

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*

№ 38 (1210) 2016

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ «ХПІ» 2016

Вісник Національного технічного університету «ХПІ»

Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 38 (1210) – 71 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

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

Координаційна рада:

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

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

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл. -кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитрисенко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. 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. Плєснецов, канд. техн. наук, ст.н.с.

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

Члени редколегії: І. С. Алієв, д-р техн. наук, проф., Г. А. Баглюк, д-р техн. наук, проф.; Бар Рюдигер, д-р техн. наук, проф.; В. В. Драгобецький, д-р техн. наук, проф.; С. В. Єршов, д-р техн. наук, проф.; В. Л. Каложний, д-р техн. наук, проф.; В. К. Лобанов, 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 04 листопада 2016 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2016

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

BULLETIN
OF
THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

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

No 38 (1210) 2016

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkiv
NTU "KhPI" 2016

Collected Works. Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2016. – No 38 (1210) – 71 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. Dmytryenko, 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 November 04, 2016

Л. И. АЛИЕВА

**СИЛОВОЙ РЕЖИМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ
ПРИ ХОЛОДНОМ РАДИАЛЬНО-ПРЯМОМ ВЫДАВЛИВАНИИ С ОБЖАТИЕМ**

Энергетическим методом верхней оценки проведено исследование силового режима процесса комбинированного (последовательного) радиально-прямого выдавливания с обжатием трубной заготовки. Использован модульный подход, позволяющий рассмотреть процесс последовательного выдавливания постадийно с отдельным анализом давлений деформирования по очагам деформации радиального центростремительного и прямого выдавливания металла заготовки. Для стадии радиального выдавливания сопоставлены различные кинематические модули – кинематически возможные поля скоростей и установлено преимущество треугольного криволинейного модуля. Для очага деформации прямого выдавливания использован трапецидальный кинематический модуль. При этом линеаризация подынтегральных зависимостей показала неэффективность из-за затруднений в подборе приемлемых функций для всего объема трапецидального модуля. Для получения приближенных верхних оценок мощности сил деформирования в таких модулях использовано приближенное интегрирование на основе неравенства Коши-Буняковского. Сравнение теоретических и экспериментальных значений давлений деформирования показало приемлемость полученных зависимостей для технологических расчетов энергетических параметров и оценки силового режима процесса комбинированного выдавливания.

Ключевые слова: радиально-прямое выдавливание; трубная заготовка; энергетический метод верхней оценки; кинематические модули; поле скоростей; давление деформирования.

Енергетичним методом верхньої оцінки проведено дослідження силового режиму процесу комбінованого (послідовного) радіально-прямого видавлювання з обтисненням трубної заготовки. Використаний модульний підхід, що дозволяє розглянути процес послідовного видавлювання постадійно з роздільним аналізом тисків деформування по осередках деформації радіального центростремительного і прямого видавлювання металу заготовки. Для стадії радіального видавлювання зіставлені різні кінематичні модулі – кінематичне можливі поля швидкостей і встановлено перевагу трикутного криволінійного модуля. Для осередку деформації прямого видавлювання використаний трапецеїдальний кінематичний модуль. При цьому лінеаризація підінтегральних залежностей показала неефективність через труднощі в підборі прийнятних функцій для всього обсягу трапецеїдального модуля. Для отримання наближених верхніх оцінок потужності сил деформування в таких модулях використано наближене інтегрування на основі нерівності Коші-Буняковського. Порівняння теоретичних та експериментальних значень тисків деформування показало прийнятність отриманих залежностей для технологічних розрахунків енергетичних параметрів і оцінки силового режиму процесу комбінованого видавлювання.

Ключові слова: радіально-пряме видавлювання; трубна заготовка; енергетичний метод верхньої оцінки; кінематичні модулі; поле швидкостей; тиск деформування.

The upper bound method to determine power mode in combined radial-forward extrusion process for hollow billet with compression is investigated. The modular approach that allows for considering step by step extrusion process with a separate analysis of the deformation pressure by the deformation shaping of the radial centripetal and forward extrusion in metal billet is considered. The different kinematics modules for radial extrusion stage are compared. The kinematics of velocity field and best kinematics modules such as triangular curved modules are defined. For shaping of deformation in forward extrusion are defined kinematics modules as trapezoidal. The linearization of the nonlinear integral is shown that it is inefficiencies due to difficulties in the selection of appropriate functions for a total volume of trapezoidal module. For determining deformation forces by upper bound method in such modules is used integration based on Cauchy-Schwarz inequality. The compare between theoretical and experimental results are shown that results confirm each other to get a fine recommendation for technological calculations for energy parameters and evaluation of the power mode in combined extrusion.

Keywords: radial-forward extrusion; hollow billet; upper bound method; kinematic module; velocity field; pressure of deformation

Введение. Традиционными способами изготовления деталей типа гильз и втулок являются продольное (прямое и обратное) выдавливание, локальная обработка и процессы штамповки, предполагающие сочетание этих способов [1–3]. Однако данные способы являются малоэффективными при изготовлении полых деталей сложной формы. Перспективным методом получения осесимметричных деталей является холодное выдавливание и, в частности, комбинированное радиально – продольное выдавливание, характеризуемое истечением металла заготовки в поперечном направлении, заполнении круговой радиальной полости разъемной матрицы с последующим разворотом течения в продольном (в прямом или обратном) направлении [3, 4]. Существуют две группы процессов радиально-прямого выдавливания (РПВ): с обжатием и с раздачей [4].

Для способа радиально-прямого выдавливания с обжатием характерно осуществление радиального выдавливания с течением металла к оси (центру) трубчатой заготовки. Данный способ позволяет получать полые удлиненные осесимметричные детали разнообразной формы, в том числе, с переменной толщиной стенки при использовании плавающей оправки [4]. Ввиду «жесткости» схемы НДС для данного процесса важно правильно рассчитать силовой режим деформирования.

Для получения аналитических зависимостей силовых параметров от технологических факторов используют энергетический метод верхней оценки (баланса мощностей) [5–8]. Применение метода кинематических модулей для энергетических расчетов позволяет описать сложные схемы течения при помощи элементарных модулей [7, 9, 10]. Суммарная оценка величины приведенного давления при этом находится как сумма приведенных давлений модулей, входящих в данную технологическую

схему. В качестве элементарных полей скоростей в основном используют прямоугольные в сечении модули. В то же время, модели, основанные на упрощенной расчётной схеме параллельного течения, демонстрируют расхождения с экспериментальными данными при расчете силовых параметров и, в особенности, при прогнозировании формоизменения заготовки [9, 11]. Например, расчетная схема процесса радиального выдавливания, построенная из простых модулей плоского течения дает расхождение с экспериментальными данными, достигающее 60% [10, 12]. Это объясняется несоответствием упрощенной схемы очага деформации реальной картине деформации, объему и форме пластической зоны, наблюдаемых при выдавливании. Для устранения отмеченного недостатка решений необходимо рассмотреть возможности расчётных схем, которые включают более сложные по форме кинематические модули, описывающие реальную картину течения при осесимметричном выдавливании.

Целью данной работы является исследование силового режима процесса радиально-прямого выдавливания путем построения математических моделей, основанных на оптимальных полях скоростей пластического течения.

Методика исследований. Процесс радиально-прямого выдавливания с обжатием исследуется энергетическим методом верхней оценки (баланса мощностей). Основными упрощающими допущениями данного метода является то, что задача сводится к осесимметричной, а материал рассматривается как изотропный, идеально жестко пластичный, трение пропорционально напряжению текучести. [7-8]

Значения приведенного давления определяются из условия баланса мощностей внешних и внутренних сил на кинематически возможных скоростях перемещений (КВПС): [5, 6, 8]

$$N_a = \sum N_o + \sum N_c + \sum N_t, \quad (1)$$

где N_a – мощность внешних активных сил, затрачиваемых на процесс деформирования;

N_o – мощность сил деформирования;

N_t – мощность сил контактного трения;

N_c – мощность сил среза на поверхностях разрыва скоростей.

Напряжение трения задано по закону Зибеля:

$$\tau_K = 2\mu\sigma_s / \sqrt{3}, \quad (0 \leq \mu \leq 0,5) \quad [6, 8, 12].$$

Моделирование силового режима. При деформировании трубчатых заготовок комбинированным последовательным радиальным выдавливанием (с одновременным истечением металла в направлении к оси симметрии и после разворота в прямом направлении) достигается

формообразование стенки трубчатой детали [4]. Схема процесса представлена на рис. 1. Очаг деформации условно можно разбить на два блока. В блоке А состоящем из модулей 1, 2 и 3 происходит радиальное выдавливание металла, а в Блоке Б (модули 4 и 5) – прямое выдавливание. Зоны 2, 3 и 4 – пластические, зоны 1, 5 и 6 – жесткие, а зоны 7, 8 и 9 представляют собой инструменты. Кинематически возможные поля скоростей (КВПС) для каждого из типов полей представлены в табл. 1.

Для блока Б выбираем кинематический модуль в виде трапециевидального модуля – зоны 4. Этот выбор был обусловлен формой инструмента и экспериментально наблюдаемым полем деформаций.

Мощность внешних активных сил в блоке А (радиального выдавливания) равна:

$$N_{a1} = \pi \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot (R_0^2 - R^2) \cdot \bar{p}_1, \quad (2)$$

где \bar{p}_1 – приведенное давление деформирования.

V_0 – скорость перемещения пуансона.

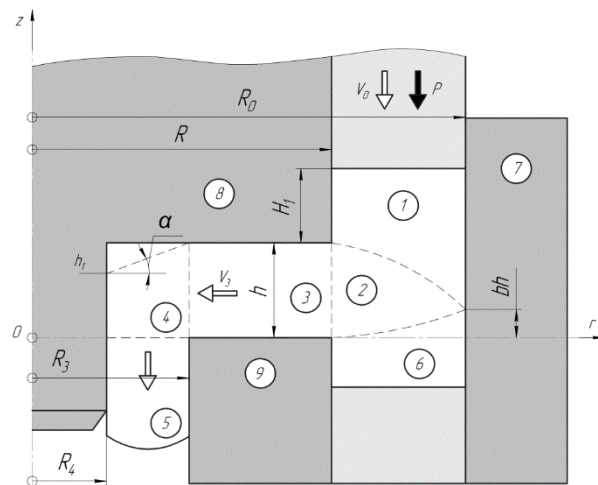


Рис. 1 – Расчетная схема процесса радиально-прямого выдавливания с обжатием

Для блока А выбор кинематического модуля треугольной формы с параболическими границами, приближенными к экспериментально наблюдаемому полю деформаций [13–15] был обоснован также после анализа возможностей вариантов кинематических зон в центральной области, приведенных на рис. 2.

В рассмотренных расчётных схемах центральная область заготовки была разделена на кинематические модули, прямоугольной, трапециевидальной и прямоугольной, трапециевидальной, а также треугольной формы [10, 12].

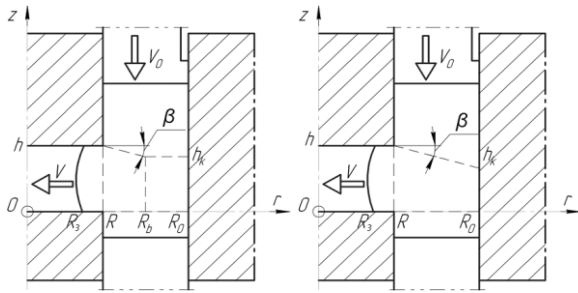


Рис. 2 – Варианты расчётных схем процесса центростремительного радиального выдавливания фланцев

Для трапецидального модуля и комбинации прямоугольного и трапецидального модулей приведенное давление удается определить только численно при помощи ЭВМ. Для трапецидального модуля проводится оптимизация высоты основания трапеции, а для комбинации прямоугольного и трапецидального модулей проводится еще и оптимизация положения границы стыка модулей. Для криволинейного треугольника проводится оптимизация положения вершины треугольника.

Было установлено, что наименьшее значение приведенного давления дает кинематическое поле с формой криволинейного треугольника. А наибольшее значение приведенного давления радиального центростремительного выдавливания характерно для комбинированного поля, составленного из трапецидального и прямоугольного модулей. Снижение приведенного давления для этой расчётной схемы по сравнению с другими расчётными схемами, находится в пределах 20 – 70%.

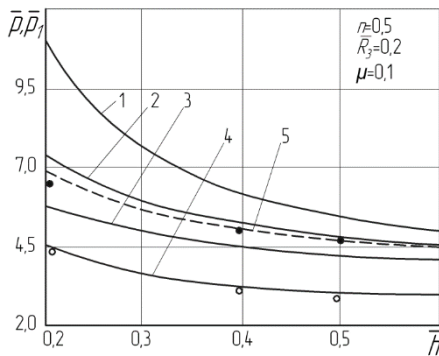


Рис. 3 – Зависимости приведенного давления от геометрических параметров при радиальном выдавливании (1 – комбинированный модуль, 2 – трапецидальный модуль, 3 – прямоугольный модуль, 4 – криволинейный модуль) и при РПВ (5)

Таким образом, криволинейный (параболический) треугольный модуль был выбран как наиболее подходящий для решения задачи радиально-прямого выдавливания с обжатием.

Одна из уточнённых моделей течения металла (см. рис. 1) в процессе РПВ описывается следующими зависимостями для осевых и радиальных компонент

векторов скоростей, соответствующих пластическим зонам 2, 3 и 4:

Таблица 1 – Кинематически возможные поля скоростей

№	КВПС
2	$V_r = -V_0 \frac{R_0^2 - R^2}{2hr}; V_z = -bV_0$
3	$V_r = -V_0 \frac{R_0^2 - R^2}{2hr}; V_z = 0$
4	$V_r = -V_0 \frac{M(r^2 - R_4^2)}{2r \cdot z(r)}; M = \frac{2R_3 \cdot h}{R_3^2 - R_4^2};$ $V_z = -V_0 M + \frac{V_0 M}{z(r)} \left[1 - \frac{r^2 - R_4^2}{2r \cdot z(r)} \cdot \text{tg} \alpha \right] z$

где b – коэффициент оптимизации ($b = 0 \dots 1$).

Скорости, выраженные формулами (см. табл. 1), кинематически возможны, так как они удовлетворяют условию несжимаемости и кинематическим граничным условиям.

С учётом кинематически возможного поля скоростей (КВПС), представленного данными формулами, и условия неразрывности нормальной компоненты скорости получены уравнения параболических и наклонной границ между зонами:

$$1 \text{ и } 2 - z(r) = \left[1 - (1-b) \frac{r^2 - R^2}{R_0^2 - R^2} \right] h_1;$$

$$2 \text{ и } 6 - z(r) = b \frac{r^2 - R^2}{R_0^2 - R^2} h_1;$$

$$4 \text{ и } 8 - z(r) = h_1 + (r - R_4) \cdot \text{tg} \alpha,$$

$$\text{где } \text{tg} \alpha = \frac{h - h_1}{R_3 - R_4}.$$

Для блока А по результатам расчета скоростей относительных линейных деформаций в зонах была определена наибольшая по абсолютной величине скорость $|\dot{\epsilon}_{\max}|$. В результате были установлены линеаризованные зависимости [8, 12] для расчета интенсивности скорости деформации по зонам:

$$2 - \dot{\epsilon}_i = 1,08 \frac{V_0}{2h_1} \frac{R_k^2 - R^2}{r^2};$$

$$3 - \dot{\epsilon}_i = 1,08 \frac{V_0}{2h} \frac{R_0^2 - R_k^2}{r^2}; \tag{1}$$

После определения интенсивности скорости деформации в зонах 2 и 3, разрыва скорости на границе 1-2, 2-6 и вычисления мощностей сил деформирования, среза и сил трения, подставив в уравнение энергетического баланса мощностей все найденные значения мощностей, и сократив на множитель

$\pi \cdot \sigma_s \cdot V_0 \cdot (R_0^2 - R^2)$, получена залежність для визначення приведенного тиску \bar{p}_1 (відносительной удельной сили на пуансоні) при радіальному видавлюванню внутрішнього фланця з безрозмірними (віднесеними до зовнішнього радіуса R_0) геометричними параметрами:

$$\bar{p}_1 = \left[0,54 - 1,08 \frac{1}{D} \ln \frac{1}{n} + 1,08 \ln \frac{n}{R_3} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{1-n}{\bar{h}} + \frac{bn\bar{h}}{D} + \frac{2}{3} \frac{(1+2b^2-2b)\bar{h}(1-n^3)}{D^2} \right] + \frac{4}{\sqrt{3}} \mu \left[\frac{[(1-b)\bar{h} + \bar{H}_1]}{D} + \frac{n\bar{H}_1}{D} + \frac{1}{2} \frac{n - \bar{R}_3}{\bar{h}} \right] \right] \quad (2)$$

де $n = R/R_0 = \bar{R}$ – параметр, характеризуючий товщину стінки трубчастої заготовки; $D = 1 - n^2$.

Формула (2) містить коефіцієнт оптимізації b оптимальні значення якого знайдені з рівняння $\partial \bar{p}_1 / \partial b = 0$ і розраховуються по залежності:

$$b_{opt} = 0,5 + 0,75 \frac{1 - n^2}{1 - n^3} (\mu - 0,5n)$$

При значеннях $n = 0,2 \dots 0,8$ і $\mu = 0,1$ можна використовувати спрощену формулу:

$$b_{opt} = 0,275 + 0,44(n - 0,4)$$

По результатам розрахунків побудовані графіки залежності приведенного тиску \bar{p}_1 від геометричних параметрів та умов трия процесу радіального видавлювання внутрішніх фланців (рис. 4).

Установлено, що на величину приведенного тиску \bar{p}_1 найбільше впливають відносительні товщина фланця \bar{h} , радіус фланця \bar{R}_3 , параметр n , а також умов трия, виражені через коефіцієнт трия μ . З зменшенням товщини стінки трубчастої заготовки найменші значення приведенного тиску характерні для менших значень відносительного геометричного параметра n .

