyyev. Yzdatel'stvo Rostovskoho unyversyteta, 1984. - 288 p.
2. Averkyyev Yu. A. Tekhnolohyya kholodnoy shtampovky / Yu. A. Averkyyev., A. Yu. Averkyyev. - Moscow: Mashynostroenyey, 1989. - 304 p.
3. Kovka y shtampovka: Spravochnyk: V 4 t. T. 4. Lystovaya shtampovka / Pod red.. A.D. Matveeva; Red. sovet: E.Y. Semenov (pred.) y dr. - Moscow.: Mashynostroenyey, 1985-1987. - 544 p.
4. Romanovskyy V. P. Spravochnyk po kholodnoy shtampovke. 6-e yzd., pererab. y dop. / V. P. Romanovskyy. - Lennynhr. otd-nyey: Mashynostroenyey. 1979. - 520 p.
5. Nepershyn R.Y. Ydeal'nyye protsessy obzhyma y razdachy tolstostennykh trubnykh zahotovok / R.Y.Nepershyn //Kuznechno-shtampovochnoye proyzvodstvo. Obrabotka metallov davlenyem. - 2010. - No 6. - P.23-29.
6. Kryvosheyn V.A. Sravnytel'nyy analiz teoretycheskykh y eksperymental'nykh dannykh pry yssledovanny protsessy obzhyma v matrytse s kol'tsevymy kanavkamy / A.V. Kryvosheyn // Yzvestyya vuzov. Mashynostroenyey. - 2011. - No 3. - P. 49-53

Надійшла (received) 10.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Обтиск вісесиметричних трубчатих заготовок з горловиною в профільованих матрицях / С.Ф. Сабол, В.М. Горностай, К.О. Власенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 72–76 – Библиогр.: 6 назв.– ISSN 2519-2671

Обжим осесимметричных трубчатых заготовок с горловиной в профилированных матрицах / С.Ф. Сабол, В.Н. Горностай, К.А. Власенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 72–76 – Библиогр.: 6 назв.– ISSN 2519-2671

Burning of axially-shaped tubular billets with a neck in profiled matrices / S. F. Sabol, V.M. Gornostaj, K. A. Vlasenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 72–76. – Bibl.: 6. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сабол Сергій Францович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (050) 719-30-26; e-mail: sabol1@ukr.net.

Сабол Сергей Францевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», доцент кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел. : (050) 719-30-26; e-mail: sabol1@ukr.net.

Sabol Sergey Frantsovych - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute. Igor Sikorsky", associate professor of the Department of Plasticity Mechanics of Materials and Resource-Saving Processes; tel. : (050) 719-30-26; e-mail: sabol1@ukr.net

Горностай Вадим Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; т. 050-53-58-653

Горностай Вадим Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», доцент кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов т. 050-53-58-653

Gornostaj Vadim Mikolajovich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute. Igor Sikorsky", associate professor of the Department of Plasticity Mechanics of Materials and Resource-Saving Processes; tel 050-53-58-653

Власенко Костянтин Олександрович, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», студент

Власенко Константин Александрович, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», студент

Vlasenko Konstantin Alexandrovich, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute. Igor Sikorsky, student

УДК 539.3/4

В.В. ЧИГИРИНСКИЙ, А.Ю. ПУТНОКИ**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЕРИОД ЗАХВАТА МЕТАЛЛА**

Розглядається змінний процес прокатування в умовах безперервного ширококутового стану. В лінії головного приводу виникають затухаючі крутильні коливання. Змінний вплив валків на осередок деформування приводить до зміни взаємодії системи валок - смуга. Для аналізу введені у розгляд динамічні та кінематичні характеристики зони пластичної течії металу. Показано, що на крутильні коливання валків і толчковий характер дії осередку деформування впливає кінематика зони обтиску. Випередження виконують роль демфера, який змінює характер затухання динамічної взаємодії всієї механічної системи.

Ключові слова: нестационарна задача, взаємодія, затухаючі крутильні коливання, кінематика осередку деформування, крайні умови, випередження.

Рассматривается неустойчившийся процесс прокатки в условиях непрерывного широкополосного стана. В линии главного привода возникают затухающие вращательные колебания. Изменяющее воздействие валков на очаг деформации приводит к изменению взаимодействия системы валок - полоса. Для анализа введены в рассмотрение динамические и кинематические характеристики зоны пластического течения металла. Показано, что крутильные колебания валков и толчковый характер воздействия очага деформации на полосу определяются кинематикой зоны обжатия. Опережение выполняет роль демфера, изменяющее характер затухания динамического взаимодействия всей механической системы.

Ключевые слова: нестационарная задача, взаимодействие, затухающие крутильные колебания, кинематика очага деформации, крайние условия, опережение.

An unsteady rolling process is considered in the context of a continuous broadband mill. In the main drive line, damped rotational oscillations appear. The changing effect of rolls on the deformation center leads to a change in the interaction of the roll-band system. For the analysis, dynamic and kinematic characteristics of the zone of plastic flow of a metal are introduced. The kinetic moment of the system takes into account the moment of the quantity of the system of the strip at the exit from the deformation center. The obtained equation of rotational oscillations of rolls depends, among other things, on the advance value in the deformation zone. The speed of the exit of the strip from the reduction zone is determined by the linear speed of the rolls and the advance parameters, which determines the mathematical relationship between the characteristics of rotational oscillations of the rolls and the kinematic parameters of the outgoing band. It is shown that during the period of metal capture by rollers, the torsional oscillations of the rolls and the jogging nature of the deformation effect on the front outer zone of the strip are determined by the kinematics of the deformation center. Anticipation acts as a damper, which changes the nature of the damping of the dynamic interaction of the entire mechanical system.

Keywords: nonstationary problem, interaction, damped torsional oscillations, kinematics of the deformation focus, boundary conditions, advance.

Введение. В период захвата металла валками в главной линии стана возникают крутильные колебания, которые оказывают воздействие, на выходящую из очага деформации, внешнюю часть полосы. При этом возникает взаимодействие колеблющихся валков и металла в очаге деформации. Учет данного взаимодействия на динамические процессы в период захвата представляет не только теоретический, но и практический интерес. Кроме этого для оценки динамических процессов в упругой полосе за пределами очага деформации необходимо знать крайние условия задачи, которые связаны с указанным выше взаимодействием.

Постановка задачи. Анализ литературных и экспериментальных данных показывает [1],[2], что вращательные колебания главной линии прокатного стана представляют собой затухающие вращательные колебания и могут быть представлены дифференциальным уравнением вида[3]

$$\ddot{\varphi} + 2b\dot{\varphi} + k^2\varphi = 0, \quad (1)$$

где b - параметр, учитывающий вязкое сопротивление среды; k - круговая частота колебаний механической системы. Решением (1) является уравнение затухающих вращательных колебаний главного привода, [2], т.е.

$$\varphi = \exp(-bt) \cdot (A \cdot \cos kt + B \cdot \sin kt) \quad (2)$$

Решение задачи. Для оценки взаимодействия валков и полосы в очаге деформации на динамику захвата необходимо совместно рассмотреть кинематические и динамические характеристики валка и прокатываемой полосы. Запишем теорему об изменении кинетического момента системы в скалярном виде, [2]

$$\frac{dL_x}{dt} = \sum_{k=1}^n M_{kx}, \quad (3)$$

L_x - проекция вектора кинетического момента системы на ось x ; M_{kx} - моменты сил относительно оси x . Кинетический момент системы

$$L_x = I_x \omega + m v_I R,$$

где I_x - осевой момент инерции валка относительно оси x ; $m v_I R$ - момент количества движения полосы на выходе из очага деформации. На выходе момент количества движения полосы равен

$$m \cdot v_I \cdot R = m v_g \cdot (I + S) \cdot R,$$

где v_g - окружная скорость валков; S - опережение при прокатке.