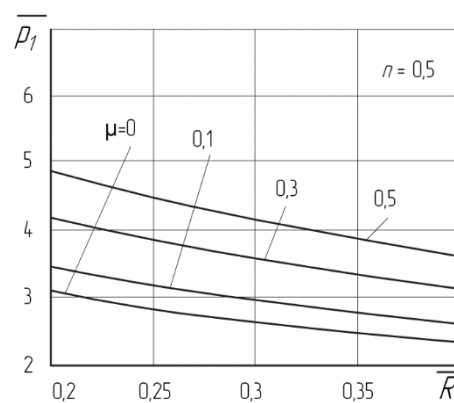
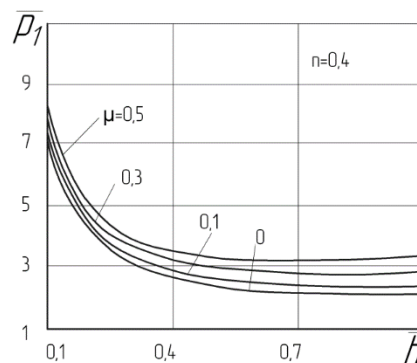


Рис. 4. – Графіки залежності приведенного тиску від параметрів радіального видавлювання ($\bar{H}_1 = 0,3$, $\bar{R}_3 = \bar{R}$).

Зменшення відносительного радіуса фланця \bar{R}_3 і збільшення коефіцієнта трия μ призводить до однозначного збільшення приведенного тиску видавлювання фланця \bar{p}_1 . З збільшенням безрозмірного геометричного параметра \bar{H}_1 , приведенний тиск інтенсивно зростає тільки при значеннях коефіцієнта трия, близьких до найбільшого.

Для другого блоку Б і трапецидального модуля (зона 4), де відбувається розворот течії з радіального на пряме виходячи з прийнятого КВПС (см. табл. 1) розраховані потужності сил деформування, трия і срезу. При входній швидкості V_3 , з рівняння енергетичного балансу при відомій потужності зовнішніх активних сил визначено приведенний тиск деформування \bar{p}_2

$$N_{o2} = (2\pi \cdot R_3 \cdot h \cdot \sigma_s \cdot V_3) \cdot \bar{p}_2,$$

в формі суми складових, враховуючих пластичне деформування модуля 4, а також витрати на срези і трия на його границях:

$$\bar{p}_2 = \Delta \bar{p}_{d4} + \Delta \bar{p}_{c3-4} + \Delta \bar{p}_{ca} + \Delta \bar{p}_{c4-5} + \Delta \bar{p}_{t4-8} \quad (3)$$

Контактним трением в зоне 5 пренебрегаем ввиду малой протяженности поясков инструмента. Интеграл мощности сил деформирования в трапецидальном модуле 4 имеет вид:

$$N_{\partial} = \sigma_s \cdot 2\pi \int_{R_4}^{R_3} r dr \int_0^{z(r)} \dot{\epsilon}_i dz,$$

где $\dot{\epsilon}_i$ – интенсивность скоростей деформации:

$$\dot{\epsilon}_i^2 = \frac{2}{9} \cdot \left[6 \cdot \left(\frac{V_0 \cdot M}{z(r)} \right)^2 \cdot \left(\left(1 - \frac{r^2 - R_4^2}{2 \cdot r \cdot z(r)} \cdot \text{tg} \alpha \right)^2 + \left(\frac{r^2 - R_4^2}{2 \cdot r^2} \right)^2 - \frac{r^2 - R_4^2}{2 \cdot r^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(1 - \frac{r^2 - R_4^2}{2 \cdot r \cdot z(r)} \cdot \text{tg} \alpha \right) \right) + 1.5 \cdot \left(\frac{V_0 \cdot M \cdot \text{tg} \alpha \cdot z}{z_2(r)} \right)^2 \cdot \left(2 - \frac{(r^2 - R_4^2) \cdot (z(r) + 2 \cdot r \cdot \text{tg} \alpha)}{2 \cdot r^2 \cdot z(r)} \right)^2 \right]$$

здесь $M = \frac{2R_3 \cdot h}{R_3^2 - R_4^2}$.

Ввиду значительной погрешности, возникающей при попытке упрощения подынтегрального выражения методом линеаризации интенсивности скоростей деформации в данной зоне, интеграл необходимо было вычислить численно или при помощи нахождения верхней оценки интеграла по Коши-Буняковскому:

$$N_{\partial 4} \leq \sigma_s \cdot \sqrt{V_{\text{обл.4}} \cdot \iiint_{V_4} \dot{\epsilon}_i^2 dV_{\text{обл.4}}},$$

где $V_{\text{обл.4}}$ – объём металла в зоне 4.

$$V_{\text{обл.4}} = 2 \cdot \pi \cdot \left[\text{tg} \alpha \cdot \frac{R_3^3 - R_4^3}{3} - N \cdot \frac{R_3^2 - R_4^2}{2} \right],$$

где $N = R_4 \cdot \text{tg} \alpha - h_1$

Окончательно верхняя оценка мощности сил деформирования и соответствующая доля давления деформирования установлены по зависимостям:

$$N_{\partial 2} = (2\pi \cdot R_3 \cdot h \cdot \sigma_s \cdot V_0) \cdot \frac{2\sqrt{2}}{3 \cdot (R_3^2 - R_4^2)} \sqrt{T \cdot L},$$

$$\Delta \bar{p}_{\partial 2} = \frac{2\sqrt{2}}{3 \cdot (R_3^2 - R_4^2)} \sqrt{T \cdot L}, \quad (4)$$

где $T = \left[\text{tg} \alpha \cdot \frac{R_3^2 - R_4^2}{3} - N \cdot \frac{R_3^2 - R_4^2}{2} \right];$

$$L = \left(A_1 - A_2 + \frac{R_4^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha}{N^3} \cdot A_3 \cdot \ln \left[\frac{R_3}{R_4} \right] + \frac{h_1^2}{N^3} \cdot A_4 \cdot \ln \left[\frac{h}{h_1} \right] + \right. \\ \left. + A_5 + \frac{h_1^2}{N} \cdot \left(\frac{1}{h^2} - \frac{1}{h_1^2} \right) \cdot A_6 \right)$$

$$A_1 = \frac{1.5 + 0.125 \cdot \text{tg}^2 \alpha}{\text{tg} \alpha} \cdot (R_3 - R_4);$$

$$A_2 = \frac{0.375 \cdot \text{tg}^3 \alpha \cdot R_4^4}{N} \cdot \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right);$$

$$A_3 = \left[1.5 \cdot \text{tg} \alpha \cdot R_4 \cdot h_1 - 0.375 \cdot R_4^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha - 0.75 \cdot h_1^2 \right];$$

$$A_4 = \left[1.5 \cdot h_1 \cdot \text{tg} \alpha \cdot R_4 - 0.375 \cdot h_1^2 - 1.5 \cdot R_4^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha \right];$$

$$A_5 = \frac{R_4^4 \cdot (0.75 + 0.0625 \cdot \text{tg}^2 \alpha)}{N} \cdot \left(\frac{1}{R_3^2} - \frac{1}{R_4^2} \right);$$

$$A_6 = \left(\frac{3 \cdot h_1 \cdot R_4}{\text{tg} \alpha} + R_4 \cdot h_1 \cdot \text{tg} \alpha - R_4^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha - 3 \cdot R_4^2 - \right. \\ \left. - 0.25 \cdot h_1^2 - \frac{0.75 \cdot h_1^2}{\text{tg}^2 \alpha} \right)$$

Составляющие приведенного давления выдавливания, учитывающие затраты на срезы и трение рассчитываются по выражениям:

$$\Delta \bar{p}_{c3-4} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{R_3 \cdot h}{(R_3^2 - R_4^2)} + \text{tg} \alpha \right);$$

$$\Delta \bar{p}_{t4-8} = \frac{2R_4 \cdot h_1}{\sqrt{3}(R_3^2 - R_4^2)};$$

$$\Delta \bar{p}_{c4-5} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot (R_3^2 - R_4^2) \cdot \text{tg} \alpha} \cdot \left(\frac{R_3^2 - R_4^2}{2} + B_1 \cdot (R_3 - R_4) + \right. \\ \left. + [B_1^2 - R_4^2] \times B_2 \right)$$

$$B_1 = R_4 - \frac{h_1}{\text{tg} \alpha}, \quad B_2 = \ln \left[\left(1 + \frac{(R_3 - R_4)}{h_1} \cdot \text{tg} \alpha \right) \right];$$

$$\Delta \bar{p}_{c\alpha} = 2 \cdot \mu \cdot (1 + \text{tg}^2 \alpha) \cdot \Delta \bar{p}_{c4-5}.$$

Из графиков зависимости давлений деформирования в блоке прямого выдавливания (рис.5) видно, что получение деталей типа гильз с относительно тонкими стенками требует значительных энергетических затрат. Вместе с тем, имеются оптимальные значения углов наклона стороны трапецидального модуля, по которым можно подготовить геометрию инструмента и вместо затрат на срезы получить значительно меньшие при холодном деформировании расходы сил на контактное трение.

При теоретическом анализе силового режима и выводе расчетных зависимостей для приведенного давления было принято допущение об идеальной пластичности деформируемого материала ($\sigma_s = \text{const}$). Для среднеинтегральной оценки степени деформации используют различные показатели, основанные на соотношении исходных размеров (площадей) с размерами, полученными после выдавливания [2, 7]. Для уточнения величины степени деформации анализируют преобладающий вид деформации в характерных областях заготовки

путем учета особенностей геометрии, схемы течения или неравномерности деформирования.

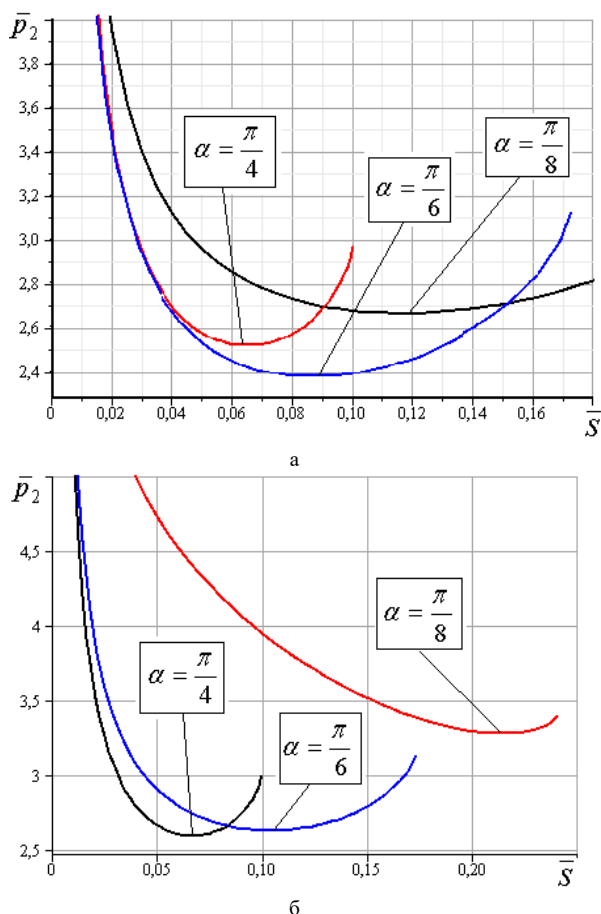


Рис. 5. – Графики зависимости давлений \bar{p}_2 от толщины стенки гильзы $\bar{h} = 0.1$, $\mu = 0.08$: а- $\bar{R}_3 = 0.4$, б- $\bar{R}_3 = 0.325$

Один из методов учета упрочнения материала, предложенный Р. Хиллом [7, 13], основан на определении интенсивности деформации и вычислении истинного значения напряжений с использованием кривых упрочнения или эмпирических зависимостей для используемых материалов. Если допустить, что трение по поверхности контакта достаточно мало влияет на распределение деформаций в очаге деформаций, среднюю интенсивность деформации можно определить, приняв ее равной приведенному давлению всего процесса $\bar{p} = \bar{p}_1 + \bar{p}_2$.



Рис. 6. – Детали, полученные радиально-прямым выдавливанием с обжатием

Были проведены экспериментальные исследования процесса радиального центростремительного и радиально-прямого выдавливания деталей типа втулок с внутренними фланцами и деталей типа гильз (рис. 6) из заготовок (свинец С1 и алюминиевый сплав АД1 и АМцМ) с диаметральными размерами 45x28 мм и высотой 50 мм [13 – 15]. Сравнение расчетных данных по радиальному выдавливанию с полученными экспериментальным путем (на рис. 3 обозначены знаком \circ) произведено для текущей стадии. Для радиально-прямого выдавливания расчетные значения давлений \bar{p} определены для промежуточного этапа при максимальном значении сил деформирования и представлены вместе с результатами экспериментальных исследований на рис. 3 (кривая 5 и опытные точки \bullet ; толщина стенки \bar{s} равна толщине фланца \bar{h}). Установлено, что теоретические решения приблизительно совпадают с экспериментальными данными, при этом погрешность вычислений составляет 10...15%.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность разработанных математических моделей и их приемлемость для выполнения технологических расчетов.

Выводы:

1. Энергетическим методом верхней оценки разработана модель силового режима для процесса комбинированного (последовательного) радиально-прямого выдавливания с обжатием полых изделий из трубчатых заготовок. Использован модульный подход, позволивший рассмотреть процесс последовательного выдавливания поэтапно с отдельным анализом давлений деформирования по очагам деформации радиального центростремительного и прямого выдавливания.

2. Установлено, что поле скоростей, содержащее криволинейные треугольные кинематические элементы, лучше соответствует экспериментально установленной картине деформаций радиального выдавливания и кинематике центростремительного течения и обеспечивает наименьшие верхние оценки давлений выдавливания. При этом уточнение верхних оценок давлений деформирования за счёт их снижения составляет 20÷70%.

3. Экспериментальные оценки адекватности разработанных математических моделей по силовому режиму подтверждают приемлемость математических моделей для технологических расчетов давлений деформирования

Список литературы:

1. Изготовление заготовок и деталей пластическим деформированием / В. М. Авдеев [и др.]; под ред. К. Н. Богоявленского, В. В. Риса – Л.: Политехника, 1991. – 351 с.
2. Евстратов В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В. А. Евстратов. – Харьков: Вища школа, 1987. – 144 с.
3. Алиева Л. И. Перспективы развития процессов точной объемной штамповки выдавливанием / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – № 1 (11). – С. 13–19.
4. Алиева Л. И. Процессы комбинированного деформирования и выдавливания // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 100–108.
5. Джонсон В. Механика процессов выдавливания металла / В. Джонсон, Х. Кудо. – М.: Металлургия, 1966. – 317 с.
6. Алюшин Ю. А. Теоретические основы энергетических методов расчета процессов обработки металлов давлением: учебное пособие / Ю. А. Алюшин, С. А. Еленев. – Ростов н/Д: РИСХМ, 1987. – 106 с.
7. Теорияковки и штамповки / Е. П. Унксов [и др.]; под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1999. – 598 с.
8. Степанский Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением / Л. Г. Степанский. – М.: Машиностроение, 1982. – 217 с.
9. Алиева Л. И. Особенности проектирования процессов холодного выдавливания на основе развития модульного подхода / Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина // Вісник Національного технічного університету «ХП»: зб. наук. пр. – Харків: НТУ «ХП», – 2015 – № 24 (1133). – С. 21–32.
10. Алиева Л. И. Выбор кинематических модулей для определения силовых параметров радиального выдавливания / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – № 3 (5). – С. 108–113.
11. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion / I. Aliiev, L. Aliieva, N. Grudkina, I. Zhbakov // Metallurgical and mining industry. – 2011. – Vol. 3. – № 7. – P. 17–22.
12. Алиева Л. И. Моделирование процесса комбинированного выдавливания фланцев на полых деталях / Л. И. Алиева // Вісник НТУУ «КП». Серія Машинобудування. – 2016. – № 1 (76). – С. 20–30.
13. Aliieva L. Radial-direct extrusion with a movable mandrel / L. Aliieva, Y. Zhbakov // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 11. – P. 175–183.
14. Aliiev I. S. Press tools for the extrusion hollow parts with the complex surface profiles / I. S. Aliiev, L. I. Aliieva, Y. G. Zhbakov // Proceedings of 9th International Conference «Research and Development in Mechanical Industry». – Vrnjacka Banja, 2009. – Volume 1. – P. 113–120.
15. Алиев И. С. Формоизменение при радиально-прямом выдавливании на оправке / И. С. Алиев, Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Обработка металлов давлением: сборник

научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 171–176.

Bibliography (transliterated)

1. Izgotovlenie zagotovok i detalej plasticheskim deformirovaniem [Production of blanks and components plastic deformation]. – Leningrad: Politehnika, 1991. – 351 p.
2. Evstratov V. A. Osnovy tehnologii vydavlivaniya i konstruirovaniya shtampov [Fundamentals of technology of extrusion and die design]. – Kharkov: Vishha shkola, 1987. – 144 p.
3. Aliieva L. I. Perspektivy razvitiya processov tochnoj obemnoj shtampovki vydavlivaniem / L. I. Aliieva, Ja. G. Zhbakov // Visnik Donbas'koi derzhavnoi mashinobudivnoi akademii: zbirnik naukovih prac'. – Kramators'k: DDMA, 2008. – No 1 (11). – P. 13–19.
4. Aliieva L. I. Processy kombinirovannogo deformirovaniya i vydavlivaniya // Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2016. – No 1 (42). – P. 100–108.
5. Dzhonson V. Mehanika processov vydavlivaniya metalla [Mechanics metal extrusion processes]. – Moscow: Metallurgija, 1966. – 317 p.
6. Aljushin Ju. A. Teoreticheskie osnovy jenergeticheskikh metodov rascheta processov obrabotki metallov davleniem: uchebnoe posobie [Theoretical foundations of methods for calculating the energy of metal forming processes: textbook]. – Rostov n/D: RISHM, 1987. – 106 p.
7. Teorija kovki i shtampovki [The theory of forging and stamping]. – Moscow: Mashinostroenie, 1999. – 598 p.
8. Stepan'skij L. G. Raschety processov obrabotki metallov davleniem [Calculation process metal forming]. – Moscow: Mashinostroenie, 1982. – 217 p.
9. Aliieva L. I. Osobennosti proektirovaniya processov holodnogo vydavlivaniya na osnove razvitiya modul'nogo podhoda / L. I. Aliieva, N. S. Grudkina // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI»: zb. nauk. pr. – Kharkiv: NTU «HPI». – 2015 – No 24 (1133). – P. 21–32.
10. Aliieva L. I. Vybory kinematičeskikh modulej dlja opredelenija silovyh parametrov radial'nogo vydavlivaniya / L. I. Aliieva, Ja. G. Zhbakov // Visnik Donbas'koi derzhavnoi mashinobudivnoi akademii: zbirnik naukovih prac'. – Kramators'k: DDMA, 2006. – No 3 (5). – P. 108–113.
11. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion / I. Aliiev, L. Aliieva, N. Grudkina, I. Zhbakov // Metallurgical and mining industry. – 2011. – Vol. 3. – No 7. – P. 17–22.
12. Aliieva L. I. Modelirovanie processa kombinirovannogo vydavlivaniya flancev na polyh detaljah / L. I. Aliieva // Visnik NTUU «KP». Serija Mashinobuduvannja. – 2016. – No 1 (76). – P. 20–30.
13. Aliieva L. Radial-direct extrusion with a movable mandrel / L. Aliieva, Y. Zhbakov // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No 11. – P. 175–183.
14. Aliiev I. S. Press tools for the extrusion hollow parts with the complex surface profiles / I. S. Aliiev, L. I. Aliieva, Y. G. Zhbakov // Proceedings of 9th International Conference «Research and Development in Mechanical Industry». – Vrnjacka Banja, 2009. – Volume 1. – P. 113–120.
15. Aliiev I. S. Formoizmenenie pri radial'no-prjamom vydavlivanii na opravke / I. S. Aliiev, L. I. Aliieva, Ja. G. Zhbakov // Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2008. – No 1 (19). – S. 171–176.

Поступила (received) 24.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Силовой режим формообразования полых деталей при холодном радиально-прямом выдавливании с обжатием / Л. И. Алиева // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 5–12. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2519-2671

Силовой режим формообразования порожнистых деталей при холодному радіально-прямому выдавлюванню з обтисненням / Л. І. Алієва // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 5–12. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2519-2671

Power mode of hollow parts shaping in cold radial-forward extrusion with compression / Aliieva L. I. // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 38 (1210). – P. 5–12. – Bibliogr.: 15 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

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

УДК 621.791

В. В. ДМИТРИК, Т. А. БАРАНОВА, С. А. ЛУЗАН, О. Н. ЛИТВИН, К. В. НОСОВ

**К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВАРОЧНОГО НАГРЕВА
ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Приведены особенности совершенствования математических моделей сварочного нагрева изготавливаемых соединений. Указаны направления совершенствования моделей сопряжённых тепловых задач, реализуемых в законах Навье-Стокса и Фурье. Представлено, что совершенствование моделей сварочного нагрева позволит оптимизировать параметры режима сварки и таким образом обеспечить получение сварных соединений с улучшенными качественными характеристиками их исходной структуры. Сделан анализ использования численных методов в моделях для уточнения особенностей физических процессов, протекающих в высокотемпературной зоне сварки. Это позволит повысить точность аппроксимации и устойчивость реализации решения тепловых задач. Обосновано, что учёт результатов анализа позволит усовершенствовать численный метод, который обеспечивает получение более точных значений температур в области расплавленного металла ванны, кристаллизующегося металла шва и зоны термического влияния.

Ключевые слова: уравнение Навье-Стокса, уравнение Фурье, математическая модель, температурный режим, численные методы, сварные соединения.

Приведені особливості вдосконалення математичних моделей зварювального нагріву виготовляємих з'єднань. Вказані напрямки вдосконалення моделей сполучених теплових задач, що реалізуються в законах Нав'є-Стокса і Фур'є. Показано, що удосконалення моделей зварювального нагрівання дозволить оптимізувати параметри режиму зварювання у таким чином забезпечити отримання зварних з'єднань з покращеними якісними характеристиками їх вихідної структури. Зроблено аналіз використання чисельних методів в моделях для уточнення особливостей фізичних процесів, що протікають у високотемпературній зоні зварювання. Це дозволить підвищити точність апроксимації і стійкість реалізації рішення теплових завдань. Обґрунтовано, що врахування результатів аналізу дозволить удосконалити чисельний метод, який забезпечує набуття точніших значень температур в області розплавленого металу ванни, металу шва, що кристалізується, і зони термічного впливу.

Ключові слова: рівняння Нав'є-Стокса, рівняння Фур'є, математична модель, температурний режим, чисельні методи, зварні з'єднання.

Features of improving the mathematical models of welding heat produced joints are given. Ways of improving the thermal models conjugate tasks implemented in the laws of the Navier-Stokes equations and Fourier are shown. It is presented that the improvement of the welding heat models allow to optimize welding parameters and ensure obtaining welded joints with improved quality characteristics of the original structure. The analysis of use of numerical methods in models for specification of features of the physical processes proceeding in a high-temperature zone of welding is made. It will allow to increase the accuracy of approximation and stability of implementation of the solution of thermal tasks. It is proved that the accounting of results of the analysis will allow to improve a numerical method which provides more exact values of temperatures in the field of the melted metal of a bathtub, the crystallizing metal of a seam and a zone of thermal influence. Improvement of mathematical model by the accounting of physical processes which happen in molten metal of a welding bathtub allowed to specify distribution of temperatures in a welded joint. Studying of fields of temperatures in molten metal of a welding bathtub allowed to reveal the liquid-solid interface, and also to define a temperature schedule of process of a crystallization. Thus, established conditions of formation of structure in the field of the crystallizing metal of a seam and on sites of a zone of thermal influence.

Keywords: Navier-Stokes equations, Fourier equation, mathematical model, temperature control, numerical methods, welded joints.

Введение. Уточнение оценки температурных полей в изготавливаемых соединениях позволяет оптимизировать тепловложения в основной металл путём уточнения параметров режима сварки. На основе полученных данных представляется возможным обеспечивать условия для формирования структуры сварных соединений с улучшенными качественными характеристиками. Это обеспечивает удовлетворение растущих эксплуатационных требований.

Постановка проблемы. Для уточнения оценки температурных полей целесообразно совершенствовать структуру математических моделей сварочного нагрева изготавливаемых соединений. Например, при сварке комбинированного ротора из разнородных сталей 25X2НМФА и 20X3МВФА оптимизированный сварочный нагрев на участке сплавления зоны термического влияния (ЗТВ) позволяет снизить интенсивность диффузного перемещения атомов молибдена, ванадия и вольфрама из α-фазы, что

приводит к уменьшению степени её легирования и образованию карбидов 2-й группы.

Модели тепловых задач процессов дуговой сварки на сегодняшней стадии их развития представляются как сопряжённые [1–8]. Их решение для жидкой фазы (расплав сварочной ванны) выполняется в условиях уравнений задачи Навье-Стокса, и для твёрдой фазы (ЗТВ и основной металл) в условиях закона Фурье.

Математическая постановка задачи:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \Delta p + \vec{f},$$

$$\nabla \vec{v} = 0.$$

где: ∇ – оператор Набла,

Δ – оператор Лапласа,

t – время,

ν – коэффициент кинематической вязкости,

ρ – плотность,

p – давление,

$\nabla \vec{v} = (\vec{v}^1, \dots, \vec{v}^n)$ – векторное поле скоростей,

\vec{f} - векторное поле массовых сил.

Неизвестные p и v являются функциями времени t и координаты $x \in \Omega$, где $\Omega \subset R^n$, $n = 2, 3$ – плоская или трёхмерная область, в которой движется жидкость. Обычно в систему уравнений Навье-Стокса добавляют краевые и начальные условия, например:

$$\nabla \vec{v} \Big|_{\partial \Omega} = 0$$

$$\nabla \vec{v} \Big|_{t=0} = 0.$$

Эта система уравнений Навье-Стокса должна решаться при нулевых значениях вектора скорости на стенках ванны совместно с уравнением теплопроводности для определения температуры в жидкой и в твёрдой фазах.

В жидкой фазе:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = (\vec{v} \cdot \nabla T)\vec{v} + a\Delta T$$

В твердой фазе:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = a\Delta T$$

На наш взгляд, имеет смысл рассматривать решения задач Навье-Стокса применительно к известным процессам движения вязкой жидкости для выявления общих особенностей их использования в сварочных задачах.

Известно, что распределение полей скоростей потоков жидкого металла ванны оказывает влияние на геометрию самой ванны, а также на формирование микроструктуры и, соответственно, на свойства металла шва и участков ЗТВ.

В работе [2] изучали влияние теплопередачи на потоки жидкого металла в расплаве ванны, считая такие потоки как ламинарное течение, индуцированное только электромагнитными силами в стационарной полусферической области заданных размеров. В [4] сформулирована математическая модель полей нестационарного течения жидкого металла и температур под воздействием пространственно-распределённого поверхностного теплового потока на поверхности пластины применительно к сварке вольфрамовым электродом в среде аргона. Учитывались электромагнитные силы, силы поверхностного натяжения и выталкивающие силы. Полученные уравнения были решены численно.

Литературный обзор. Проблемы существования, единственности и устойчивости (корректность) краевых задач для уравнений Навье-

Стокса к настоящему времени не являются вполне разрешимыми. В основном, убедительные результаты получены для плоских задач, более обстоятельно изучены течения в замкнутых объёмах (без наличия свободной поверхности). Математически строго обоснованы линейаризованные задачи в [9–11], где доказывают существование и единственность решений для всех $t > t_0$ в некотором определенном функциональном классе обобщённых решений, т.е. таких решений, которые удовлетворяют дифференциальные уравнения в среднем [12–16].

Для общего трёхмерного случая однозначная разрешаемость некоторых краевых задач установлена лишь для малых интервалов времени $t_0 < t < t_0 + \tau$. Величина τ сложным образом связана с данными задач. Вопрос о разрешимости трёхмерных задач в целом при всех $t > t_0$ в настоящее время является открытым.

Для областей с подвижной границей результатов исследований опубликовано мало, и этот раздел теории движения вязкой жидкой среды (в том числе расплавленного металла ванны) следует считать лишь начинающим своё развитие.

Точных аналитических решений уравнений Навье-Стокса также очень мало. Их обзор представлен в работах [12, 14–15, 17–18]. Для получения таких решений используют асимптотические разложения, например, по числам Рейнольдса, либо привлекают групповые методы (теория групп Ли). В несколько большей степени изучены автомодельные решения данных задач. Большое количество работ посвящено получению численных результатов [11, 14, 17–18]. Отправным пунктом здесь следует считать линейаризованные (чаще всего стационарные) постановки полных уравнений.

При численных исследованиях основными являются сеточные методы: метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР), проекционные методы (Бубнова-Галёркина, Ритца и др.), методы интегральных уравнений [11, 16–18]. В численном анализе деление первых трёх методов является чисто условным. Они отличаются лишь специальным выбором базисных функций. Сеточные методы (в условиях сварочного нагрева изготавливаемых соединений) с недостаточной точностью аппроксимируют границы, в особенности свободные поверхности, которые не являются обязательно гладкими, а криволинейными. От этого недостатка в некоторой степени свободен МКЭ.

Общим недостатком МКР и МКЭ следует считать большие размерности систем алгебраических уравнений, (как правило

нелинейных), что обеспечивает вероятность допущения погрешностей.

Основная часть. Процессы, происходящие при электродуговой сварке в расплаве ванны, представляют весьма сложный характер. А именно, взаимодействуют между собой гидродинамические, упругие, температурные и электромагнитные поля. Для описания процессов, происходящих в сварочной ванне, необходимо совместно решить нелинейную систему уравнений магнитной гидродинамики движения вязкой жидкости, систему уравнений Максвелла распределения векторов напряжённости электрической E и магнитной B составляющих электромагнитных полей.

Вне сварочной ванны необходимо решать нелинейное уравнение теплопроводности относительно температуры T , которое непосредственно сопряжено с решениями относительно переменных $\{\varphi_i\}$. $\vec{V} = \{\omega, v, w\}$, P, T , где \vec{V} – скорость, P – давление. Таким образом, формулируется задача о фазовых переходах со свободной границей, представленная как задача Стефана [10].

При дуговой сварке плавящимся электродом в смеси защитных газов CO_2 и Ar расплавленный металл в виде мелких капель перемещается через дугу в сварочную ванну. Посредством такого струйного переноса капель расплавленного металла в сварочную ванну передаётся определённое количество тепла. Теплосодержание капли можно выразить формулой [5]

$$H_d = \int_{T_0}^{T_{ml}} \rho_1 C_l(T) dT + H_f + \int_{T_{ml}}^{T_g} \rho_2 C_d(T) dT + H_v$$

где: H_f – теплота плавления электродной проволоки,

H_d – теплосодержание капли расплавленного металла,

H_v – теплосодержание сварочной ванны,

ρ_1 – плотность металла электродной проволоки

ρ_2 – плотность капли электродного металла,

$C_l(T)$ – удельная теплоёмкость электродной проволоки,

$C_d(T)$ – удельная теплоёмкость расплавленной капли,

T_0 – начальная температура электродной проволоки.

T_{ml} – температура плавления электродной проволоки.

T_g – средняя температура капли расплавленного металла.

H_v – теплосодержание сварочной ванны.

Таким образом, капля переносит определённое количество тепла в сварочную ванну

$$Q_k = H_d - H_v.$$

Поскольку капля имеет более высокое теплосодержание, чем сварочная ванна, а струйный перенос также имеет место в осевом направлении вдоль электродной проволоки, избыточное тепло будет рассеиваться в сварочной ванне сразу после вступления капли в контакт с расплавленным металлом сварочной ванны. Так как рассеивание капель зависит от ряда факторов, то естественно предположить, что Q_k имеет гауссово распределение

$$Q_k = f \cdot (H_d - H_v) e^{-C_l r^2}$$

где f – частота струйного переноса, выраженная в каплях в единицу времени,

C_l – параметр распределения капель металла относительно оси.

Q_k можно теоретически рассчитать, однако для того, чтобы расчётные результаты определения Q_k имели практическое применение, их следует согласовывать с экспериментальными результатами.

В расчётах температурного режима в сварных соединениях на наш взгляд следует использовать схему Галеркина (она в некоторых случаях для дуговой сварки совпадает с методом Ритца [10–16]). При этом можно строить базисные функции по пространственным переменным, а движение по времени учитывать привлечением метода Рунге, т.е. путём дискретизации по времени [13–14]. Этот метод позволяет свести систему нестационарных уравнений Навье-Стокса к системе стационарных уравнений Навье-Стокса. Решение последней системы следует производить итерационным путём, в котором $k+1$ приближение использует k -е приближение в качестве исходного. В результате такого подхода достигается значительный выигрыш во времени счёта. Матрица системы линейных (нелинейных) уравнений формируется только один раз для всех $t > t_0$ и сохраняется на протяжении всего процесса вычислений.

При построении схем МКЭ возникает задача выбора системы базисных функций, с помощью которых строится приближенное решение. В работах многих авторов предложено большое количество различных систем базисных функций, большинство из которых представляют собой кусочно-полиномиальные интерполянты, обеспечивающие нужный класс дифференцируемости искомого приближенного

решения и согласованности этого решения с граничными условиями исходной задачи (см., например, классические обзоры). Из свойств приближенного решения вытекает другое из его важнейших свойств – порядок сходимости приближенного решения к точному в той или иной норме при дроблении сетки. Несмотря на разнообразие схем МКЭ для эллиптических задач с частными производными, практическое получение приближенного решения с высокой точностью встречается серьезные препятствия в связи со стремительным ростом вычислительных затрат и накоплением погрешностей округления при увеличении степеней свободы и увеличении степени используемых интерполянтов. Поэтому разработка вычислительных МКЭ, которые при заданном и, как правило, небольшом числе степеней свободы обеспечивают минимальную ошибку, остается вполне актуальной задачей.

Проведенный анализ схем МКЭ показывает, что используемые системы базисных функций учитывают только некоторые свойства краевой задачи (упомянутые свойства принадлежности приближенного решения определенному классу гладкости, согласованность с граничными условиями задачи) и мало связана со свойствами дифференциального оператора задачи. Учет этих последних свойств дает один из плодотворных подходов к решению этой проблемы.

Выбирая систему базисных функций $\{\varphi_i\}$ в виде сплайнов (классический метод Галеркина), проектируем полученное разложение решений на n -мерное подпространство. При этом значительно уменьшается время для вычисления всех интегралов, которые входят в матрицу системы линейных уравнений Навье-Стокса. При оптимальном подборе первоначальных базисных функций (с учетом экспериментальных данных) достаточно точные результаты можно получить уже на первых нескольких членах разложения. Такой подбор можно осуществить, используя оптимальный метод конечных элементов, разработанный в работах О. Н. Литвина, Т. А. Барановой и К. В. Носова [19–21] для решения линейных краевых задач.

В результате численной реализации описанных выше методов были получены изотермы на первом итерационном шаге по времени [22]. Количество координатных функций принималось равным 10, что оказалось достаточным для расчёта температурного режима с погрешностью $\varepsilon = 10^{-4}$. С увеличением числа координатных функций нарастало накопление погрешностей при решении системы линейных уравнений, что затрудняло достижение заданной точности.

Было замечено значительное увеличение точности аппроксимации при использовании базисных функций, основанных на

экспериментальных данных, а также при определенном повышении числа координатных функций и их корректировке в процессе решения нестационарной тепловой задачи [22].

При определении характера потока (ламинарный или турбулентный) пользовались критериями Рейнольдса $Re = \gamma V L_B / \mu$, хотя конкретное числовое значение, определяющее смену характера потока, должно зависеть от геометрии потока. Здесь V – скорость движения потоков. Если V – максимальная скорость потоков, L_B – длина ванны, μ – динамическая вязкость, равная $0.0006 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ ($6 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$), то число Re будет находиться в пределах 2000–3000. На наш взгляд, ламинарное течение является лишь первым приближением.

В расплаве ванны применительно к сварке на средних режимах можно выделить главный поток жидкого металла, симметричный относительно донного участка ванны, перемещающийся со скоростью $1.5\text{--}1.7 V_{св}$ из головной её части в хвостовую. При увеличении тока более 320 А наблюдали изменение формы главного потока [1].

Полученные данные согласуются с результатами экспериментов [23]. Установили, что при сварке на средних режимах основной поток жидкого металла переносит из головной в хвостовую часть ванны около 5–7% теплоты дуги, введенной в основной металл и расходуемой на перегрев расплава ванны и ЗТВ.

Переносимая потоками теплота в совокупности с теплосодержанием расплава ванны обеспечивает также дополнительное проплавление кромок основного металла, что подтверждает результаты экспериментов [1–4]. Можно предположить, что роль поверхностного натяжения в основном оказывает воздействие на средний участок расплава ванны, находящийся на её поверхности.

Изучая поля температур расплава ванны на стадии её охлаждения, определяли границу раздела между жидкой и твердой фазами, а также температурный режим процесса кристаллизации, что позволило выявить условия формирования структуры металла шва [1–5]. К основному металлу, а также к металлу шва, как к образовавшейся после первичной кристаллизации твердой фазе, для определения соответствующего температурного режима применяли итерации данного проекционного метода в условиях теплопроводности Фурье. Изучение температурных полей сварных соединений на различных временных интервалах, характеризующих стадию охлаждения, позволило определить условия формирования структуры металла шва и ЗТВ [22].