При установившемся движении

$$\frac{dL_x}{dt} = 0,$$

т.к. с течением времени момент количества движения полосы и угловая скорость не меняются.

Рассмотрим неустановившийся процесс прокатки. В этом случае, производная от кинетического момента системы по времени равна

$$\frac{dL_x}{dt} = I_x \cdot \frac{d\omega}{dt} + m \cdot \frac{dv_I}{dt} \cdot R.$$

Производная от скорости по времени

$$\frac{dv_I}{dt} = \frac{d[v_{\epsilon} \cdot (I + S')]}{dt} = \frac{dv_{\epsilon}}{dt} (I + S') +$$

$$+ v_{\epsilon} \frac{dS'}{dt} =$$

$$= R \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot (I + S') + R \cdot \omega \cdot \frac{dS'}{dt}$$

Распишем выражение (3)

$$\begin{aligned} \frac{dL_x}{dt} &= I_x \cdot \frac{d\omega}{dt} + \\ &+ m \cdot R \cdot \left[R \cdot \frac{d\omega}{dt} \cdot (I + S') + R \cdot \omega \cdot \frac{dS'}{dt} \right] = \\ &= -M_{np} - M_{yn} - M_c \end{aligned}$$

где M_{np} - момент прокатки; M_{yn} - момент сил упругости; M_c - момент сил вязкого сопротивления;

S' - переменное опережение в очаге деформации во время заполнения его металлом. Принимается линейная зависимость его от времени, вида

$$S' = C \cdot S \cdot t = \frac{l}{\tau} \cdot S \cdot t.$$

При этом производная по времени будет величиной постоянной, т.е.

$$\frac{dS'}{dt} = C \cdot S = \frac{l}{\tau} \cdot S = Const.$$

Преобразуем последнее выражение

$$\begin{aligned} \frac{dL_x}{dt} &= \left[I_x + R \cdot (I + S') \cdot m \cdot R \right] \frac{d\omega}{dt} + \\ &+ m \cdot R^2 \cdot \omega \cdot \frac{dS'}{dt} = -M_{np} - C_{yn} \cdot \varphi - \mu \cdot \frac{d\varphi}{dt} \end{aligned}$$

где μ - условный коэффициент вязкости среды; C_{yn} - коэффициент жесткости восстанавливающего момента. После приведения

$$\begin{aligned} I_{np} \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \left(m \cdot R^2 \cdot \frac{dS'}{dt} + \mu \right) \frac{d\varphi}{dt} + \\ + C_{yn} \cdot \varphi = -M_{np}, \end{aligned}$$

или

$$I_{np} \cdot \ddot{\varphi} + 2b' \cdot \dot{\varphi} + C_{yn} \cdot \varphi = -M_{np}, \quad (4)$$

где $I_{np} = I_x + R \cdot (I + S') \cdot m \cdot R$,

$$2b' = m \cdot R^2 \cdot \frac{dS'}{dt} + \mu.$$

В окончательном виде уравнение (4)

$$\ddot{\varphi} + 2b \cdot \dot{\varphi} + k^2 \cdot \varphi = -\frac{M_{np}}{I_{np}}, \quad (5)$$

где $2b = \frac{2b'}{I_{np}}$, $k^2 = \frac{C_{yn}}{I_{np}}$

Сопоставляя (1) и (5) практически получаем один тип дифференциальных уравнений, в котором коэффициент b , учитывающий сопротивление среды, определяется опережением в очаге деформации. Отсюда следует влияние опережения на характер затухания вращательных колебаний привода.

Решение дифференциального уравнения (5) несколько отличается от решения уравнения (1), действительно

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2, \quad (6)$$

где φ_1 - решение однородного дифференциального уравнения (1); φ_2 - частное решение уравнения (5). При этом

$$\varphi_2 = Const. \quad (7)$$

Подставляет (7) в (5) имеем

$$k^2 \cdot \varphi_2 = -\frac{M_{np}}{I_{np}}, \text{ или } \varphi_2 = -\frac{M_{np}}{I_{np} \cdot k^2} = -\frac{M_{np}}{C_{yn}}.$$

С учетом последнего общее решение имеет вид

$$\varphi = \exp(-bt) \cdot (A \cdot \text{Cos}k \cdot t + B \cdot \text{Sink} \cdot t) - \frac{M_{np}}{C_{yn}} \quad (8)$$

Выражение (8) описывает вращательные затухающие колебания главного привода рабочей клетки в период захвата металла валками, которые являются возмущением, передающиеся на упругую полосу в межклетьевом промежутке. Определим толчковый характер этого возмущения на полосу. Имеем скорость на выходе из очага деформации

$$v_I = v_0 \cdot (I + S)$$

или

$$\frac{u_I}{dt} = R \frac{d\varphi}{dt} (I + S),$$

где u_I - периодически изменяющееся во времени элементарное удлинение или укорочение полосы на выходе из очага деформации. После упрощений и интегрирования получим

$$u_I = R\varphi \cdot (I + S),$$

Подставляя (8), имеем

$$u_I = R(I + S) \left[\exp(-bt) (A \cos kt + B \sin kt) \right] - \frac{M_{np}}{C_{yn}} \quad (9)$$

Выражение (9) можно рассматривать, как граничное условие динамической задачи для упругой полосы в межклетьевом промежутке, и представляет собой нестационарное затухающее воздействие. При этом, постоянные интегрирования A, B определяются начальными условиями, которые должны быть заданы.

Если величину u_I умножить на коэффициент жесткости для полосы, то получим периодически изменяющуюся силу упругости в полосе, определенную с учетом взаимодействия валков и прокатываемого металла в очаге деформации.

Действительно, переход от перемещения к силе в зоне упругости можно реализовать с помощью закона Гука.

Имеем согласно закону Гука

$$F_{yn} = u_I \cdot C'_{yn} = C'_{yn} \cdot R(I + S) \cdot \left[\exp(-bt) \cdot (A \cdot \cos kt + B \cdot \sin kt) - \frac{M_{np}}{C_{yn}} \right] \quad (10)$$

где C'_{yn} - коэффициент жесткости полосы. Изменяющиеся во времени напряжения, с учетом (10)

$$\sigma'_{yn} = \frac{F_{yn}}{W_{np}} = \frac{l}{b \cdot h} \cdot \left\{ C'_{yn} \cdot R(I + S) \cdot \left[\exp(-bt) \cdot (A \cdot \cos kt + B \cdot \sin kt) - \frac{M_{np}}{C_{yn}} \right] \right\} \quad (11)$$

Выражения (9)...(11) позволяют учитывать кинематический и силовой характер воздействия на полосу в межклетьевом промежутке.

В выражении (9) определим постоянные интегрирования из начальных условий. Имеем

при $t = 0$, $u = u_0$, $\dot{u} = u_0$, где u_0 - начальное

положение точки, u_0 - начальная скорость точки.

Скорость движения точки

$$\dot{u} = R \cdot (I + S) \cdot \exp(-bt) \cdot [(-b) \cdot (A \cdot \cos kt + B \cdot \sin kt) + k \cdot (-A \cdot \sin kt + B \cdot \cos kt)]$$

Подставляя начальные условия в (9) и последнее выражение, получим

$$A = \frac{u_0}{R \cdot (I + S)} + \frac{M_{np}}{C_{yn}},$$

$$B = \frac{u_0 + b \cdot u_0}{R \cdot k \cdot (I + S)} + \frac{M_{np} \cdot b}{C_{yn} \cdot k} \quad (12)$$

Из выражений (12) видно, что постоянные интегрирования определяются не только начальными характеристиками движения, но и силовыми параметрами процесса.