Выводы. Усовершенствование численного метода определения температурного режима в изготавливаемых сварных соединениях позволит

повысить точность аппроксимации, устойчивость и экономичность реализации тепловой задачи.

Реализация усовершенствованного численного метода обеспечит получение расчетных данных значений температур, используемых как основу практического подбора соответствующих параметров режимов сварки для получения оптимальной исходной структуры сварных соединений из теплоустойчивых мартенситных и перлитных сталей.

Список литературы

1. *Дмитрик В.В.* Метод определения температурного режима в расплаве сварочной ванны. //Сварочное производство. 1998. № 8. С. 19–21.
2. *Tsai N.S., Eagar N.W.* Distribution of the heat and current fluxes in gas tungsten arcs // Metallurgical Transaction. – 1985. – №12 – P. 841–846.
3. *Nishiguchi R.* The Fundamentals and Recent Development in the Field of Arc and Plasma Welding Processes //Osaka University, 1982, № 1. 39 p.
4. *Oreper G.M., Szerely J.* Heat and fluid–flow phenomena in weld pools. //Journal Fluid Mechanik. –1984. – Vol.147. №3. P.70–75
5. *Bu K.C. Tsao and Wu C.S.* Fluid Flow and Heat Transfer in GMA Weld Pools // Welding Research Supplement. –1988 – Vol.67. № 3 – P.70–75.
6. *MasuyamaFujimitsu.* Life assessment and extension of welded structures for high temperature components. // Weld. World. – 1993. Vol.32. № 3 – P.51–64.
7. *Sakuma Atsutshi, Inone Tatsuo.* Nihon kikaigakkaironbushu // Trans. Jap. Soc. Mech. End. – 1996. Vol.62. № 596 – P.1032–1037.
8. Modelacion del proceso de transferencia de calondurante la soldadura // Constr. Mag. – 1993. – Vol.18. № 3 – P.18–23.
9. *Маренков А.П., Хасилев В.Я.* Теория гидравлических цепей.
10. *Мейрманов А.М.* Задача Стефана. – Новосибирск.: Наука, 1967. – 457 с.
11. *Флетчер К.* Численные методы на основе метода Галёркина. — М. Мир, 1988. – 352 с.
12. *Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М.* Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1972. – 390 с.
13. *Белюсов Е.Г., Аноронов В.Г.* Разрешаемость и устойчивость задач полиноминого программирования. М.: Изд–во Московского университета, 1993. 368 с.
14. *Ладыженская О.А.* Математические вопросы динамики несжимаемой жидкости. – М.: Наука, 1987. – 288 с.
15. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. – 834 с.
16. *Гузь А.Н., Немши Ю. Н.* Метод возмущения формы границы в механике сплошных сред. – Киев.: Вища школа, 1989. – 352 с.
17. *Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырный П.И.* Начало теории вычислительных методов. Дифференциальные уравнения. – Минск.: Наука и техника, 1982. – 285 с.
18. *Арфкен Г.* Математические методы в физике. – М.Атомиздат, 1980. – 711 с.
19. *Литвин О.Н.* Оптимальные координатные функции в методе конечных элементов // Дифференциальные уравнения. 1984. — Т. 20, № 4. – С. 677–688.
20. *Литвин О.Н.* Оптимальные схемы МКЭ. // Теоретические и прикладные вопросы дифференциальных уравнений и алгебра. Киев, 1978. С. 160–165.
21. *Баранова Т.А., Литвин О.М., Носов К.В.* Выбор оптимальных координатных функций в методі скінчених елементів для еліптичних крайових задач. // Вісник НТУ «ХПІ» 42'2011.
22. *Дмитрик В.В., Соболев О.В., Погребной М.А. и др.* Структура и свойства комбинированного сварного соединения ротора паровой турбины. //Энергетика и электрификация. 2015. – № 5. – С. 12–18.
23. Авторское свидетельство. Способ определения направления движения потоков жидкого металла из головной в

хвостовую часть сварочной ванны. А.с. № 1776524 СССР, МКИ В23К 31/12 / Акулов А.И., Дмитрик В.В., Бабушкина В.А. (СССР) № 486879/08; заявл. 05.03.1990; опубл. 23.11.1992, бюл. № 43. 3 с.

Bibliography (transliterated)

1. *Dmitrik V.V.* Metod opredeleniya temperaturnogo rezhima v rasplave svarochnoj vanny. //Svarochnoe proizvodstvo. 1998. No 8.P. 19-21
2. *Tsai N.S., Eagar N.W.* Distribution of the heat and current fluxes in gas tungsten arcs // Metallurgical Transaction. – 1985. – No12 – P.841–846.
3. *Nishiguchi R.* The Fundamentals and Recent Development in the Field of Arc and Plasma Welding Processes //Osaka University, 1982, No 1. 39p.
4. *Oreper G.M., Szerely J.* Heat and fluid-flow phenomena in weld pools. //Journal Fluid Mechanik. -1984. – Vol.147. No3. P.70–75
5. *Bu K.C. Tsao and Wu C.S.* Fluid Flow and Heat Transfer in GMA Weld Pools // Welding Research Supplement. -1988 – Vol.67. No 3 – P.70–75
6. *MasuyamaFujimitsu.* Life assessment and extension of welded structures for high temperature components. // Weld. World. – 1993. Vol.32. No 3 – P.51–64.
7. *Sakuma Atsutshi, Inone Tatsuo.* Nihon kikaigakkaironbushu // Trans. Jap. Soc. Mech. End. – 1996. Vol.62. No 596 – P.1032–1037.
8. Modelacion del proceso de transferencia de calondurante la soldadura // Constr. Mag. – 1993. – Vol.18. No 3 – P.18–23/
9. *Marenkov A.P., Hasilev V.YA.* Teoriya gidravlicheskih cepej.
10. *Mejрманов А.М.* ZadachaStefana. – Novosibirsk.: Nauka, 1967. – 457 p.
11. *Fletcher K.* CHislennye metody na osnove metoda Galyorkina. – Moscow : Mir, 1988. – 352 s.
12. *Gershuni G.Z., ZHuhovickij E.M.* Konvektivnaya ustojchivost' neszhimaemoj zhidkosti. – Moscow : Nauka, 1972. – 390 p.
13. *Belousov E.G., Andronov V.G.* Razreshaemost' i ustojchivost' zadach polinomnogo programmirovaniya. Moscow : Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1993. 368 p.
14. *Ladyzhenskaya O.A.* Matematicheskie voprosy dinamiki neszhimaemoj zhidkosti. – Moscow : Nauka, 1987. – 288 p.
15. *Lojcyanskij L.G.* Mekhanikazhidkosti i gaza. – Moscow : Nauka, 1987. – 834 p.
16. *Guz' A.N., Nemish YU. N.* Metod vozmushcheniya formy granicy v mekhanike sploshnyh sred. – Kiev.: Vishchashkola, 1989. – 352 p.
17. *Krylov V.I., Bobkov V.V., Monastyrnyj P.I.* Nachalo teorii vychislitel'nyh metodov. Differencial'nye uravneniya. – Minsk.: Nauka i tekhnika, 1982. – 285 p.
18. *Arfken G.* Matematicheskie metody v fizike. – Moscow : Atomizdat, 1980. – 711 p
19. *Litvin O.N.* Optimal'nye koordinatnye funkicii v metode konechnykh ehlementov // Differencial'nye uravneniya. 1984. — Vol. 20, No 4. — P.677–688.
20. *Litvin O.N.* Optimal'nye skhemy MKEH. // Teoreticheskie i prikladnye voprosy differencial'nyh uravnenij i algebra. Kiev, 1978. P.160–165.
21. *Baranova T.A., Litvin O.M., Nosov K.V..* Vibor optimal'nyh koordinatnyh funkcij v metodi skinchenih elementiv dlya eliptichnih krajovih zadach. // Visnik NTU «HPI» 42'2011
22. *Dmitrik V.V., Sobol O.V., Pogrebnoy M.A. i dr.* Struktura i svoystva kombinirovannogo svarnogo soedineniya rotora parovoy turbiny. //Energetika i elektrifikatsiya. 2015. – No 5. P.12–18
23. *Avtorskoe svidetelstvo.* Sposob opredeleniya napravleniya dvizheniya potokov zhidkogo metalla iz golovnoy v hvostovuyu chast svarochnoj vannyi. A.s. No 1776524 SSSR, MКИ V23K 31/12 / Akulov A.I., Dmitrik V.V., Babushkina V.A. (SSSR) No 486879/08; yayavl. 05.03.1990; opubl. 23.11.1992, byul. No 43. 3 p.

Поступила (received) 22.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

К совершенствованию моделирования сварочного нагрева изготавливаемых соединений / В. В. Дмитрик, Т. А. Баранова, С. А. Лузан, О. Н. Литвин, К. В. Носов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 13–18. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2519-2671

До вдосконалення моделювання зварювального нагріву виготовляємих з'єднань / В. В. Дмитрик, Т. А. Баранова, С. А. Лузан, О. М. Литвин, К. В. Носов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 13–18. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2519-2671

To improve the simulation of heat welding manufactured joints / V. Dmytryk, T. Baranova, S. Luzan, O. Litvin, K. Nosov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 38 (1210). – P. 13–18. – Bibliogr.: 23 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дмитрик В. В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри сварки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 61002, Харків, ул. Фрунзе, 21, тел. 0960410637 Svarka126@ukr.net

Дмитрик В. В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри зварювання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, тел. 0960410637 Svarka126@ukr.net

Dmytryk V. V. – Doctor of Engineering, professor, the head of the department of welding of National technical university "Kharkiv Polytechnical Institute", 61002, Kharkiv, st. of Frunze, 21, ph. 0960410637 Svarka126@ukr.net

Баранова Т. А. – асистент кафедри вищої математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 61002, Харків, ул. Фрунзе, 21, тел. 0688921427 Tbaranova31@mail.ru

Баранова Т. А. – асистент кафедри вищої математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, тел. 0688921427 Tbaranova31@mail.ru

Baranova T. A. – assistant to department of the higher mathematics of National technical university "Kharkiv Polytechnical Institute", 61002, Kharkiv, st. of Frunze, 21, ph. 0688921427 Tbaranova31@mail.ru

Лузан С. А. – доктор технічних наук, професор Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка, 61002, Харків, ул. Артема, 44, тел. 0985176309

Лузан С. А. – доктор технічних наук, професор Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка, 61002, Харків, вул. Артема, 44, тел. 0985176309

Luzan S. A. – Doctor of Engineering, professor of the Kharkiv national technical university of agriculture of Pyotr Vasilenk, 61002, Kharkiv, st. of Artyom, 44, ph. 0985176309

Литвин О. Н. – доктор фізико-математических наук, завідувач кафедри вищої та прикладної математики Української інженерно-педагогічної академії, 61003, Харків, ул. Университетская, 16, тел. 0661359633 Academ.mail@ukr.net

Литвин О. М. – доктор фізико-математических наук, завідувач кафедри вищої та прикладної математики Української інженерно-педагогічної академії, 61003, Харків, вул. Университетська, 16, тел. 0661359633 Academ.mail@ukr.net

Litvin O. N. – the doctor of physical and mathematical sciences, the head of the department of the higher and applied mathematics of the Ukrainian engineering and pedagogical academy, 61003, Kharkiv, Universitetskaya St., 16, ph. 0661359633 Academ.mail@ukr.net

Носов К. В. – кандидат фізико-математических наук, научный сотрудник Харьковского национального государственного университета им. Каразина, 61022, Харьков, пл. Свободы, 4, тел. 0984314063

Носов К. В. – кандидат фізико-математических наук, науковий співробітник Харківського національного державного університету ім. Каразіна, 61022, Харків, пл. Свободи, 4, тел. 0984314063

Nosov K. V. – candidate of physical and mathematical sciences, research associate of the Kharkiv national state university of Karazin, 61022, Kharkiv, Svobody Square, 4, ph. 0984314063

УДК 621.438.002.2

Н. К. ЗЛОЧЕВСЬКА, А. В. ТІТОВ

**ФОРМУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ТА СТРУКТУРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВУ 1420
В УМОВАХ ВЕЛИКИХ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ЗСУВУ**

В результаті великих пластичних деформацій зсуву розміри структурних елементів зменшується і досягають значень, характерних для нанокристалічних і субмікроструктурних матеріалів. Внаслідок цього метали здобувають якісно нові властивості. Зокрема, вони мають високу (на 20-40% більше) міцність в поєднанні з великою пластичністю. Керування формою гвинтового каналу може забезпечити рівномірність механічних властивостей матеріалу заготовки. В якості процесу формування властивостей матеріалу заготовок обраний процес рівноканального гвинтового уширяючого пресування, оснований на принципах гвинтової екструзії з використанням матриці, еліптичної форми перерізу. Для проведення експерименту була використана комп'ютеризована установка, яка монтується на гідравлічний прес. Встановлені закономірності формування структурних властивостей сплаву 1420 шляхом деформування в ізотермічних умовах. На основі експериментального формоутворення методом гвинтового уширяючого пресування та металографічних дослідів встановлений взаємозв'язок між ступеню інтенсивності деформацій та морфологією структури матеріалу, а також його механічними властивостями. Обґрунтовано підвищення пластичності за рахунок подрібнення структурних компонентів матеріалу. Результати показують, що після деформування величини характеристики міцності підвищуються. Так, після першого проходу їх значення підвищуються по відношенню до вихідного металу на 15-18%, а після повторної обробки – на 19-24%.

Ключові слова: гвинтове уширяюче пресування, інтенсивна пластична деформація, структурні та механічні властивості, ізотермічне пресування.

В результате больших пластических деформаций сдвига размеры структурных элементов уменьшается и достигают значений, характерных для нанокристаллических и субмикроструктурных материалов. В результате металлы получают качественно новые свойства. В частности, они имеют высокую (на 20-40% больше) прочность в сочетании с большой пластичностью. Управление формой винтового канала может обеспечить равномерность механических свойств материала заготовки. В качестве процесса формирования свойств материала заготовок выбран процесс равноканального винтового уширяющего прессования, основанный на принципах винтовой экструзии с использованием матрицы, эллиптической формы сечения. Для проведения эксперимента была использована компьютеризированная установка, которая монтируется на гидравлический пресс. Установлены закономерности формирования структурных свойств путем деформирования сплава 1420 в изотермических условиях. На основе экспериментального формообразования методом винтового уширяющего прессования и металлографического исследования установлена взаимосвязь между степенью интенсивности деформаций и морфологией структуры материала, а также его механическими свойствами. Обосновано повышение пластичности за счет измельчения структурных компонентов материала. Результаты показывают, что после деформирования величины характеристик прочности повышаются. Так, после первого прохода их значения повышаются по отношению к исходному металлу на 15-18%, а после повторной обработки – на 19-24%.

Ключевые слова: винтовое уширяющее прессование, интенсивная пластическая деформация, структурные и механические свойства, изотермическое прессование.

As a result, large plastic deformations the shear size of the structural elements decreases and reaches values characteristic of nanocrystalline submicrocrystalline and structural materials. As a result, the metals obtained qualitatively new properties. In particular, they have a high (20-40% higher) strength combined with high ductility. screw channel form of management can ensure the uniformity of the mechanical properties of the workpiece material. As the process of formation properties of the material blanks selected process ravnokanalnogo broadening screw compression based on the principles of a screw extrusion using a matrix, an elliptical cross-sectional shape. computerized installation, which is mounted on a hydraulic press was used for the experiment. The regularities of formation of the structural properties were determined by deformation in isothermal conditions. The relationship between deformation intensity, structure of material and his mechanical properties was established on the base of experimental forming by the method of helical forging of workpieces, on the base of finite element modeling and metallographic investigation. It was grounded that the plasticity increases at the cost of the refinement of structure components of material. Results show that after deformation values increased strength characteristics. Thus, after the first pass, the values are increased with respect to the parent metal by 15-18%, and after re-treatment – by 19-24%.

Keywords: helical extending extru, severe plastic deformation, structural and mechanical properties, isothermal pressing.

Вступ. Перспективність підвищення механічних властивостей металів легуванням, як це показано в роботах академіка Фрідляндера І.Н., в останні роки знижується. Так, за останні 40-50 років питома міцність конструкційних алюмінієвих сплавів збільшилася в 1,5-2 рази, а за прогнозом на найближчі роки, може збільшитися тільки на 8-20% [1]. При цьому значення питомого модуля пружності практично не змінюється. Така тенденція зберігається і для інших сплавів. Тому в середині минулого століття активно почали розвиватися альтернативні напрями підвищення механічних властивостей металів і сплавів шляхом формування дрібнокристалічної структури пластичним деформуванням в умовах великих пластичних деформацій зсувом.

Серед методів обробки металів, що створюють великі деформації зсуву в осередку деформацій при

зберіганні поперечного перерізу заготовки, найбільш поширеними, є рівноканальне кутове пресування [2, 3] та гвинтова екструзія [4]. В результаті великих пластичних деформацій зсуву розміри структурних елементів зменшується і досягають значень, характерних для нано- і субмікроструктурних матеріалів. Внаслідок цього метали здобувають якісно нові властивості. Зокрема, вони мають високу (на 20-40% більше) міцність в поєднанні з великою пластичністю. Однак по ефективності впливу на структуру металу та продуктивності процесу більш перспективним є – метод гвинтової екструзії [5-8]. Керування формою гвинтового каналу може забезпечити рівномірність механічних властивостей матеріалу заготовки. В якості процесу формування властивостей матеріалу заготовок обраний процес рівноканального гвинтового уширяючого пресування (ГУП),

оснований на принципах гвинтової екструзії з використанням матриці, еліптичної форми перерізу запропонованої авторами [9].

Метою роботи є встановлення закономірностей формування властивостей сплаву 1420 в ізотермічних умовах при гвинтовому уширюючому пресуванні.

Матеріали та методика експерименту. Для проведення експерименту була використана комп'ютеризована установка, яка монтується на гідравлічний прес ПД 476.

Вихідні зразки механічно обробляли до розмірів: діаметр 29,5 мм і висота 50 мм. Матеріал випробовуваних зразків: алюмінієво-літєвий сплав – 1420. Перед деформуванням заготовки нагрівали в печі типу СНОЛ 7,2 / 1000 до відповідної температури деформування. Пресування заготовок виконувалось за методикою робіт [10, 11, 12].

Постановка та результати дослідження та їх аналіз. Діаграма навантаження заготовок при пресуванні показана на рис. 1.