Особенностью представленного решения является учет кинематики очага деформации на динамические процессы в период захвата металла валками. Анализ полученных выражений (9)...(11) показывает, что характер затухания вращательных

колебаний системы (b') зависит от опережения S . Следовательно, резерв сил трения в очаге деформации является своеобразным демпфером системы, способствующим снижению динамического воздействия на привод рабочей клетки.

Выводы

1. Проведен анализ влияния взаимодействия валков и прокатываемой полосы на динамические процессы в период захвата металла валками;

2. Вращательные колебания валков передаются на очаг деформации, который вызывает переменное удлинение полосы на выходе из зоны обжатия;

3. Толчковое воздействие при выходе полосы из очага деформации вызывает динамическое возмущение для части раската в межклетьевом промежутке;

4. Полученные результаты работы позволяют скорректировать математическую модель вращательных колебаний системы в период захвата металла валками.

Список літератури

1. Путноки А.Ю. Вибродинамічні процеси в в клітках ШПС 1680 / Путноки А.Ю. // Обробка металів тисненням. Краматорськ: ДГМА: - 2014. - №1(38) с.233–239.
2. Кожевников С.Н. Динаміка машин з пружними зв'язками // Кожевников С.Н. / - Київ: Изд-во АН УРСР. - 1961. - с. 160.
3. Тарх С.М. Краткий курс теоретической механики /Тарх С.М.//. - М: Высшая школа. - 1998. - с. 409.

References (transliterated)

1. Putnoky A.Yu. Vybrodynamycheskye protsessy v v kletyakh ShPS 1680 / Putnoky A.Yu. // Obrabotka metallov davlenyem. Kramatorsk: DHMA: - 2014.- No 1(38) p. 233–239.
2. Kozhevnykov S.N. Dynamika mashyn s uprugymy zvenyamy //Kozhevnykov S.N. / - Kyev: Yzd-vo AN USSR. - 1961. - p. 160.
3. Tarh S.M. Kratyki kurs teoretycheskoi mekhaniky /Tarh S.M.//. - : Moscow Vysshiaia shkola. - 1998. - s. 409.

Поступила (received) 03.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделирование динамических процессов в период захвата металла / В.В. Чигиринский, А.Ю. Путноки // Вісник НТУ «ХПІ». Серія:Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 77–80 – Библиогр.: 3 назви.– ISSN 2519-2671

Модельювання динамічних процесів в період захоплення металу / В.В. Чигиринський, А.Ю. Путноки // Вісник НТУ «ХПІ». Серія:Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 77–80 – Библиогр.: 3 назви.– ISSN 2519-2671

Modeling of dynamic processes in the period of metal capture / V.V. Chigirinsky, A.Yu. Putnoky // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 77–80. – Bibl.:3. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чигиринський Валерій Вікторович - доктор технічних наук, професор, професор Дніпровського державного технічного університету, м Кам'янське; 067 510-22-31; e-mail: val.chig1948@gmail.com.

Чигиринский Валерий Викторович - доктор технических наук, профессор, профессор Днепропетровского государственного технического университета, г. Каменское; 067-510-22-31; e-mail: val.chig1948@gmail.com.

Chigirinsky Valeriy Viktorovich - doctor of technical sciences, professor, professor of Dniprovsky state technical university, m Kam'yansk; 067 510-22-31; e-mail: val.chig1948@gmail.com.

Путноки Олександр Юліусович - кандидат технічних наук, докторант Запорізького національного технічного університету, м. Запоріжжя, 050-341-99-85; e-mail:al.putnori@gmail.com.

Путноки Александр Юлиусович - кандидат технических наук, докторант Запорожского национального технического университета, г. Запорожье; 050-341-99-85; e-mail:al.putnori@gmail.com.

Putnoki Alexander Juliusovich - candidate of technical sciences, doctoral student of Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye; 050-341-99-85; e-mail: al.putnori@gmail.com.

УДК. 621. 771. 01

*М. Н. ШТОДА, С. В. ЕРШОВ, С. Н. МЕЛЬНИК, В. М. САМОХВАЛ, С. Ю. ГАВРИЛИН***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА НАСТРОЙКИ ЧИСТОВОГО БЛОКА ПРИ ПРОКАТКЕ КАТАНКИ ДИАМЕТРОМ 5,5 ММ**

У статті описаний режим налаштування проволочного блоку стану 400/200 ПАТ «Дніпровський меткомбінат» для прокатки катанки діаметром 5,5 мм, що розроблений на підставі результатів розрахунку математичної моделі процесу безперервної прокатки катанки. Модель крім розмірів штаби по модулях дозволяє визначати умови прокатки в просторах між модулями проволочного блоку залежно від його основних налаштувань, що визначають технологічні параметри. Порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними підтвердило адекватність запропонованої математичної моделі. Помилка визначення висоти і ширини штаби знаходиться в межах загальноприйнятої інженерної точності розрахунків. Вимірювання готового профілю по довжині бунту показали, що розміри поперечного перерізу катанки стабільні по довжині мотка бунту і входять у межі допуску $\pm 0,2$ мм. Дефектний передній кінець бунту був повністю виключений, довжина заднього дефектного кінця скоротилася з 5 витків (~15 м) до 2,5 витків (~7,5 м). На перших експериментальних бунтах катанки виявлений закат на поверхні штаби, що виник із-за переповнення передчистового круглого калібру (8 модуль). Переповнення передчистового круглого калібру (8 модуль) обумовлено недосконалою формою і розмірами калібрів 6, 7 і 8 модулів блоку, а також неточністю установки зазорів між валками цих модулів. При вимірюванні катанки виявлений ефект висотного утягування профілю в чистовому калібрі при прокатці на робочих швидкостях. Причина утягування потребує подальших досліджень.

Ключові слова: катанка, натяг між модулями, проволочний блок, утягування висоти профілю, точність налаштування, розширення, дефектний кінець бунту

В статье описан режим настройки проволочного блока стана 400/200 ПАО «Днепропетровский меткомбинат» для прокатки катанки диаметром 5,5 мм, разработанный на основании результатов расчета математической модели процесса непрерывной прокатки катанки. Модель помимо размеров полосы по модулям позволяет определять условия прокатки в пространствах между модулями проволочного блока в зависимости от его основных настроек, определяющих технологические параметры. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными подтвердило адекватность предлагаемой математической модели. Ошибка определения высоты и ширины полосы находится в пределах общепринятой инженерной точности расчетов. Измерение готового профиля по длине бунта показали, что размеры поперечного сечения катанки стабильны по длине мотка бунта и входят в допуск $\pm 0,2$ мм. Дефектный передний конец бунта полностью исключен, длина заднего дефектного конца сократилась с 5 витков (~15 м) до 2,5 витков (~7,5 м). На первых экспериментальных бунтах катанки выявлен закат на поверхности полосы, возникший из-за переполнения предчистового круглого калибра (8 модуль). Переполнение предчистового круглого калибра (8 модуль) обусловлено несовершенной формой и размерами калибров 6, 7 и 8 модулей блока, а также неточностью настройки зазоров между валками этих модулей. При измерении катанки выявлен эффект высотной утяжки профиля в чистовом калибре при прокатке на рабочих скоростях. Причина утяжки требует дальнейших исследований.

Ключевые слова: катанка, натяжение между модулями, проволочный блок, утяжка высоты профиля, точность настройки, уширение, дефектный конец бунта

This article describes the setup mode block of rolling mill PJSC «Dneprovsky Integrated Iron&Steel Works» for rolling wire rod, 5.5 mm diameter, that developed on the basis of results calculation the mathematical model of the process of continuous rolling of wire rod. Model allows to define the size of the bars by the stands, the conditions of rolling in the spaces between the stands of the wire block depending on the basic settings that determine the technological parameters. Comparison of calculation results with experimental data confirmed the adequacy of the proposed mathematical model. Mistake determination of the height and width of the wire rod is within common engineering accuracy calculations. Measurement of the finished profile along the length coil of wire rod showed that the cross-sectional dimensions are stable along the length coil of wire. The sizes of the cross-section are contained in the tolerance of $\pm 0,2$ mm. Defective forward end of the coil wire was fully excluded. Length defective end was reduced from 5 convolutions (~15 m) to 2.5 convolutions (~7.5 m). The fold on the wire surface found on the first experimental coils of rod, caused by the overflow the before finishing round caliber (8 stand). The overflow the before finishing round caliber (8 stand) due to imperfect shape and dimensions of the calibers 6, 7 and 8 stands of the block, as well as inaccuracy by setting of the gap between the rolls of these stands. The effect reduced of height profile in the finishing pass in the rolling at operating speeds was identifying during measurement. Reason for the reduced height requires further research.