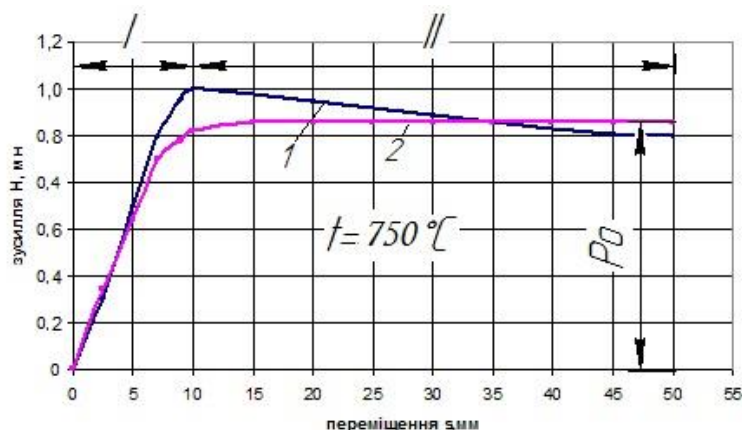


Рис. 1 – Типова діаграма залежності зусилля пресування від переміщення пуансону:
1 – експериментальна; 2 – теоретично-розрахункова

На рис. 1 наведено порівняння експериментальних (1) та теоретичних (2) залежностей зусилля-переміщення. Максимальна похибка теоретичного визначення зусилля чисельними методами не перевищує 12–14%. Для

інших сплавів похибка теоретичного визначення зусилля не

На рис. 2 показана залежності твердості по Віккерсу для заготовок поздовж радіальної координати для різної кількості проходів.

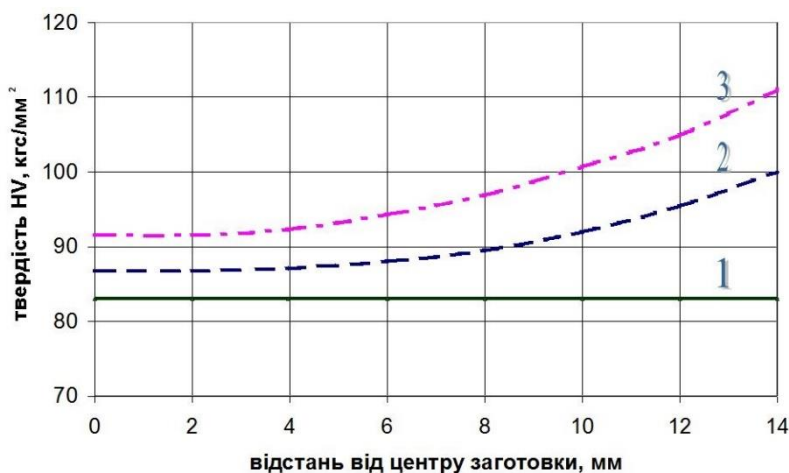


Рис. 2 Залежність твердості по Віккерсу заготовки поздовж радіальної координати:
1 – без обробки; 2 – після першого проходів; 3 – після другого проходів

Показано, що величина твердості підвищується при збільшенні ступеню накопиченої деформації (рис. 2), а максимальна твердість досягає в

периферійній зоні. Порівняння залежностей твердості та ступеню деформації, яка розрахована чисельними методами [12], залежно від радіальної

координати деформованої заготовки після першого проходу показує, що величина твердості пропорційна величині деформації і може бути використана для оцінки деформації. Це не суперечить методу заміру деформації по заміру твердості матеріалів, основи якого розроблено Г.Д. Делем, Г.О. Смірновим-Аляєвим та іншими. Залежності показують, що при гвинтовому уширяючому пресуванні на першому проході основні деформації розвиваються у периферійній зоні зразка. На наступних проходах процесу пресування зона деформації зсуву центр

збільшується по величині і має тенденцію розповсюджуватись на всю товщину заготовки при умові багатократного проходження заготовкою гвинтового каналу при пресуванні (див. рис. 2).

На рис. 3 наведено порівняння мікроструктури зразка в центральній та крайовій зонах в залежності від накопиченої деформації після декількох проходів. Показано, що вже після третього переходу в центральній зоні величина накопиченої деформації приблизно дорівнює величині деформації після першого проходу у крайовій зоні.

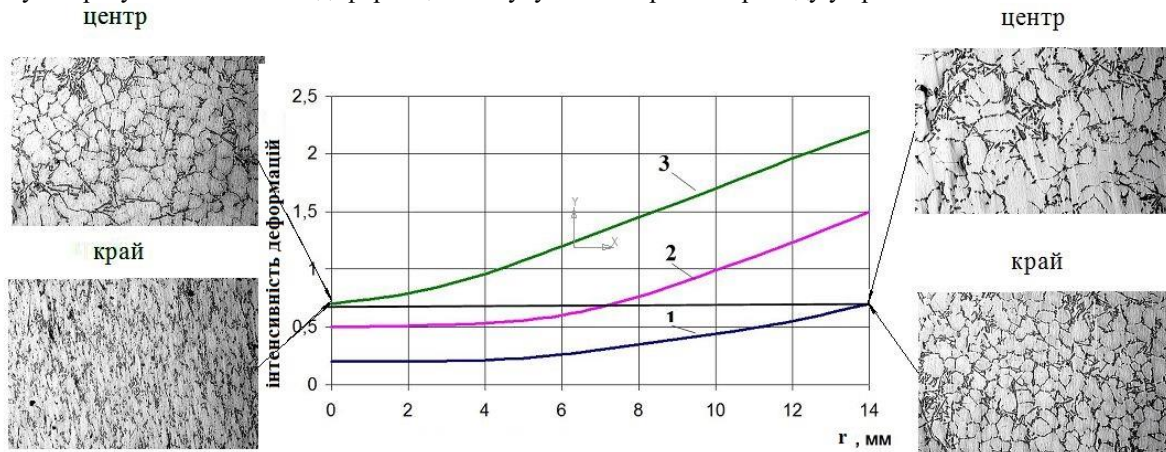


Рис. 3 – Вплив деформації на структуру матеріалу заготовки після ГУП для: 1 – одного, 2 – двох, 3 – трьох проходів

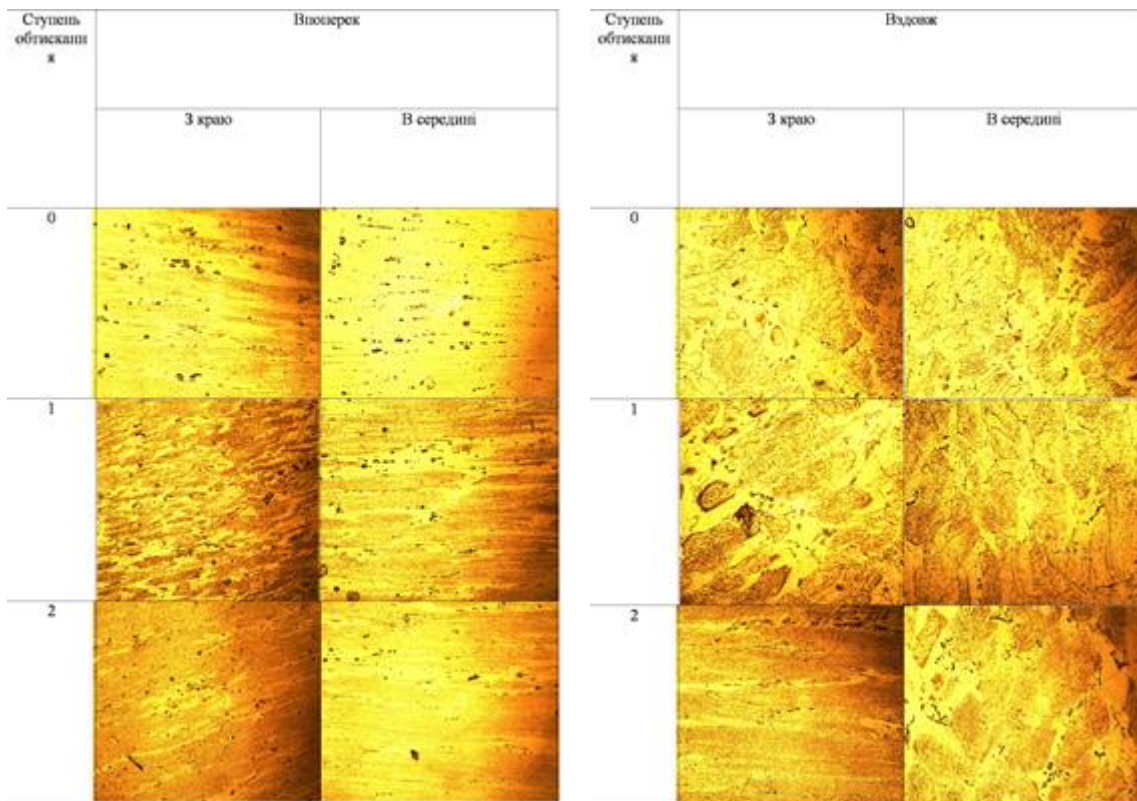


Рис. 4 – Вплив пластичних деформацій обробки зразків із сплаву 1420 на структуру металу: 0, 1, 2 – кількість циклів обробки відповідно

В результаті деформаційної обробки відбувається подрібнення зерен, структурних складових і очищення границь, а ступінь подрібнення кристалічної структури для всіх досліджених матеріалів зростає від центру до бічної поверхні зразка пропорційно до ступеню накопиченої деформації (рис.4). Деформовані зерна орієнтуються в напрямку течії металу.

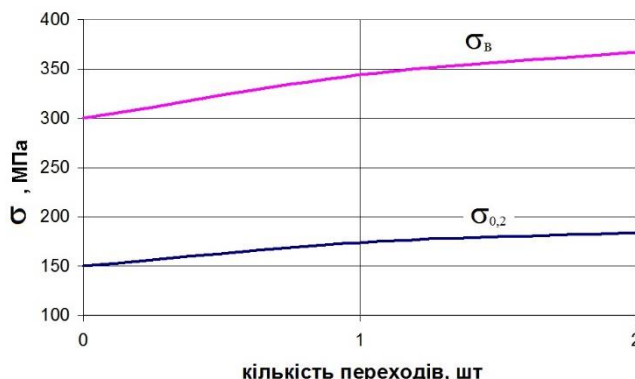


Рис. 5 – Залежність границі текучості $\sigma_{0,2}$ та границі міцності σ_B від кількості проходів при ізотермічному гвинтовому пресуванні зразків зі сплаву 1420

Результати показують, що після деформування величини характеристики міцності підвищуються. Так після першого проходу їх значення підвищуються по відношенню до вихідного металу на 15-18%, а після повторної обробки на 19–24%. При цьому відносно подовження зразків при досліді на одновісне розтягування у відповідності до ДСТУ EN 10002-1:2000, практично не змінюється.

Висновки. Показано, що в результаті деформаційної обробки відбувається подрібнення зерен, а ступінь подрібнення кристалічної структури зростає від центру до периферії пропорційно величині накопиченої деформації. Здеформовані зерна орієнтуються (втягуються) в напрямку течії металу. Після ізотермічного ГУП величина границі міцності підвищується відповідно 19–24%. При цьому відносно подовження зразків при одноосному розтягуванні, практично не змінюється.

Список літератури:

1. Фридляндер І.Н. Свойства композиционных материалов и эффективность их применения: В сб. «Композиционные материалы». М.: Наука. 1981. С. 5–11.
2. Schuh C.A. The effect of solid solution W additions on the mechanical properties of nanocrystalline Ni/ С.А. Schuh, Т.С. Nieh, Н. Iwasaki // Acta Materialia. — 2003. – v.51. – P.431–443.
3. Боткін А.В. Деформационные и силовые параметры процесса равноканального углового прессования длинномерной заготовки по схеме «Conform»/А.В. Боткін, Р.З. Валієв, А.Н. Абрамов, А.Г. Рааб // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением – 2009. № 11, С. 8–14
4. Бейгельзімер Я.Е. Винтовое прессование: технологические аспекты/ Я.Е. Бейгельзімер, Д.В. Орлов, С.Г. Синков, А.В.Рейстов. // Физика и техника высоких давлений.-2002.-Том №12, №4, с. 40-46.
5. Бейгельзімер Я. С. Уширяющая экструзия как метод устранения неравномерности свойств по сечению заготовки./

Металлографічний аналіз дозволяє також заключити, що у повздовжньому напрямку мікроструктура сплавів практично не залежить від ступеня деформації і є однаковою в усіх областях.

Механічні властивості були визначені на зразках при досліді на стиск відповідно з ДСТУ EN 10002-1:2006.

- Я.Е.Бейгельзімер, А.В.Рейстов, С.Г. Синков // ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії, 2005, №2. – С. 57–61.
6. Матросов Н.І. Влияние равноканального многоугольного прессования на структуру, фазовый состав и свойства сплава Nb-Ti / Н.І.Матросов, В.В.Чішко, В.Ю.Дмитренко, С.А.Павловская, Л.Ф. Сеннікова, В.З.Спусканюк, В.В. Чабаненко, С.В. Васильєв, Е.А. Медведская, Б.А.Шевченко // Физика и техника высоких давлений 2005, том 15, №1. – С.95–53.
 7. Кориунов А.І. Исследование влияния количества циклов равноканального углового прессования на скоростную чувствительность титана VT1-0/ А.І. Кориунов, І.І. Ведерников, Л.В. Поляков, А.А. Смоляков, Т.Н. Кравченко, І.В. Коротченкова // Физика и техника высоких давлений 2006, том. 16, №4. – С. 68–71.
 8. Мурашкін М.Ю. Особенности структуры и механические свойства алюминиевого сплава 6061, подвергнутого обработке равноканальным угловым прессованием в параллельных каналах /М.Ю. Мурашкін, С.В. Бобрук, А.Р. Кільмаметов, Р.З. Валієв // Физика металлов и металловедение, 2008, том 108, №4 – С. 439–447.
 9. Варюхін В.Н. Влияние винтовой гидроэкструзии и прокатки на изменение субмикроструктуры меди /В.Н. Варюхін, Е.Г. Пашиная, С.В. Добаткін, С.Г. Синков, В.М. Ткаченко, А.В. Рейстов // Физика и техника высоких давлений 2002, том 12, №4, С. 53–59.
 10. Патент України № 64346 Матриця для зміцнення матеріалу при багаторазовому пресуванні /В.А. Тітов, М.С. Тривайло, Н.К. Злочевська, Е.В. Кондратюк, Г.І. Пейчев., опубл. 10.11.2011. Бюл.21.
 11. Злочевська Н.К. Закономірності формування структурних та механічних властивостей сплава системи Zr- Nb в умовах інтенсивних пластичних деформацій // Вісник НТУ «ХП». – 2013. № 43 (1016) – С. 114–120.
 12. Добровлянський С.М. Установка для дослідження пресування в ізотермічних умовах / С.М. Добровлянський, П.С. Вишневський, С.Ф. Калантир, Н.К. Злочевська // Вісник НТУУ «КП». Серія «Машинобудування». – 2009. № 56. С. 189–192.

Bibliography (transliterated)

1. Fridlyander I.H. *Svoystva kompozitsionnykh materialov i effektivnost ih primeneniya*: V sb. «Kompozitsionnyye materialy» [The properties of composite materials and the efficiency of their application]. Moscow : Nauka. 1981. С. 5–11.
2. Schuh C.A. *The effect of solid solution W additions on the mechanical properties of nanocrystalline Ni* / C.A. Schuh, T.G. Nieh, H. Iwasaki // *Acta Materialia*. — 2003. — v.51. — P. 431–443.
3. Botkin A.V. *Deformatsionnye i silovye parametry protsessa ravnokanalnogo uglovogo pressovaniya dlinnomernoy zagotovki po sheme «Conform»* [Deformation and strength parameters of the process of equal channel angular pressing lengthy harvesting scheme «Conform»] // *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* – 2009. No 11, P. 8–14.
4. Beygelzimer Ya.E. *Vintovoe pressovanie: tehnologicheskie aspekty* [Screw compression: Technological Aspects] // *Fizika i tehnika vyisokih davleniy*.- 2002.- Vol No12, No 4, P. 40–46.
5. Beygelzimer Ya. E. *Ushiryayuschaya ekstruziya kak metod ustraneniya neravnomernosti svoystv po secheniyu zagotovki* // *VISNIK Donbaskoyi derzhavnoyi mashinobudivnoyi akademiyi*, 2005, No 2, P.57–61.
6. Matrosov N.I. *Vliyanie ravnokanalnogo mnogouglovo pressovaniya na strukturu, fazoviyi sostav i svoystva splava Nb-Ti* // *Fizika i tehnika vyisokih davleniy* 2005, vol 15, No1. P. 95–53.
7. Korshunov A.I. *Issledovanie vliyaniya kolichestva tsiklov ravnokanalnogo uglovogo pressovaniya na skorostnyu chuvstvitelnost titana VT1-0* // *Fizika i tehnika vyisokih davleniy* 2006, vol. 16, No4. P. 68-71.
8. Murashkin M.Yu. *Osobnosti struktury i mehanicheskie svoystva alyuminievogo splava 6061, podvergnutogo obrabotke ravnokanalnyim uglovym pressovaniem v parallelnykh kanalah* // *Fizika metallov i metallovedenie*, 2008, vol 108, No4. P. 439–447.
9. Varyuhin V.N. *Vliyanie vintovoy gidroekstruzii i prokatki na izmenenie submikrostruktury medi* // *Fizika i tehnika vyisokih davleniy* 2002, vol 12, No4, P. 53–59.
10. Patent UkraYini No 64346 *Matritsya dlya zmltsnennaya materlalu pri bagatorazovomu presuvanni* / V.A. Titov, M.S. Trivaylo, N.K. Zlochevska, E.V. Kondratyuk, G.I. Peychev., opubl. 10.11.2011. Byul.21.
11. Zlochevska N.K. *Zakonomirnost formuvannya strukturnih ta mehanichnih vlastivostey splava sistemi Zr- Nb v umovah Intensivnih plastichnih deformatsiy* // *Visnik NTU «KhPI»*. – 2013. No 43 (1016). P. 114-120.
12. Dobrovlyanskiy S.M. *Ustanovka dlya doslidzhennya presuvannya v Izotermichnih umovah* // *Visnik NTUU «KPI»*. Seriya «Mashinobuduvannya». – 2009. No 56. P. 189-192.