Keywords: wire rod, the tension between the stands, wire rod block, reduced of height profile, precision setting, a spreading, defective end in the coil of wire rod

Введение. Большинство современных сортовых станов в своем составе имеют одну или несколько непрерывных групп клетей. В зависимости от настройки клетей прокатка в них может протекать с тремя режимами в межклетевых пространствах: с петлеобразованием, подпором или натяжением. Режим прокатки, как отмечено в работе [1], существенно влияет на точность прокатываемого профиля по длине.

Если при прокатке в непрерывных группах клетей с индивидуальным приводом существует возможность регулирования натяжения за счет изменения частоты вращения валков соседних клетей,

то при прокатке катанки в проволочных блоках с общим приводом модулей режим натяжений между модулями блока определяется заданными конструкцией блока передаточными числами от электродвигателя к валкам [2]. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что на практике при эксплуатации станов между модулями блока могут возникать довольно значительные силы натяжения и подпора, что снижает точность катанки, приводит к повышенному износу деталей привода отдельных модулей, а также к изгибу раската в межклетевых пространствах и аварийной остановке блока [2].

Анализ состояния вопроса. Одни из первых исследований влияния натяжения на утяжку профиля были описаны в работе [3]. В этой работе показано, что между клетями могут возникать условия, при которых прокатываемая полоса подвергается пластической деформации, рассмотрены вопросы, связанные со скоростным режимом прокатки в непрерывных группах клетей с натяжением между клетями, выведены зависимости для определения напряжения натяжения полосы между клетями.

В работе Выдрин В.Н. [4] описана математическая модель непрерывного сортового стана, основанная на законе постоянства секундных объемов. Модель учитывает влияние рассогласования скорости отдельных клетей, перемещения нажимных винтов клетей (обжатия по клетям), сил трения и жесткости механических характеристик двигателей клетей.

Этот подход получил развитие в работах [5] и [6]. Модели, описанные в этих работах, учитывают диаметры валков, передаточные отношения, заложенные в конструкцию блоков. Экспериментальные исследования и расчетные данные, приведенные в работах [5, 6] показывают возможность регулирования величины натяжения полосы между модулями проволочного блока за счет изменения зазоров между валками по проходам.

Основной недостаток существующих разработок – отсутствие общих рекомендаций к использованию результатов исследований, использование в моделях формул для расчета уширения полосы при прокатке в овальных и круглых калибрах, которые в условиях проволочного блока не позволяют определить ширину полосы в каждом проходе с необходимой точностью до 5%, использование закона постоянства секундных объемов, несмотря на замечание авторов в работе [3] о том, что этот закон при натяжении между клетями не выполняется.

Цель работы – разработка режима настройки чистового блока при прокатке катанки $\varnothing 5,5$ мм, обеспечивающая уменьшение размеров дефектного переднего и заднего концов бунта в условиях ПАТ «Днепропетровский меткомбинат».

Постановка задачи. Технологический процесс производства катанки, осуществленный в настоящее время на ПАО «Днепропетровский меткомбинат» и на большинстве металлургических предприятиях мира, предполагает разделение всего периода прокатки в проволочном блоке на три стадии, различающихся между собой условиями процесса. Первая стадия – прокатка переднего конца бунта, характеризующаяся прокаткой не охлажденного в установках водяного охлаждения переднего конца подката, изменением частоты вращения валков чистового блока во время захвата полосы валками первого модуля блока, изменяющимися условиями процесса прокатки по калибрам проволочного блока в связи с их заполнением. Вторая стадия процесса, самая продолжительная по времени – прокатка средней

части бунта. Эта стадия характеризуется в основном стабильными показателями работы стана: температура металла, частота вращения валков, размеры профиля полосы. Третья стадия – прокатка заднего конца бунта, которая начинается в момент выхода полосы из валков клетки предыдущей проволочному блоку. Опыт показывает, что размеры профиля, соответствующие каждой из указанных стадий, отличаются друг от друга. В результате, чаще всего, получают бунт с большей шириной катанки на переднем и заднем концах. Для устранения этого дефекта отрезают не менее 5 витков заднего и, если это предусмотрено технологией, переднего концов бунта. Основная задача этой работы – разработка режима обжатия и настройки блока, позволяющего уменьшить длину дефектного переднего и заднего концов бунта.

Для разработки оптимального режима настройки проволочного блока на основании методики расчета поперечной деформации при прокатке в овальных и круглых калибрах в условиях проволочного блока [7] была разработана математическая модель процесса непрерывной прокатки катанки. Модель помимо размеров полосы по модулям позволяет определять условия прокатки в межклетевых пространствах проволочного блока в зависимости от его основных настроек, определяющих технологические параметры (зазоры между валками модулей, частота вращения двигателя проволочного блока, температура полосы перед блоком, диаметры твердосплавных валков блока и размеры подката).

При разработке режима настройки проволочного блока стана 400/200 для прокатки катанки диаметром 5,5 мм было принято, что подкат имеет диаметр 17,2 мм; диаметр твердосплавных валков по буртам составляет 210 мм; температура металла перед чистовым блоком 900°C; линейная скорость вращения валков чистового модуля 97 м/с.

Основной критерий выбора оптимального варианта настройки блока являлась безаварийная работа стана, которую проверяли по двум параметрам: отсутствие петлеобразования между модулями блока; кинематическая вытяжка, хотя бы последних 5 модулей должна быть больше физической вытяжки в рассматриваемом очаге деформации.

В соответствии с приведенными критериями для эксперимента был выбран режим настройки блока из подката 17,2 мм, приведенный в табл. 1.

Методы исследований. Сложность проверки работоспособности математической модели процесса непрерывной прокатки катанки в проволочном блоке состоит в том, что высокая скорость прокатки в чистовом блоке исключает возможность измерения размеров профиля по модулям, поэтому чаще всего приходится ограничиваться сравнением размеров катанки, производимой по известному режиму настройки блока, с результатами расчетов, выполненных для этих условий.

Так как существует множество вариантов настройки проволочного блока с различным

распределением режима натяжений по проходам, то было решено каждый из известных режимов обжатий, реализованных на проволочном блоке, сравнить с

результатами расчетов математической модели с целью проверки ее работоспособности.