Надійшла (received) 16.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Формування механічних і структурних властивостей сплаву 1420 в умовах великих пластичних деформацій зсуву / Н. К. Злочевска, А. В. Тітов // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 19–23. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2671

Формирование механических и структурных свойств сплава 1420 в условиях больших пластических деформаций сдвига / Н. К. Злочевская, А. В. Титов // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 19–23. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2519-2671

Formation mechanical and structural properties of alloy 1420 in large plastic deformations shift / N. K. Zlochevska, A.V. Titov // *Bulletin of NTU «KhPI»*. Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 38 (1210). – P. 19–23. – Bibliogr.: 12 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Злочевська Наталія Костянтинівна – кандидат технічних наук, асистент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» ім. Ігоря Сікорського, асистент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел. (099) 264 72 28; e-mail: zlochevska.natali@gmail.com.

Злочевская Наталья Константиновна – кандидат технических наук, ассистент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» им. Игоря Сикорского, ассистент кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел. (099) 264 72 28; e-mail: zlochevska.natali@gmail.com.

Zlochevska Nataliya Kostyantynivna – Assistant, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" name Igor Sikorsky, assistant of the Department of mechanics of plasticity of materials and resource-saving processes; tel. (099) 264 72 28; e-mail: zlochevska.natali@gmail.com.

Тітов Андрій Вячеславович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри прикладної механіки, тел. (044) 204-94-02, e-mail: avt.kpi@gmail.com

Титов Андрей Вячеславович – кандидат технических наук, ассистент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» им. Игоря Сикорского, доцент кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел. (044) 204-94-02, e-mail: avt.kpi@gmail.com

Titov Andrey Vyacheslavovich – candidate of technical sciences, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute" them. Igor Sikorsky, Associate Professor of the Department of Mechanics of plasticity of materials and resource saving processes; tel. (044) 204-94-02, e-mail: avt.kpi@gmail.com

УДК 621.7

В. Л. КАЛОЖНИЙ, В. В. ПІМАНОВ, А. В. САВЧЕНКО

ХОЛОДНЕ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ З ПРОФІЛЬОВАНОЮ ВНУТРІШНЬОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Пропонується технологія та оснащення для виготовлення зі сталі 20 холодним формоутворенням порожнистих виробів з профільованою внутрішньою поверхнею. Проведено чисельні експерименти з використанням методу скінченних елементів в програмному комплексі DEFORM 3D, що дозволило удосконалити технологію виготовлення та встановити енергосилові параметри, кінцеві форму і розміри напівфабрикатів і виробів, ресурс пластичності і напружено-деформований стан здеформованого металу на стадіях технологічного ланцюга. Для реалізації технологічних переходів було спроектовано штампове оснащення для універсального пресового обладнання.

Ключові слова: холодне видавлювання; порожнисті вироби, профільована внутрішня поверхня, технологічний ланцюг, чисельні експерименти, метод скінченних елементів, питомі зусилля, ресурс пластичності.

Предлагается технология и оснастка для изготовления из стали 20 холодным формообразованием изделий из профилированной внутренней поверхностью. Проведены численные эксперименты с использованием метода конечных элементов в программном комплексе DEFORM 3D, что позволило усовершенствовать технологию изготовления и установить энергосиловые параметры, конечные формы и размеры полуфабрикатов и конечных изделий, ресурс пластичности и напряженно-деформированное состояние сформированного металла на стадиях технологической цепочки. Для реализации технологических переходов была спроектирована штамповая оснастка для универсального пресового оборудования.

Ключевые слова: холодное выдавливание; полые изделия, профилированная внутренняя поверхность, технологическая цепочка, численные эксперименты, метод конечных элементов, удельные усилия, ресурс пластичности.

Modern production in various industries, especially in manufacturing products of special purpose, high-performance needs of advanced and new technologies. Among all technologies should be mentioned cold volume punching. Through a number of technology advantages of cold die forging, they are promising in various industries. Quite common ways of obtaining hollow articles are axisymmetrical cold extrusion followed by stretching or thinning. This technology allows to obtain billets and products that are the shape and size as much as possible close to finished engineering parts and components used in the manufacture of special purpose, and to minimize and even eliminate subsequent machining. Technology and equipment for manufacturing steel 20 cold forming hollow articles with profiled inner surface are proposed. Numerical experiments are carried out with using a finite element method in a software DEFORM 3D, which allowed to test the manufacturing technology and determine the energy-power parameters, final size, plasticity resource and stress-strain status on the stages of the process chain. Stamping equipment was designed to implement the manufacturing steps on the universal press equipment.

Keywords: cold extrusion; hollow products, profiled inner surface, process chain, numerical experiments, finite element method, specific efforts, plasticity resource.

Сучасне виробництво в різних галузях промисловості, а особливо у виробництві виробів спеціального призначення, потребує вдосконалених високопродуктивних та нових технологій. Серед усіх технологій слід відмітити холодне об'ємне штампування (ХОШ). Завдяки ряду переваг технологій ХОШ [1-3] вони являються перспективними в різних галузях промисловості. Досить розповсюдженими способами отримання вісесиметричних порожнистих виробів є холодне видавлювання з наступним витягуванням з потоншенням [3-6]. Така технологія дозволяє отримувати заготовки і вироби, які по формі і розмірах максимально наближаються до готових машинобудівних деталей, а також використовується при виготовленні деталей спеціального призначення, та дозволяє звести до мінімуму і навіть виключити подальшу обробку різанням. Коефіцієнт використання металу може досягати 97 %, а в деяких випадках і 100 %. При цьому точність розмірів заготовок або деталей практично визначається точністю виготовлення деформуючого інструменту, підвищується якість поверхонь з досягненням високої шорсткості. Крім того за рахунок зміцнення при холодній формозміні

є можливість заміни дорогих марок сталей на більш дешеві без зміни службових властивостей, в деяких випадках можна виключити подальшу термічну обробку. Холодне об'ємне штампування можливе використання в умовах дрібносерійного, середньосерійного, крупносерійного та масового виробництва деталей. Використання в умовах крупносерійного та масового виробництва забезпечується завдяки можливості механізації та автоматизації операцій нанесення змащення на заготовки, подачі та видалення їх з робочої зони штамсів та пресів [1].

Розробка технології виготовлення деталі. Виходячи з конструкції деталі, ескіз якої приведено на рис. 1, була запропонована технологія виготовлення вказаного виробу шляхом холодного об'ємного штампування за три технологічних переходи із заготовки зі сталі 20. Технологічний ланцюг виготовлення деталі по переходах представлений на рис. 2. З вихідної заготовки (рис. 2а) шляхом комбінованого прямого і зворотного видавлювання отримують порожнистий напівфабрикат з товщиною стінки 7,25 мм (рис. 2б). Після комбінованого прямого-зворотного видавлювання, для наступних операцій виконується

відпал напівфабрикатів. На наступному переході напівфабрикат витягується через конічну матрицю до не повної висоти. При цьому стінка потоншується до 3 мм і залишається місцеве потовщення стінки на торці напівфабрикату (рис. 2в). На наступному переході напівфабрикат протягується через таку ж саму матрицю пуансоном меншого діаметру, що забезпечує формування

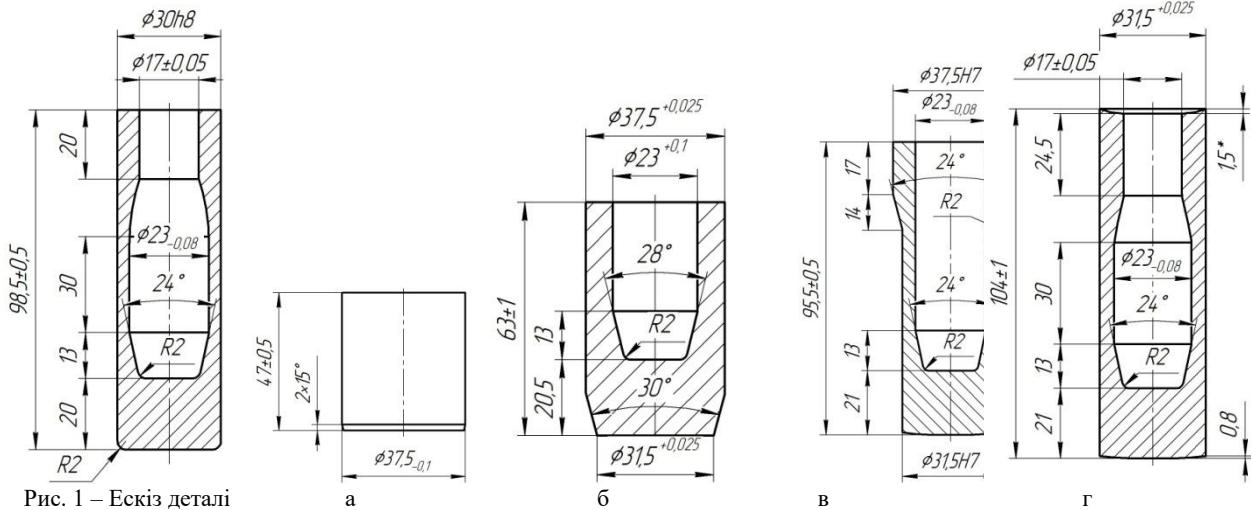


Рис. 1 – Ескіз деталі

Рис. 2 – Технологічний ланцюг виготовлення деталі по переходам: а – вихідна заготовка; б – порожнистий напівфабрикат з товщиною стінки 7,25 мм; в – напівфабрикат витягується через конічну матрицю до не повної висоти; г – формування горловини і утворення необхідного діаметру отвору у верхній частині деталі

Моделювання виконували в програмному комплексі DEFORM-3D [7]. Механічні властивості сталі 20 у відпаленому стані взяті згідно довідкових даних [8]. Зміцнення матеріалу враховувалось по ступеневій апроксимації діаграми істинних напружень. Модель матеріалу – пружно-пластична. Величина переміщення пуансона за один крок складає 0,05 мм. Швидкість переміщення пуансона 6 мм/с. Тертя на контактуючих поверхнях металу із деформуючим інструментом враховувалось з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,08$. Розрахунковим шляхом встановлено кінцеві форми та розміри здеформованих заготовок поопераційно, ресурс використання пластичності ψ , напружено-деформований стан заготовок з урахуванням розвантаження та енергосилові параметри процесів.

Комбіноване пряме-зворотне видавлювання. Комбіноване пряме-зворотне видавлювання є першою операцією запропонованого технологічного ланцюга виготовлення деталі. Розрахункову схему показано на рис. 3. Заготовка 1 встановлюється в матрицю 3 і пуансоном 2 виконується процес прямого-

горловини і утворює необхідний діаметр отвору у верхній частині деталі (рис. 2г). Необхідно призначити мінімальний припуск на обробку зовнішньої поверхні і торцювання деталі зі сторони дна і торця.

Для проведення розрахунків були розроблені скінченно-елементні моделі процесів, що відповідають технологічним переходам.

зворотного видавлювання. Рух здеформованої заготовки вздовж вертикальної вісі обмежується виштовхувачем 4.

Результати моделювання холодного прямого-зворотного видавлювання наведені на рис. 4–6.

На рис. 4а приведений розподіл ступеня вичерпання ресурсу пластичності ψ по об'єму здеформованого напівфабрикату. Після першого переходу величина ψ досягає 0,8. Це підтверджує можливість формування виробу без руйнування. Але необхідно призначити відпал напівфабрикату під наступну операцію витягування з потоншенням.

На рис. 4б приведено розподіли інтенсивності напружень σ_i . Максимальні значення складають 580 МПа у місці переходу плоскої торцевої частини у конус. Розподіл σ_i характеризує зміцнення матеріалу за рахунок холодної пластичної деформації.

Розподіли інтенсивності деформацій ϵ_i (рис. 4в) характеризує пропрацювання структури матеріалу за рахунок холодної пластичної деформації.

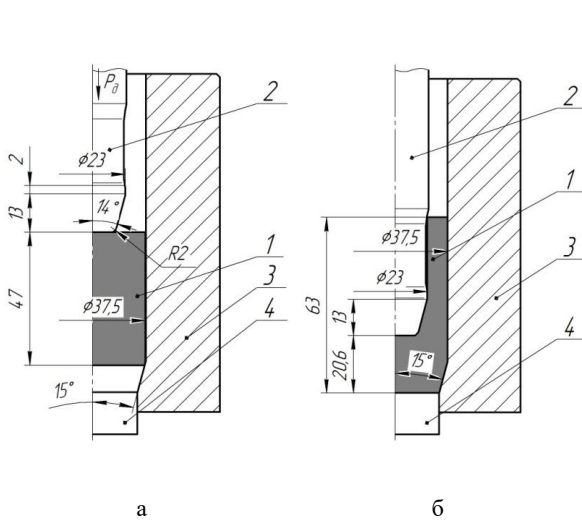


Рис. 3 – Розрахункова схема комбінованого прямого-зворотного видавлювання: а – початок технологічного процесу; б – кінцевий етап технологічного процесу

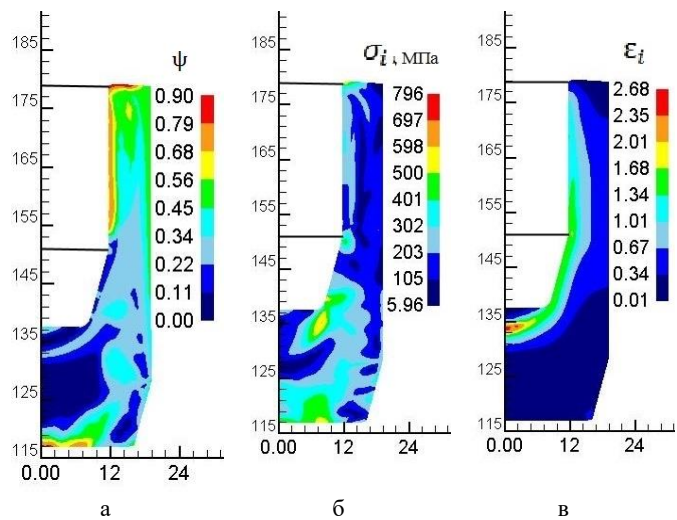


Рис. 4 – Розподіл в об'ємі заготовки після видавлювання: а – ресурсу використання пластичності ψ , б – інтенсивності напружень σ_i та в – інтенсивності деформацій ϵ_i

Силкові параметри процесу прямого-зворотного видавлювання та розвантаження заготовки (зусилля витягування пуансону з видавленої порожнини та виштовхування заготовки з матриці) наведені на рис. 5. Максимальне розрахункове значення зусилля видавлювання складає 1050 кН (рис. 5а.). Залежність зусилля від переміщення пуансону при зворотному ході пуансона наведено на рис. 5б. Максимальне значення зусилля на пуансоні при його зворотному

ході дає 38 кН. Зусилля виштовхування заготовки з матриці становить 120 кН (рис. 5в)

Крім того, встановлено розподіл нормальних напружень на поверхні деформуючого інструменту при максимальному зусиллі видавлювання (рис. 6). Максимальне нормальне напруження на матриці становить 1500 МПа (рис.6а). Максимальні значення нормальних напружень на пуансоні – 3000 МПа (рис. 6б) та виштовхувачі – 1700 МПа (рис. 6в).

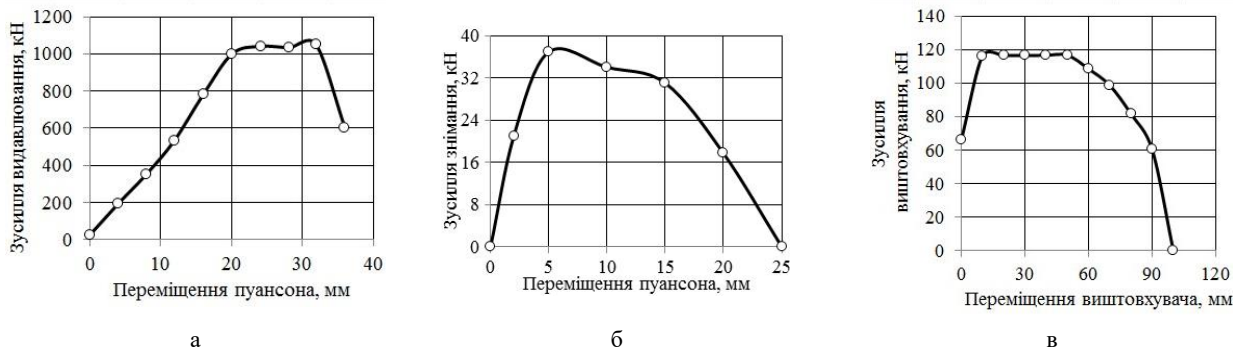


Рис. 5 – Силкові параметри процесу: а – залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансону при прямому-зворотному видавлюванні, б – залежність зусилля від переміщення пуансону при зворотному ході, в – залежність зусилля виштовхування з матриці від переміщення виштовхувача.

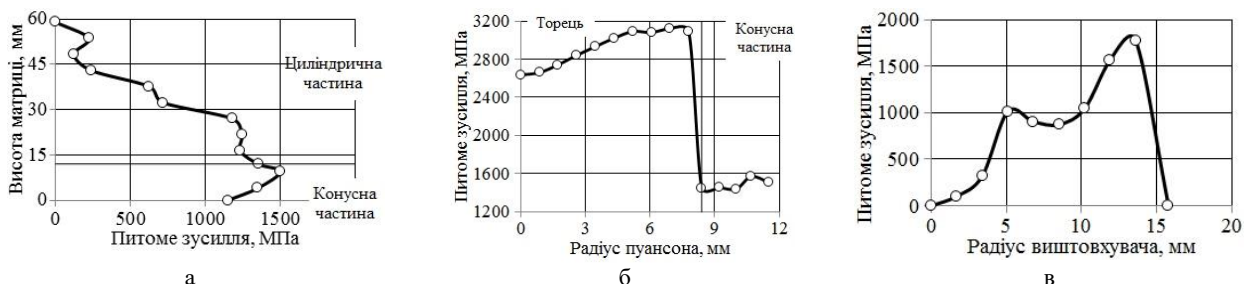


Рис. 6 – Розподіл нормальних напружень на деформуючому інструменті при прямому-зворотному видавлюванні: а – на матриці, б – на пуансоні, в – на виштовхувачі

Витягування з потоншенням. Витягування з потоншенням є другою операцією запропонованого технологічного ланцюга виготовлення деталі. Розрахункова схема показана на рис. 7. Заготовка 1, з попередньої технологічної операції та після відпалу, встановлюється в матрицю 3, а пуансоном 2 виконується процес витягування з потоншенням на не повну висоту. Для додаткового направлення заготовки, зменшення вертикальних розмірів матриці, а також для запобігання затримувannya течії металу в зоні переходу циліндричної частини матриці в конічну передбачено направляюче кільце 4.