Таблица 1 – Экспериментальная таблица настройки блока (на основании расчета)

№ клетки	тип	Размеры калибра				Размеры полосы			Обжатие	Диаметр		Обороты		Передаточное отношение	Скорость прокатки	Вытяжка
		Ширина	Глубина вреза	Зазор		Высота	Ширина	Площадь		по буртам	катающий	валков	двигателя			
				по мет.	по щупу											
		мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм ²		мм	мм	мм	об/мин			
20V	-	-	-	-	-	17,2	17,2	232,35	-	-	-	-	-	-	10,4	-
1	овал	23,65	4,6	1,63	1,05	10,83	20,97	178,37	6,37	210	200,4	1157,7	1287,4	1,112	13,6	1,303
2	круг	13,83	6,14	1,57	1,1	13,85	13,2	144,24	7,12	210	197,7	1443,3	1271,6	0,881	17,0	1,237
3	овал	18,89	3,5	1,63	1,1	8,63	16,77	115,77	4,63	210	202,35	1786,2	1296,8	0,726	20,7	1,246
4	круг	11,45	4,95	1,22	0,8	11,12	10,03	92,58	5,96	210	200,08	2258,2	1284,9	0,569	26,9	1,250
5	овал	16,85	2,7	1,28	0,8	6,68	13,13	74,03	3,92	210	204,08	2838,4	1305,7	0,460	33,0	1,251
6	круг	8,97	3,7	1,3	0,95	8,7	8,1	59,04	5,41	210	202,27	3604,2	1293,9	0,359	43,2	1,254
7	овал	13,56	2,1	1,07	0,65	5,27	10,56	47,14	3,37	210	205,32	4478,2	1307,6	0,292	53,5	1,252
8	круг	7,27	2,92	0,93	0,65	6,77	6,35	37,59	4,62	210	203,99	5705,0	1306,5	0,229	67,87	1,254
9	овал	10,24	1,6	0,96	0,6	4,16	8,43	30,03	2,91	210	206,3	7159,2	1317,3	0,184	84,6	1,252
10	круг	5,76	2,18	1,3	1,3	5,66	4,94	24,89	3,53	210	204,93	8852,7	1301,3	0,147	105,6	1,207

Перед началом эксперимента на стане прокатывали катанку номинальным \varnothing 5,5 мм. По данными ОТК цеха усредненные размеры катанки по длине прокатываемых бунтов составляли \varnothing 5,6 мм. Размеры используемого подката составили \varnothing 17,3 мм.

Для проверки адекватности разработанной модели измерили фактические зазоры между валками по модулям проволочного блока (см. табл. 2). Из результатов расчетов видно, что при температуре металла перед блоком 900 °С и линейной скорости вращения валков чистового модуля блока 97 м/с режим натяжений в между модулями блока будет в табл. 2.

обеспечивать безаварийный процесс прокатки, так как в большинстве межклетевых промежутках блока возникает натяжение, а в остальных - подпор, не вызывающий петлеобразования. Кроме того, расчетные размеры готовой катанки 5,49x5,47 мм, что меньше фактических размеров – \varnothing 5,6 мм, но в пределах ошибки 2,5 %. Таким образом, модель адекватно описывает процесс прокатки катанки диаметром 5,5 мм на проволочном блоке ПАО «Днепропетровский меткомбинат» при зазорах, приведенных

Таблица 2 – Результаты измерений зазоров при помощи щупов и при прокатке по буртам валка стальной проволоки \varnothing 3 мм перед экспериментом

№ модуля	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
зазор по щупу $g_{щуп.}$, мм	1,6	1,25	1,55	0,75	0,6	1,05	0,6	0,95	1	1,35
зазор по проволоке $g_{пров.}$, мм	1,9	1,9	1,85	1,27	1,21	1,49	1,12	1,18	1,07	1,57
разница зазоров $\square g_{пров.}$, мм	0,3	0,65	0,3	0,52	0,61	0,44	0,52	0,23	0,07	0,22

Далее перешли к первому этапу

эксперимента – настройка проволочного блока в соответствии с табл. 1 и проверка точности

определения размеров поперечного сечения полосы по проходам в условиях свободной прокатки в калибрах

проволочного блока на настроенной частоте вращения валков модулей блока. Для этого установили зазоры между валками модулей блока в соответствии с табл. 1, проверяя значение зазоров при помощи щупов (точность настройки $\pm 0,05$ мм). В каждом модуле блока прокатывали стальной образец длиной не менее

300 мм, нагретый до 900°C с формой и размерами поперечного сечения, соответствующими настройкам предыдущего калибра. Размеры полосы по проходам проволочного блока, полученные во время настройки блока, сведены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты измерений зазоров при помощи щупов и размеры пробного образца перед экспериментом

№ модуля	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
зазор по щупу $g_{щуп.}$, мм	-	1,05	1,1	1,1	0,8	0,8	0,95	0,65	0,65	0,6	1
Размеры образца по проходам (результаты эксперимента)											
высота h , мм	17,3	11	13,9	8,3	11,25	7	9,05	5,2	7,1	4,1	5,7
ширина b , мм	17,4	21,3	13,7	17,7	11,2	14,1	9,3	12,5	8,1	10,25	6
Размеры образца по проходам (предварительный расчет)											
высота h , мм	17,3	10,85	13,88	8,65	11,15	6,7	8,75	5,3	6,84	4,2	5,61
ширина b , мм	17,4	21,21	13,4	17,14	10,68	13,79	8,35	10,39	6,31	8,3	5,19
Анализ точности настройки											
ошибка высоты δh , мм	0,0	0,15	0,02	-0,35	0,1	0,3	0,3	-0,1	0,26	-0,1	0,09

Как видно из табл. 3, настройку высоты калибров можно считать удовлетворительной. так как в абсолютных величинах ошибка не превышает 0,4 мм в подготовительных проходах находится в пределах $\pm 5\%$ (рис. 1).

блока, а в чистовом – 0,09 мм, что меньше допуска на диаметр катанки. Относительная ошибка настройки

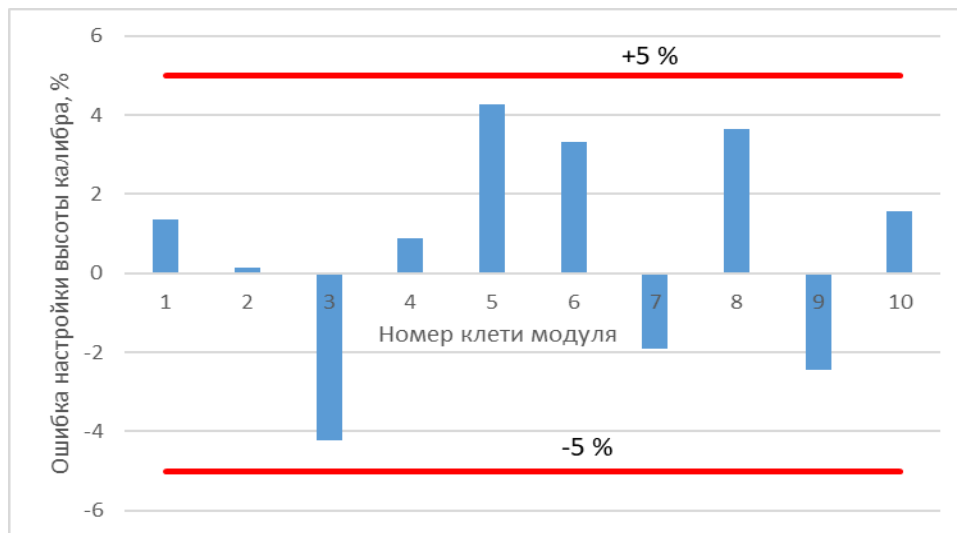


Рис. 1 – Относительная ошибка настройки зазоров между валками чистового блока по щупам

Расчетная ширина полосы по проходам, приведенная в табл. 3, несет справочный характер. Сравнить ее значения с размерами профиля по проходам проволочного блока, полученными во время настройки блока (табл. 3), нельзя, так как во время эксперимента в каждом калибре выполняли свободную прокатку, а расчеты проводили для условий непрерывной прокатки катанки в

проволочном блоке с учетом утяжки размеров профиля в проходах с задним натяжением полосы.

Для проверки точности методики определения уширения [7] при прокатке в исследуемых круглых и овальных калибрах рассчитали размеры поперечного сечения полосы после каждого прохода без учета влияния натяжения между модулями блока для размеров образца и настройки зазоров между валками

модулей блока, приведенных в табл. 3. Результаты расчета сведены в табл. 4. Как видно, максимальная ошибка определения ширины полосы после прокатки составляет 13,58 %. При этом, минимальная и средняя ошибки находятся в пределах, рекомендуемых для инженерных расчетов. Цветом в табл. 4 и 5 выделены проходы с наибольшими ошибками определения ширины после прокатки. Таким образом, формулы для расчета уширения [7] при прокатке в круглых и овальных калибрах адекватно описывают деформированное состояние полосы при прокатке катанки $\varnothing 5,5$ мм в условиях проволочного блока ПАО «Днепропетровский меткомбинат».

Далее перешли к прокатке катанки в промышленных условиях. При этом проволочный блок для первых двух заготовок был настроен как указано в табл. 3, чистовая группа стана была настроена на подкат для блока с размерами

17,3x17,4 мм, линейная скорость вращения валков 10-го модуля проволочного блока составила 97 м/с. Температура металла перед чистовым блоком 900 °С. После прокатки от каждого бунта отобрали 50 витков переднего и заднего конца катанки для измерения формы поперечного сечения. Результаты измерений показали, что обе полосы были прокатаны с переполнением чистового круга. Поэтому перед прокаткой третьего образца увеличили зазор между валками чистового модуля на 0,16 мм. Настройку остальных модулей не изменяли. Результаты измерений катанки по длине мотка каждого из трех прокатанных бунтов приведены на рис. 2. Горизонтальные линии на графиках рис. 2 показывают предельные значения размеров при допусках $\pm 0,15$ мм и $\pm 0,2$ мм.

Таблица 4 – Сравнение точности расчета уширения с экспериментальными данными (в качестве исходных данных используем реальные размеры полосы)

№ кл.	Размеры полосы (эксперимент)		Расчетная ширина полосы	Ширина калибра	Факторы для расчета уширения			Расчетное уширение	Фактическое уширение	Ошибка расчета уширения	
	h	b			b_1^P	V_k	h_0/h_1				D/h_1
	мм	мм	мм	мм						%	
0	17,3	17,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	11	21,3	21	23,65	1,58	18,18	1,36	1,213	1,231	-1,41	
2	13,9	13,7	13,6	13,83	1,53	14,39	1,26	1,238	1,245	-0,73	
3	8,3	17,7	17,3	18,89	1,65	24,1	1,38	1,245	1,273	-2,26	
4	11,25	11,2	10	11,45	1,57	17,78	1,38	1,207	1,349	-10,71	
5	7	14,1	14,2	16,85	1,6	28,57	1,5	1,259	1,253	0,71	
6	9,05	9,3	9	8,97	1,56	22,1	1,28	1,287	1,329	-3,23	
7	5,2	12,5	11,9	13,56	1,79	38,46	1,46	1,32	1,381	-4,8	
8	7,1	8,1	7	7,27	1,76	28,17	1,4	1,352	1,558	-13,58	
9	4,1	10,25	9,8	10,24	1,98	48,78	1,26	1,38	1,444	-4,39	
10	5,7	6	5,8	5,75	1,8	35,09	1,4	1,413	1,463	-3,33	

Измерение готового профиля по длине бунта показали, что размеры поперечного сечения катанки стабильны по длине мотка бунта и входят в допуск $\pm 0,2$ мм. Дефектный передний конец бунта полностью исключен, длина заднего дефектного конца сократилась с 5 витков (~15 м) до 2,5 витков (~7,5 м).

Однако тщательный осмотр готовых профилей показал, что на поверхности первых двух бунтов

катанки из-за переполнения предчистового круглого калибра (8 модуль) возник закат. Переполнение предчистового круглого калибра (8 модуль) обусловлено несовершенной формой и размерами калибров 6, 7 и 8 модулей блока, а также неточностью настройки зазоров между валками этих модулей.

ПЕРВАЯ ЗАГОТОВКА (настройка по табл. 3)																																		
передний конец полосы															задний конец полосы																			
H	мм	5,25	5,2	5,25	5,15	5,2	5,2	5,2	5,15	5,1	5,3	5,25	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,25	5,2	5,25	5,2	5,25	5,2	5,2	5,25	5,02	5,25	5,4	5,3	5,25			
B	мм	5,9	6,1	5,8	5,8	5,75	5,8	5,8	5,75	6	5,7	5,5	5,8	5,8	5,6	5,65	6	6,2	6,25	6,2	6,2	6,2	6,3	6,1	6,2	6,1	5,8	6,15	6,4	7,2	6,8	5,4	6,5	
L	м	0,3	1,3	2,3	3,8	6,8	9,8	12,8	15,8	18,8	21,8	24,8	27,8	30,8	33,8	36,8	75	171	36	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6	4,5	3	1,3	0,3	
ВТОРАЯ ЗАГОТОВКА (настройка по табл. 3)																																		
передний конец полосы															задний конец полосы																			
H	мм	5,2	5,25	5,3	5,3	5,2	5,2	5,2	5,25	5,2	5,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,2	5,3	5,2	5,25	5,3	5,2	5,3	5,2	5,2	
B	мм	5,5	6,4	6,2	6,1	6,1	6,2	6	6,2	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,1	6,1	6,2	6,2	6,2	6	6,1	6,5	6,4	6,5
L	м	0,3	0,6	3,6	6,6	9,6	12,6	15,6	18,6	21,6	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	150	23	20	17	14	11	8	5	2	0,3
ТРЕТЬЯ ЗАГОТОВКА (раскрыли чистовой калибр на 0,16 мм)																																		
передний конец полосы															задний конец полосы																			
H	мм	5,3	5,35	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,25	5,3	5,4	5,3	5,3	5,3	5,4	5,25	5,2	5,3	5,25	5,25	5,4	5,4	5,25	5,25	5,3	5,35	5,3	5,4	5,25	5,25	5,25	5,4	5,3	
B	мм	5,65	5,7	5,7	5,5	5,3	5,7	5,4	5,7	5,4	5,6	5,7	5,7	5,7	5,6	5,7	5,6	5,3	5,3	5,55	5,55	5,7	5,6	5,5	5,5	5,55	5,5	5,6	5,8	6	6,2	5,6	5,3	
L	м	0,3	1,3	2,3	3,3	4,8	6,8	9,8	12,8	15,8	18,8	21,8	24,8	27,8	30,8	33,8	75	150	37,5	34,5	31,5	28,5	25,5	22,5	19,5	16,5	13,5	10,5	7,5	4,5	3	1,3	0,3	