Результати моделювання витягування з потоншенням наведені на рис. 8–10.

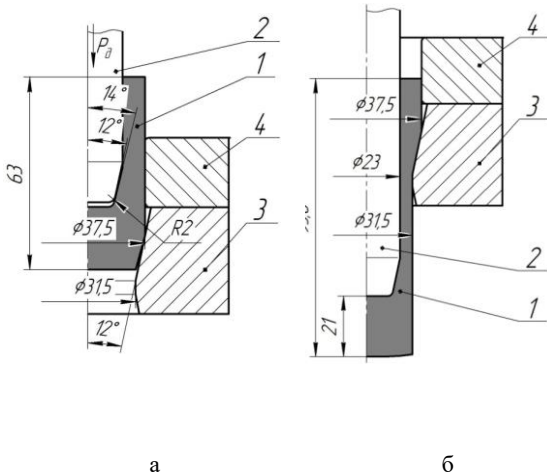


Рис. 7 – Розрахункова схема витягування з потоншенням: а – початок технологічного процесу; б – кінцевий етап технологічного процесу

Силкові параметри процесу витягування з потоншенням та розвантаження заготовки (зусилля зворотного витягування пуансону з порожнини та виштовхування заготовки з матриці) наведені на рис. 9. Максимальне значення зусилля витягування складає 390 кН (рис. 9а), зусилля на пуансоні при зворотному ході – 11,8 кН (рис. 9б) та зусилля виштовхування з матриці – 40 кН (рис. 9в).



Рис. 9 – Силкові параметри процесу витягування з потоншенням: а – залежність зусилля витягування від переміщення пуансону, б – залежність зусилля від переміщення пуансону при зворотному ході пуансону, в – залежність зусилля виштовхування з матриці від переміщення виштовхувача

На рис. 8а приведений розподіл вичерпаого ресурсу пластичності ψ в об'ємі zdeформованого напівфабрикату. Після технологічної операції величина ψ досягає 0,92. Це підтверджує можливість формоутворення виробу без руйнування. На рис. 8б приведено розподіл інтенсивності напружень σ_i . Максимальні значення складають 500 МПа у місці переходу плоскої торцевої частини у конусу. Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i приведений на рис. 8в. Максимальні значення інтенсивності деформації ϵ_i після витягування з потоншенням складають 1,7 в зоні переходу конусної частини zdeформованої заготовки в циліндричну.

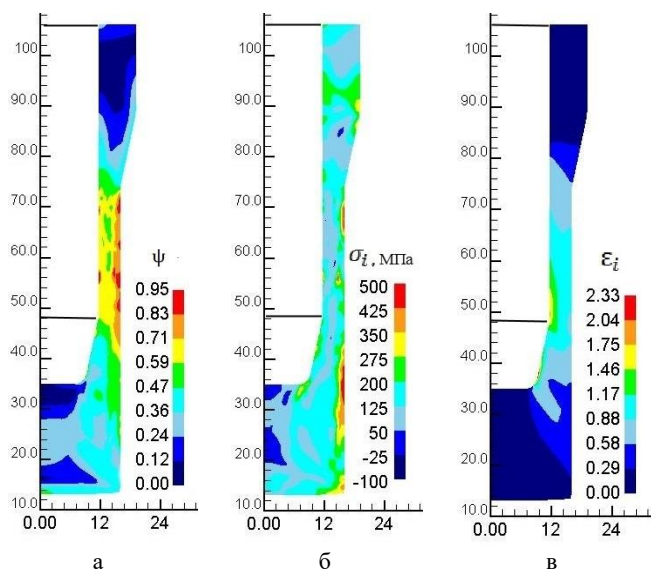


Рис. 8 – Розподіл в об'ємі заготовки після витягування: а – вичерпаого ресурсу пластичності ψ , б – інтенсивності напружень σ_i та в – інтенсивності деформацій ϵ_i

Розподіл нормальних напружень на поверхні деформуючого інструменту при максимальних зусиллях в процесі витягування з потоншенням показані на рис.10. На пуансоні при витягуванні з потоншенням максимальне значення складає 1200 МПа (рис. 10а), при цьому на матриці отримано 1250 МПа (рис. 10в).

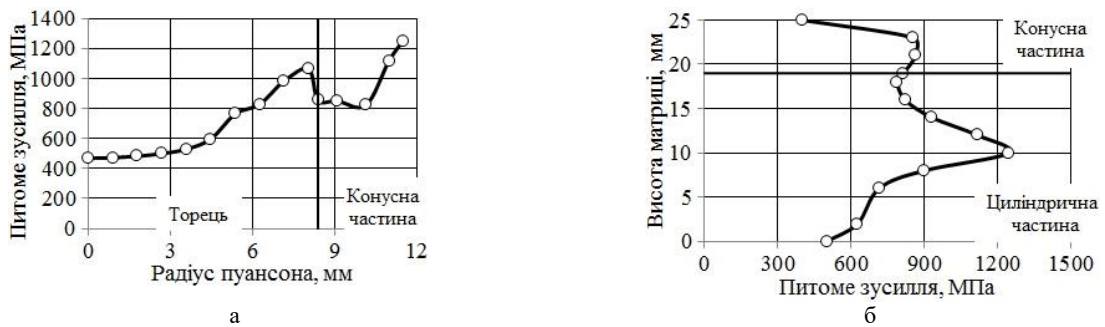


Рис. 10 – Розподіл нормальних напружень на деформуючому інструменті при витягуванні з потоншенням:
а – на пуансоні, б – на матриці

Формування горловини. Формування горловини є третьою операцією запропонованого технологічного ланцюга виготовлення деталі. Розрахункова схема формування горловини та положення після формування показані на рис. 11. Розрахункова схема зображена на рис. 11а. Заготовка 1 встановлюється в матрицю 3, а пуансоном 2 виконується процес деформування заготовки. Положення після формування горловини приведені на рис. 11б. Здеформована частина повністю прилягає до поверхні пуансона, а при формуванні проходить викривлення торця стінки.

Результати моделювання формування горловини наведені на рис. 12–14. На рис. 12а приведений розподіл вичерпаного ресурсу

пластичності ψ по об'єму zdeформованої заготовки. Після цій технологічної операції величина ψ zdeформованого досягає максимального значення 0,95 у зовнішніх шарах металу стінки. На рис. 12б приведений розподіл інтенсивності напружень σ_i по об'ємі zdeформованої заготовки. Максимальне значення значення становить 730 МПа у зоні формування горловини. Розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i в об'ємі zdeформованої заготовки показаний на рис. 12в. Максимальні значення інтенсивності деформації ϵ_i після формування горловини складають 1,7 в місці формування горловини.

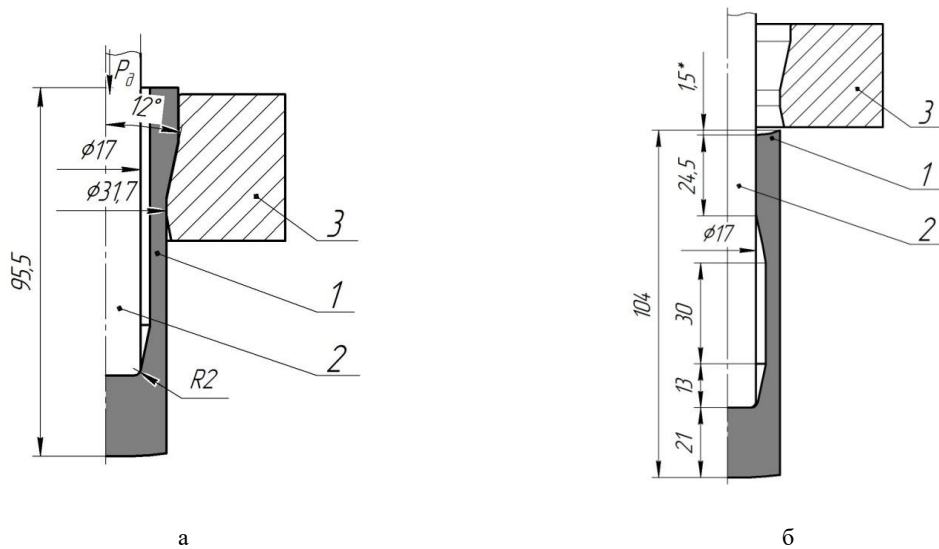


Рис. 11 – Розрахункова схема формування горловини:
а – початок технологічного процесу; б – кінцевий етап технологічного процесу

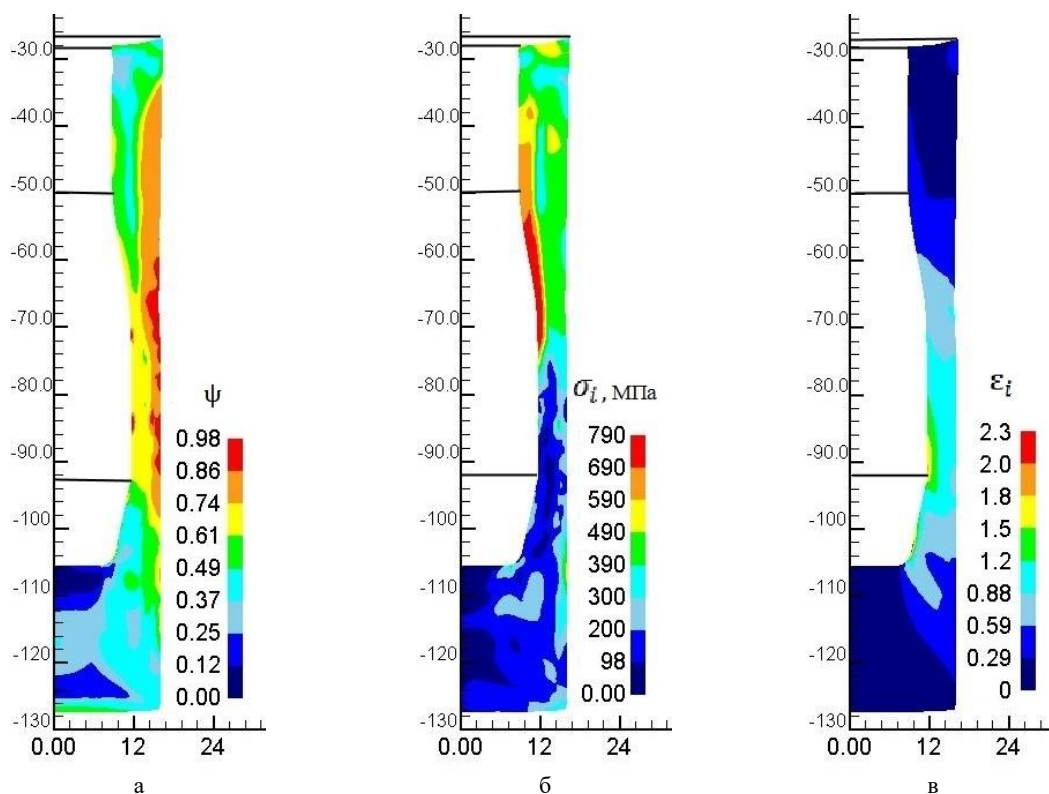


Рис. 12 – Розподіли по об'єму zdeформованої заготовки після формування горловини: а – вичерпаного ресурсу пластичності ψ , б – інтенсивності напружень σ_i та в – інтенсивності деформацій ϵ_i

Графіки залежностей зусилля формування горловини і зусилля знімання від переміщення інструмента показані на рис. 13. Максимальне значення зусилля формоутворення горловини складає 142 кН (рис. 13а). На рис. 13б наведена залежність зусилля знімання zdeформованої заготовки з пуансона. Максимальна величина зусилля знімання складає 16,5 кН. Розподіли нормальних напружень на поверхнях деформуючого інструмента, які виникають при максимальному значенні зусилля формування горловини показані на рис. 14. По нормальних

напруженнях оцінюються питомі зусилля на поверхнях інструмента. На рис 14а наведений розподіл вказаних напружень на торці та конусній частині пуансона. На пуансоні максимальне значення нормальних напружень виникає на конусній частині та складає 1250 МПа. Розподіл питомих зусиль по висоті матриці зображений на рис. 14б. На конусній частині матриці максимальне значення цих зусиль складає 850 МПа. Ще більші питомі зусилля виникають на циліндричній поверхні матриці та досягають 1250 МПа.

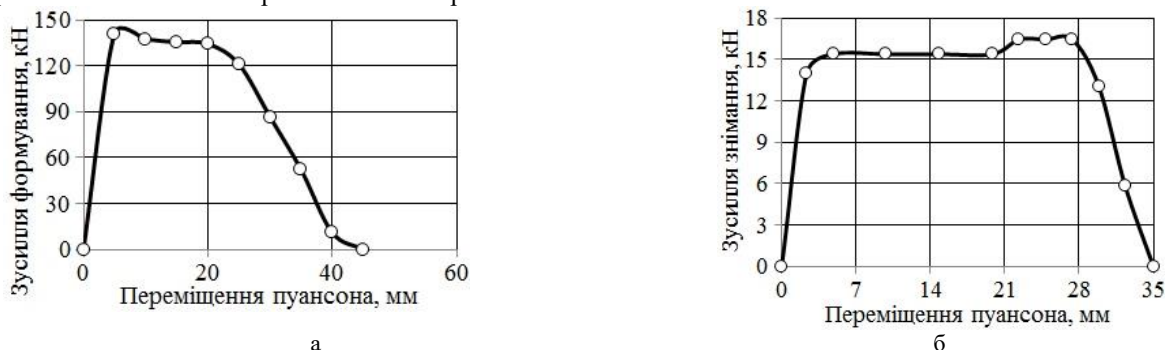


Рис. 13 – Силкові параметри процесу: а – залежність зусилля формування горловини від переміщення пуансону, б – залежність зусилля від переміщення пуансону при зворотному ході пуансону

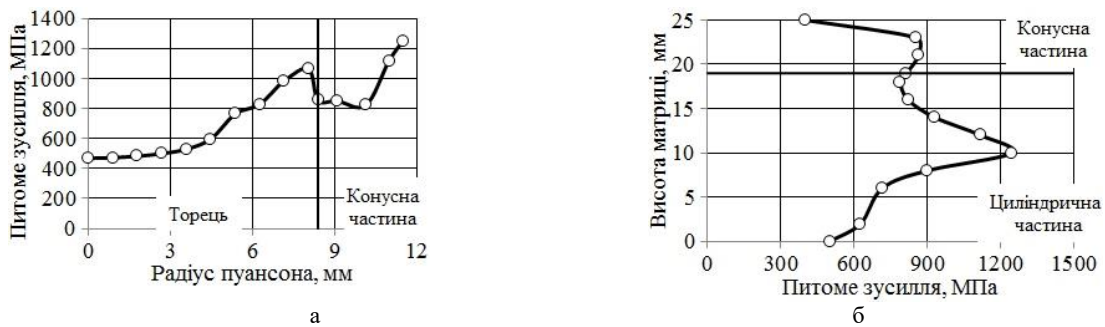


Рис. 14 – Розподіл нормальних напружень на деформуючому інструменті при формуванні горловини:
а – на пуансоні, б – на матриці

Штампове оснащення для реалізації технології виготовлення. Отримані дані були використані для проектування штампового оснащення. На рис. 15 показаний штамп для прямого-зворотного видавлювання, який складається з блоку (нижня плита 12 та верхня плита 13, а також для направлення дві колонки 18, 19 та дві втулки 20, 21) та пакету штампа. На нижній плиті 12, яка розміщена на підкладній плиті 14, стоїть обойма 5 з опорним кільцем 3, п'ятою 6 та виштовхувачем 2. На обойму встановлена бандажована матриця 1, що притискається до нижньої плити притискним кільцем 4 за допомогою болтів 25 і шайб 31. До верхньої плити 13 прикріплений пуансонотримач 10 за допомогою гвинтів 28. В ньому розміщена п'ята 7 і конусне кільце 23. За допомогою шайби 8 і конусного кільця 23, пуансон 11 притискається до п'яти 7, яка притискається до плити 13. Пуансон 11 додатково направляється по матриці за допомогою направляючої втулки 9. Для виштовхування деталі з матриці передбачені дві тяги 17, що зв'язані верхньою плитою за допомогою двох втулок 12. В обоймі 5 передбачені отвори для тяг, до яких за допомогою гайок 26, кріпиться коромисло 16, на якому стоїть штовхач 15. Перед видавлюванням, зазор між торцем пуансона 11 і поверхнею матриці 1 повинен бути трохи більшим за висоту виробу. Вихідна заготовка встановлюється в

матрицю 1. При ході повзуна вниз виконується процес прямого-зворотного видавлювання. Після видавлювання верхня плита 13 піднімається вгору, тяги 17 діють на коромисло, на якому стоїть штовхач 15. Штовхач 15, рухаючись вгору, діє на п'яту 6 і виштовхувач 2, який видаляє заготовку з матриці. Штамп для витягування з потоншенням показано на рис. 16. Штамп складається з блоку, який містить нижню плиту 8 та верхню плиту 7, а також має дві колонки 15, 16 та дві втулки 13, 14. На нижній плиті встановлена нижня обойма 6 та верхня обойма 5, на якій в свою чергу стоїть бандажована матриця 1. Матриця 1 притискається до нижньої плити притискним кільцем 3 через напрямне кільце 4 за допомогою шпильок 12, гайок 18 і шайб 21. У верхню плиту 7 встановлюється пуансон 2 разом з пуансонотримачем 10 за допомогою болтів 20. Для виштовхування деталі з матриці у штампі передбачено виштовхувач 9, що рухається по загартованій напрямній втулці 17.

Перед витягуванням зазор між торцем пуансона 2 і поверхнею матриці 1 повинен бути трохи більшим за висоту виробу. Вихідна заготовка встановлюється в матрицю. При ході повзуна вниз виконується процес витягування з потоншенням. Після витягування верхня плита 7 рухається вгору, після чого виштовхувач пресу діє на виштовхувач 9, що видаляє заготовку з матриці 1.