← направление прокатки

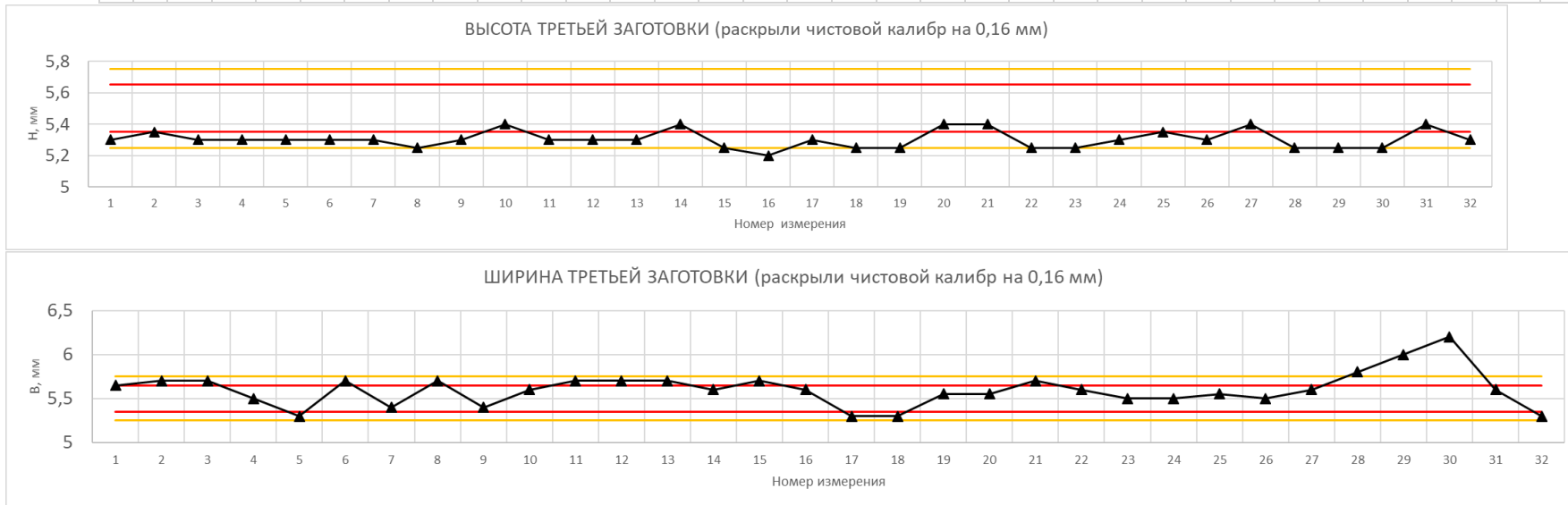


Рис. 2 – Результаты измерений катанки по длине мотка бунта

Также обнаружен эффект высотной утяжки катанки в чистовом калибре при прокатке на рабочих скоростях. В связи с тем, что до этого момента в литературе факт такого явления не описывался может потребовать разъяснения термин – «высотная утяжка катанки». Дело в том, что при проведении описываемых статье экспериментов глубина вреза ручья чистового калибра для прокатки катанки $\varnothing 5,5$ мм составляла 2,18 мм (см. табл. 1). Легко посчитать, что при зазоре 1 мм (см. табл. 3), установленном по шупу во время настройки блока, должны получить минимальную высоту полосы по дну ручья калибра 5,36 мм, однако при прокатке первых двух бунтов получили высоту катанки 5,2 мм (см. рис. 2). Причем ошибки здесь быть не может, так как расположение зазора было отчетливо видно из-за переполнения чистового калибра. Вот этот эффект, когда высота готового профиля меньше высоты калибра перед прокаткой, и назван в статье «высотной утяжкой катанки».

Причина утяжки требует дальнейших объяснений и исследований. На данном этапе, можно предположить, что она связана с режимом натяжений, который возникает в проволочном блоке при непрерывной прокатке, и высокой скоростью прокатки. Так как при прокатке без натяжения на настроечной скорости высота полосы после чистового прохода составила 5,7 мм (см. табл. 3).

Выводы. 1. Разработана математическая модель процесса непрерывной прокатки катанки в условиях чистового проволочного блока, позволяющая помимо размеров полосы по модулям определять условия прокатки в пространствах между модулями проволочного блока в зависимости от его основных настроек, определяющих технологические параметры (зазоры между валками модулей, частота вращения двигателя проволочного блока, температура полосы перед блоком, диаметры твердосплавных валков блока и размеры подката).

2. Сравнение результатов расчета размеров прокатываемого профиля с фактическими размерами катанки, получаемыми при настройке проволочного блока в условиях стана 400/200 ПАО «Днепропетровский меткомбинат», показывает, что в рассматриваемом случае модель позволяет определить готовый размер полосы с точностью до 2,5 %. То есть для этих условий, модель адекватно описывает процесс прокатки катанки диаметром 5,5 мм на десятиклетевом проволочном блоке ПАО «Днепропетровский меткомбинат».

3. Методику настройки высоты калибров для десятиклетьевого проволочного блока ПАО «Днепропетровский меткомбинат» можно считать удовлетворительной, так как в абсолютных величинах разница между расчетными и фактическими значениями высоты полосы (зазора между валками) не

превышает 0,4 мм в подготовительных проходах блока, а в чистовом – 0,09 мм, что меньше допуска на диаметр катанки. Относительная ошибка настройки находится в пределах ± 5 %.

4. Проверка точности методики определения уширения [7] при прокатке в исследуемых круглых и овальных калибрах без учета влияния натяжения между модулями блока показали, что максимальная ошибка определения ширины полосы после прокатки составляет 13,58 %. При этом, минимальная и средняя ошибки находятся в пределах, рекомендуемых для инженерных расчетов. Таким образом, формулы для расчета уширения [7] при прокатке в круглых и овальных калибрах адекватно описывают деформированное состояние полосы при прокатке катанки $\varnothing 5,5$ мм в условиях проволочного блока ПАО «Днепропетровский меткомбинат».

5. Результаты измерения готового профиля по длине бунта, полученного в результате экспериментальной прокатки, показали, что размеры поперечного сечения катанки стабильны по длине мотка бунта и входят в допуск $\pm 0,2$ мм. Дефектный передний конец бунта полностью исключен, длина заднего дефектного конца сократилась с 5 витков (~15 м) до 2,5 витков (~7,5 м).

6. На первых экспериментальных бунтах катанки выявлен закат на поверхности полосы, возникший из-за переполнения предчистового круглого калибра (8 модуль). Переполнение предчистового круглого калибра (8 модуль) обусловлено несовершенной формой и размерами калибров 6, 7 и 8 модулей блока, а также неточностью настройки зазоров между валками этих модулей.

7. Обнаружен эффект высотной утяжки катанки в чистовом калибре при прокатке на рабочих скоростях. Эффект высотной утяжки состоит в том, что высота катанки меньше высоты калибра перед прокаткой. Причина утяжки требует дальнейших объяснений и исследований.

Список литературы

1. Безнос М.П. Настройка сортовых станов. / М.П. Безнос. – М.: Металлургия, 1974. – 151 с.
2. Тимошпольский В.И. Производство высокоуглеродистой катанки на металлургических агрегатах высшего технического уровня. / В.И. Тимошпольский, Н.В. Андрианов, С.М. Жучков и др. – Мн.: Бел. наука, 2004. – 237 с. ISBN 985-08-0617-6
3. Чекмарев А.П. Прокатка на мелкосортных станах. / А.П. Чекмарев, В.П. Гречко, В.В. Гетманец, Б.В. Ховрин. – М.: Металлургия, 1967. – 364 с.
4. Выдрин В.Н. Процесс непрерывной прокатки / В.Н. Выдрин, А.С. Федосиенко, В.И. Крайнов. – М.: Металлургия, 1970. – 456 с.
5. Иводитов А.Н. Разработка и освоение технологии производства высококачественной катанки. / А.Н. Иводитов, А.А. Горбанев. – М.: Металлургия, 1989. – 256 с.
6. Горбанев А.А. Теоретические и технологические основы высокоскоростной прокатки катанки. / А.А. Горбанев, С.М. Жучков, В.В. Филиппов и др. – Мн.: Выш. шк., 2003. – 287 с. ISBN 985-06-0793-9

7. *Штода М.Н.* Уширение при прокатке в калибрах вытяжной системы «овал – круг» / *М.Н. Штода, С.В. Ершов, К.Г. Гејмур, В.М. Самохвал и др.* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 30(1202). – С. 79–87. – ISSN 2519-2671

References (transliterated)

1. *Beznos M.P.* Nastrojka sortovyh stanov. / *M.P. Beznos.* – Moscow: Metallurgiya, 1974. – 151 p.
2. *Timoshpol'skij V.I.* Proizvodstvo vysokouglerodistoj katanki na metallurgicheskikh agregatah vysshogo tekhnicheskogo urovnya. / *V.I. Timoshpol'skij, N.V. Andrianov, S.M. Zhuchkov i dr.* – Minsk: Bel. navuka, 2004. – 237 p. ISBN 985-08-0617-6
3. *Chekmarev A.P.* Prokatka na melkosortnyh stanah. / *A.P. Chekmarev, V.P. Grechko, V.V. Getmanec, B.V. Hovrin.* – Moscow: Metallurgiya, 1967. – 364 p.

4. *Vydrin V.N.* Process nepreryvnoj prokatki / *V.N. Vydrin, A.S. Fedosienko, V.I. Krajnov.* – Moscow: Metallurgiya, 1970. – 456 p.
5. *Ivoditov A.N.* Razrabotka i osvoenie tekhnologii proizvodstva vysokokachestvennoj katanki. / *A.N. Ivoditov, A.A. Gorbanev.* – Moscow: Metallurgiya, 1989. – 256 p.
6. *Gorbanev A.A.* Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy vysokoskorostnoj prokatki katanki. / *A.A. Gorbanev, S.M. Zhuchkov, V.V. Filippov i dr.* – Minsk: Vysh. shk., 2003. – 287 p. ISBN 985-06-0793-9
7. *Shtoda M.N.* Ushirenje pri prokatke v kalibrah vytyazhnoj sistemy «oval – krug» / *M.N. Shtoda, S.V. Ershov, K.G. Geјmur, V.M. Samohval i dr.* // Visnik NTU «HPI». Seriya: Innovacijni tekhnologii ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii. – Kharkiv: NTU «HPI», 2016. – No 30(1202). – P. 79–87. – ISSN 2519-2671

Поступила (received) 10.11.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Експериментальне дослідження режиму налагодження чистового блоку при прокатці катанки діаметром 5,5 мм / М.М. Штода, С.В. Ершов, С.М. Мельник, В.М. Самохвал, С.Ю. Гаврилін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 81–89 – Библиогр.: 7 назв.– ISSN 2519-2671

Экспериментальное исследование режима настройки чистового блока при прокатке катанки диаметром 5,5 мм / М.Н. Штода, С.В. Ершов, С.Н. Мельник, В.М. Самохвал, С.Ю. Гаврилин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 81–89 – Библиогр.: 7 назв.– ISSN 2519-2671

Experimental study of the mode setting of the finishing unit for rolling of wire rod with a diameter 5.5 mm / M.N. Shtoda, S.V. Ershov, S.N. Melnik, V.M. Samokhval, S.Yu. Havrylin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 81–89. – Bibl.:7. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Штода Максим Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри ОМТ ім. Б.М. Ілюковича, м. Кам'янське; тел.: (099) 779-56-26; e-mail: maksshtoda@gmail.com.

Штода Максим Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Днепропетровский государственный технический университет, доцент кафедры ОМД им. Б.М. Илюковича, г. Каменское; тел.: (099) 779-56-26; e-mail: maksshtoda@gmail.com.

Shtoda Maksim Nikolayevych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Dniprovsk State Technical University, Associate Professor at the Department of Metal Forming, Kamianske; tel.: (099) 779-56-26; e-mail: maksshtoda@gmail.com.

Ершов Сергій Володимирович – доктор технічних наук, професор, Міжнародний дослідницький інститут технології сталі Вуханського університету науки та технологій, заслужений професор, м. Вухань; e-mail: sv.yershov@gmail.com.

Ершов Сергей Владимирович – доктор технических наук, профессор, Международный исследовательский институт технологии стали Уханьского университета науки и технологий, заслуженный профессор, г. Ухань; e-mail: sv.yershov@gmail.com.

Yershov Sergey Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, International Research Institute for Steel Technology Wuhan University of Science and Technology, Distinguished Professor, Wuhan;; e-mail: maksshtoda@gmail.com.

Мельник Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, головний калібрувальник, ПАТ «Дніпровський меткомбінат», м. Кам'янське; тел.: (098) 030-89-92

Мельник Сергей Николаевич – кандидат технических наук, главный калибровщик, ПАО «Днепропетровский меткомбинат», г. Каменское; тел.: (098) 030-89-92

Melnik Sergey Nikolayevych – Main Calibrator, PJSC «Dneprovsky Integrated Iron&Steel Works», Kamianske; tel.: (098) 030-89-92

Самохвал Володимир Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, доцент кафедри ОМТ ім. Б.М. Ілюковича, м. Кам'янське; тел.: (063) 292-31-42; e-mail: volsamokhval@gmail.com.

Самохвал Владимир Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Днепропетровский государственный технический университет, доцент кафедры ОМД им. Б.М. Илюковича, г. Каменское; тел.: (063) 292-31-42; e-mail: volsamokhval@gmail.com.

Samokhval Vladimir Mikhailovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Dniprovsk State Technical University, Associate Professor at the Department of Metal Forming, Kamianske; tel.: (063) 292-31-42; e-mail: volsamokhval@gmail.com.

Гаврилін Сергій Юрійович – Дніпровський державний технічний університет, асистент кафедри ОМТ ім. Б.М. Ілюковича, м. Кам'янське; тел.: (067) 603-91-93; e-mail: sgavrilyn@gmail.com.

Гаврилин Сергей Юрьевич – Днепропетровский государственный технический университет, ассистент кафедры ОМД им. Б.М. Илюковича, г. Каменское; тел.: (067) 603-91-93; e-mail: sgavrilyn@gmail.com.

Havrylin Sergej Yurievich – Dniprovsk State Technical University, Lecturer at the Department of Metal Forming, Kamianske; tel.: (067) 603-91-93; e-mail: sgavrilyn@gmail.com.

ЗМІСТ

Аргат Р.Г., Пузырь Р.Г., Долгих О.Н. Оценка приемов, увеличивающих степень деформации при вытяжке цилиндрических деталей без складкодержателя.....	5
Ахлестин А.В., Левченко В.Н., Сотников В.Д. Пути сокращения продолжительности переналадки валкового инструмента профилигибочных станков для производства гнутых профилей.....	10
Загорянский В.Г., Дикая Л.Э.: Оптимизация толщин слоев биметалла при полосчатом плакировании совместной холодной прокаткой.....	16
Калюжний О.В., Калюжний В.Л., Соколовська С.С. Визначення параметрів витягування з потоншенням зпрофільованим пуансоном порожнистих заготовок після зворотного видавлювання.....	21
Кухарь В.В., Глазко В.В., Анищенко А.С. Разработка классификации эластомерных компенсаторов внецентренной нагрузки системы «пресс–штамп».....	29
Лотоус В.В., Драгобецкий В.В., Симонова А.А., Наумова Е.А., Юрко А.А., Сокур Н.И. Новый метод упрочнения деталей горного оборудования.....	38
Музыкин Ю.Д., Гайдамака А.В., Татьков В.В., Беличенко И.Н., Дудаков А.Н. Диагностика технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса работы главных приводов заготовочных станок.....	43
Плеснецов С.Ю. Методи і засоби ультразвукового контролю металовиробів трубчатого, стрижневого та пластинчатого типу (огляд ч.1).....	49
Плеснецов Ю.А., Христинченко Е.Н., Христинченко А.Н. Анализ процесса формообразования профилей с периодически повторяющимися гофрами.....	62
Руденко Н. О. Виробництво та структура пористого заліза з контрольованою пористістю та розміром пор.....	67
Сабол С.Ф., Горностаев В.М., Власенко К.О. Обтиск вісесиметричних трубчатих виробів з горловиною в профільованих матрицях.....	72
Чигиринский В.В., Путники А.Ю. Моделирование динамических процессов в период захвата металла.....	77
Штода М. Н., Еришов С. В., Мельник С.Н., Самохвал В.М., Гаврилин С.Ю. Экспериментальное исследование режима настройки чистового блока при прокатке катанки диаметром 5,5 мм.....	81

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП»

Збірник наукових праць

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

Випуск 36(1258) 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 «ХП». каф. обробки металів тиском, тел. (057) 707-60-40, 707-69-16, e-mail: omd.conf@gmail.com, kurando@mail.ru

Обл. вид. № 30-17

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 300 прим. Зам. No 17. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК No 116 от 10.07.2000 р.

61002, Харків, вул. 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,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції

ДК No 2779 від 28.02.2007 р.