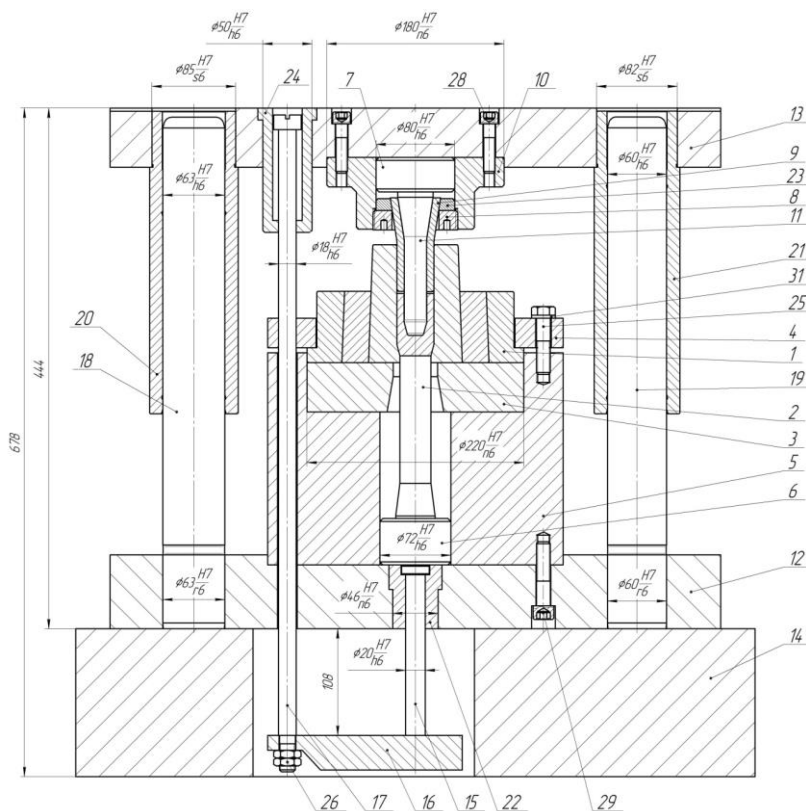


Рис. 15 – Штмп для прямого-зворотного видавлювання.

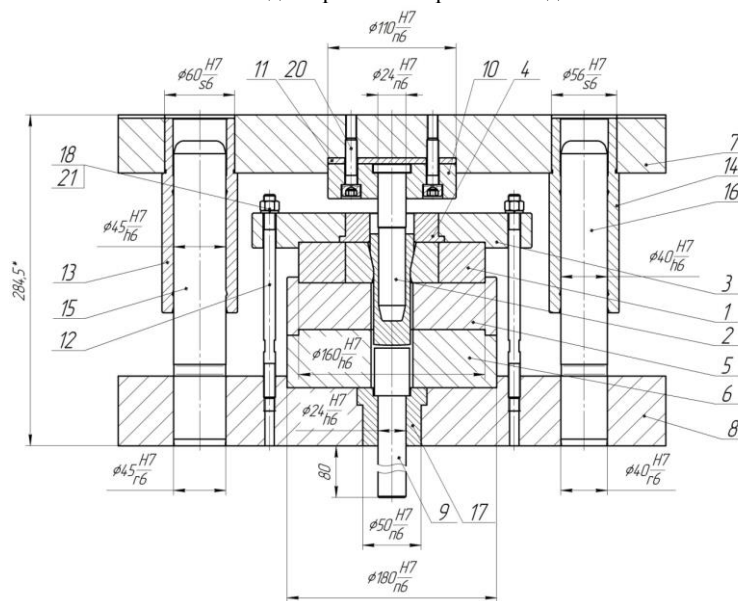


Рис. 16 – Штмп для витягування з потоншенням

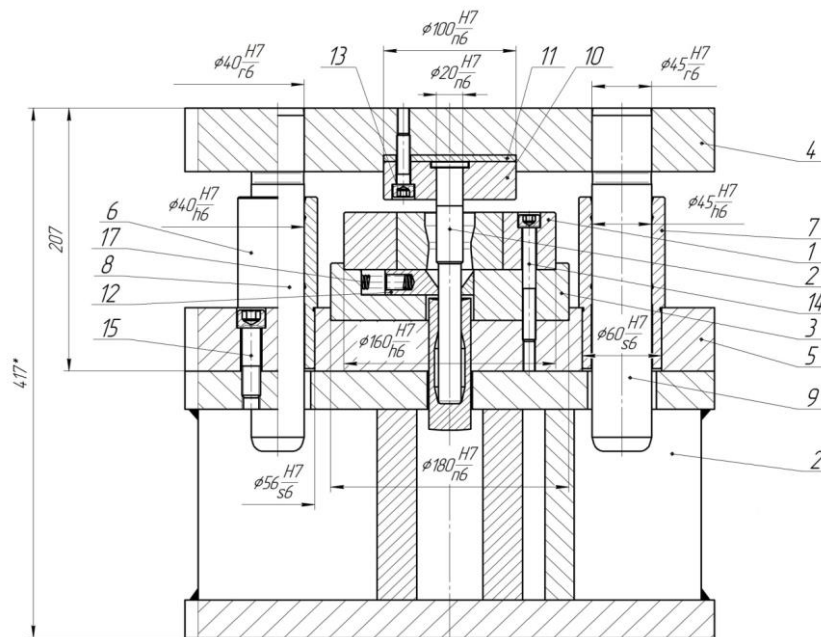


Рис. 17 – Штамп для формування горловини

Штамп для формування горловини наведено на рис. 17. Штамп складається з блоку, який містить нижню плиту 5 та верхню плиту 4, а також має дві колонки 8, 9 та дві втулки 6, 7. На нижній плиті 5 встановлена обойма 3, на якій в свою чергу стоїть бандажована матриця 1, що притискається разом з обоймою до нижньої плити за допомогою болтів 14. У верхню плиту 4 встановлюється пуансон 2 разом з пуансонотримачем 10 за допомогою болтів 13. Перед витягуванням зазор між торцем пуансона і поверхнею матриці 1 повинен бути трохи більшим за висоту виробу. Вихідна заготовка встановлюється в матрицю. При ході повзуна вниз заготовка нижнім торцем розклинює знімачі 12 і виконується процес формування горловини. В крайньому нижньому положенні штампу знімачі 12 за допомогою пружин 17 повертаються у вихідне положення, впираючись в пуансон 2. Після чого верхня плита 4 разом з пуансоном рухається вгору, заготовка впирається верхнім торцем у знімачі 12 і відбувається зняття деталі з пуансону. Готовий виріб потрапляє в отвір підставки 2.

Висновки:

1. Розроблена удосконалена технологія виготовлення порожнистих вісесиметричних виробів зі сталі 20 з профільованою внутрішньою поверхнею шляхом холодного формоутворення. Наведений технологічний ланцюг отримання виробу за три переходи.

2. З використанням методу скінченних елементів проведені чисельні експерименти в програмному комплексі DEFORM 3D, що дозволило удосконалити технологію виготовлення

та встановити енергосилові параметри, кінцеві розміри, ресурс пластичності і напружено-деформований стан на стадіях технологічного ланцюга.

3. За результатами чисельних експериментів було спроектовано штампове оснащення для кожного переходу запропонованого технологічного процесу.

Список літератури

1. Холодная объемная штамповка. Справочник. / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1973, – 496 с.
2. Ковка и штамповка. Справочник. В 4-х т.; т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. -384 с.
3. Уик Ч. Обработка металлов давлением / Ч. Уик / Перевод с английского В.И. Викулова и А. А. Падогина. Под. ред. и с предисловием А.Ф. Нистратова // Издательство «Мир», Москва 1965.
4. Каложний В.Л. Математичне моделювання холодного комбінованого видавлювання заготовок із сталі 20 / Каложний В.Л., Каложний О.В., Піманов В.В., Носар Є.А. / Вісник НТУУ КПІ. Машинобудування, №59. Київ.-2010. с. 43-45.
5. Каложний О.В. Розрахунковий аналіз холодного зворотного видавлювання конічних порожнин / Каложний О.В., Піманов В.В., Савчук І.М. // Вісник НТУУ КПІ. Машинобудування, №60. Київ.-2010. с. 64-67.
6. Сабол С. Ф. Комбіноване холодне видавлювання конічної порожнистої заготовки для виробу спеціального призначення / С. Ф. Сабол, В. В. Піманов, Є. М. Коробка // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 24 (1133). – С. 103–107.
7. Deform-3D – мощная система моделирования технологических процессов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tesis.com.ru/software/deform>.
8. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин // 2-е изд.– М.: Металлургия, 1973-224.

Bibliography (transliterated)

1. *Holodnaya ob'emnaya shtampovka*. Spravochnik. [Cold forging. Directory] / Pod red. G.A. Navrotskogo. – Moscow. Mashinostroenie Publ., 1973. – 496 p.
2. *Kovka i shtampovka*. Spravochnik. [Forging and Stamping]. vol. 3. Holodnaya ob'emnaya shtampovka. – Moscow. Mashinostroenie Publ., 1987. – 384 p.
3. Uik Ch. *Obrabotka metallov davleniem* [Metal forming]. Moskva, Mir Publ., 1965.
4. Kalyuzhnyi V.L. *Matematicheskie modelyuvannya holodnogo kombinovanogo vidavlyuvannya zagotovok iz stali 20* [Mathematical modeling of combined cold extrusion billet steel 20] / Kalyuzhnyi V.L., Kalyuzhnyi O.V., Pimanov V.V., Nosar E.A. / *Visnik NTUU KPI. Mashinobuduvannya*, No 59. Kiyiv. – 2010. – P. 43–45.
5. Kalyuzhnyi O.V. *Rozrahunkoviy analiz holodnogo zvorotnogo vidavlyuvannya konichnih porozhnin* [Current analysis of cold extrusion reverse conical cavities] / Kalyuzhnyi O.V., Pimanov V.V., Savchuk I.M. // *Visnik NTUU KPI. Mashinobuduvannya*, No 60. Kiyiv.-2010. – P. 64–67.
6. Sabol S. F. *Kombinovane holodne vidavlyuvannya konichnoyi porozhnistoyi zagotovki dlya virobu spetsialnogo pryznachennya* [Combined cold extrusion tapered hollow billet products for special purposes] / S. F. Sabol, V. V. Pimanov, E. M. Korobka // *Visnik Nats. tehn. un-tu "HPI" : zb. nauk. pr. Temat. vip. : Innovatsiyni tehnologiyi ta obladnannya obrobki materyaliv u mashinobuduvanny ta metalurgiyi*. – Kharkiv : NTU "HPI". – 2015. – No 24 (1133). – P. 103–107.
7. Deform-3D – moschnaya sistema modelirovaniya tehnologicheskikh protsessov [Elektronnyy resurs]. [powerful technological processes modeling system [electronic resource]. – Access mode] – Rezhim dostupa: <http://www.thesis.com.ru/software/deform>.
8. Tretyakov A.V. *Mehanicheskie svoystva metallov i spлавov pri obrabotke davleniem* [The mechanical properties of metals and alloys by pressure treatment] Moscow. Mashinostroenie Publ 1973 – 224 p.

Надійшла (received) 08.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Холодне формоутворення порожнистих виробів з профільованою внутрішньою поверхнею / В. Л. Калюжний, В. В. Піманов, А. В. Савченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 24–34. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Холодное формообразование полых изделий с профилированной внутренней поверхностью / В. Л. Калюжний, В. В. Пиманов, А. В. Савченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 24–34. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Cold forming of hollow articles with profiled inner surface / V. L. Kaliuzhnyi, V. V. Pimanov, A. V. Savchenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 38 (1210). – P. 24–34. – Bibliogr.: 8 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Калюжний Володимир Леонідович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; професор кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (044) 204-99-11; e-mail: KW1_2011@ukr.net.

Калюжний Владимир Леонидович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев; профессор кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (044) 204-99-11; e-mail: KW1_2011@ukr.net.

Kalyuzhny Vladimir Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kiev; Professor of the Department of mechanics of plasticity of materials and resource-saving processes; tel.: (044) 204-99-11; e-mail: KW1_2011@ukr.net

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

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

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

Савченко Артем Валентинович – Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; студент кафедри механіки пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів; тел.: (095) 917-28-68; e-mail: Tierel@mail.ua.

Савченко Артём Валентинович – Национальный технический университет «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев; студент кафедры механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов; тел.: (095) 917-28-68; e-mail: Tierel@mail.ua.

Savchenko Artem Valentynovich – National Technical University "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kiev, student of the Department of mechanics of plasticity of materials and resource-saving processes; tel.: (095) 917-28-68; e-mail: Tierel@mail.ua.

УДК 621.923 : 331.45

Ф. В. НОВИКОВ, Г. В. НОВИКОВ, С. А. ДИТИНЕНКО, В. И. ПОЛЯНСКИЙ**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРАВКИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВЯЗКАХ
ВЗАМЕН ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПРАВКИ**

Обоснованы экологические преимущества применения электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках взамен традиционно применяемой электрохимической правки при шлифовании металлических и неметаллических материалов повышенной твердости (твердые сплавы, износостойкие наплавки и покрытия, алмазы, керамики и т.д.) и описаны разработанные на этой основе технологические процессы шлифования. Показано, что применение электроэрозионной правки в отличие от электрохимической правки не требует использования вредных для здоровья рабочего электролитов, обработка производится с применением обычной технической воды. Даны практические рекомендации, обеспечивающие повышение производительности и снижение себестоимости обработки.

Ключевые слова: шлифование, электроэрозионная правка, электрохимическая правка, алмазный круг на металлической связке, экологически безопасные технологии, порошковая металлургия.

Обґрунтовано екологічні переваги застосування електроерозійної правки алмазних кругів на металевих зв'язках замість традиційно застосовуваної електрохімічної правки при шліфуванні металевих і неметалевих матеріалів підвищеної твердості (тверді сплави, зносостійкі наплавлення і покриття, алмази, кераміки та ін.) і описано розроблені на цій основі технологічні процеси шліфування. Показано, що застосування електроерозійної правки на відміну від електрохімічної правки не вимагає використання шкідливих для здоров'я робочого електролітів, обробка здійснюється із застосуванням звичайної технічної води. Надано практичні рекомендації, що забезпечують підвищення продуктивності й зниження собівартості обробки.

Ключові слова: шліфування, електроерозійна правка, електрохімічна правка, алмазний круг на металевій зв'язці, екологічно безпечні технології, порошкова металургія.

Substantiated environmental benefits of the use of EDM dressing of diamond wheels on metal bonds used to replace traditional electrochemical changes in grinding metallic and nonmetallic materials of high hardness (hard metals, wear-resistant surfacing and coating, diamonds, ceramics, etc.), and are described on this basis, developed processes grinding. It is shown that the use of electrical discharge changes unlike electrochemical changes do not require the use of harmful working electrolyte, the processing is performed using conventional industrial water. In particular as it relates to the operations of cut natural diamonds in diamonds, as a result of the establishment of the diamond wheel on a metal tray in conjunction with the electrolyte, the electrolyte comes splashing and contamination of workplace chemically active substances. Application of EDM dressing eliminates this phenomenon. It is also shown that the use of EDM dressing of diamond wheels metal bond eliminates from the process of natural diamond processing diamond wheels made electrogalvanic method, which is still less environmentally "clean" method in comparison with the electrochemical editing circle, as you have to use significant amounts of harmful health workers electrolytes. The Rabo those practical recommendations, providing improved performance and processing quality, cost reduction.

Keywords: grinding, EDM dressing, electrochemical dressing, diamond grinding wheel Metal bond, environmentally sound technologies, powder metallurgy

Введение. Промышленное освоение производства искусственных алмазов открыло широкие перспективы изготовления алмазных кругов, обеспечивающих существенное повышение показателей качества и производительности обработки при шлифовании различных изделий, изготовленных из металлических и неметаллических материалов повышенной твердости: твердых сплавов, износостойких наплавки и покрытий, алмазов, керамик и т.д. С целью снижения расхода дорогостоящих синтетических алмазов получили применение алмазные круги на прочных металлических связках, которые эффективно могут быть использованы как на операциях окончательного, так и предварительного шлифования, например, твердых сплавов, при съеме значительных припусков. Поскольку эти круги достаточно быстро затупляются и засаливаются, необходимым условием их эффективного применения является осуществление их непрерывной (периодической) механической или

электрохимической правки. В последнем случае обеспечивается достаточно быстрое восстановление режущей способности алмазного круга, однако использование вредных для здоровья рабочего электролитов ограничивает ее применение. В связи с этим используется метод электроэрозионной правки, который не требует применения вредных электролитов: правка производится с использованием обычной технической воды. Следовательно, этот метод правки является более экологически чистым по сравнению с методом электрохимической правки. Поэтому в работе рассматриваются вопросы применения электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках взамен традиционно применяемой электрохимической правки при шлифовании металлических и неметаллических материалов повышенной твердости.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованию метода электроэрозионной правки алмазных кругов на

металлических связках посвящены многочисленные публикации [1–3], в которых раскрыта физическая сущность и технологические возможности этого прогрессивного метода правки, исключающего загрязнение рабочего места химически активными веществами. Показано, что по технологическим показателям этот метод правки в ряде случаев превосходит метод электрохимической правки, т.к. позволяет более производительно и качественно подготовить алмазный круг на металлической связке к работе [4]. Особенно эффективен этот метод правки алмазных кругов при шлифовании неметаллических материалов повышенной твердости (природных и синтетических алмазов, ферритов, керамик и т.д.), так как без его применения процесс съема материала фактически неосуществим [5, 6]. Фактически невозможно осуществить процесс резания этих материалов лезвийными инструментами. Поэтому основным методом их обработки является шлифование алмазными кругами на металлических связках с их электроэрозионной правкой.

Цель работы – обоснование и практическая реализация условий эффективного применения экологически безопасной технологии электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках взамен традиционно применяемой электрохимической правки при шлифовании металлических и неметаллических материалов повышенной твердости.

Изложение основного материала. Как показано выше, алмазные круги на металлических связках, обладая высокой работоспособностью, в процессе шлифования быстро затупляются, засаливаются и теряют режущую способность. Для восстановления их режущей способности в процессе шлифования традиционно используется электрохимическая правка, которая требует использования сильных электролитов, что ограничивает ее применение, так как это, во-первых, вызывает коррозию металлорежущего оборудования и преждевременный выход его из строя, во-вторых, отрицательно сказывается на здоровье рабочего. Так установлено, что при обработке в зоне шлифования образуется туман из электролита (он содержит вредные составляющие для организма человека), который необходимо удалять вытяжными устройствами.

Часто применяется химическое травление режущей поверхности алмазного круга на металлической связке. Для этого алмазный круг на металлической связке М2-01 помещают в концентрированную кислоту (в 42%-й раствор азотной кислоты) и выдерживают определенное время. После обработки для предохранения связки от коррозии и нейтрализации процесса травления

алмазный круг необходимо промыть. Этот метод достаточно эффективен, не требует сложного оборудования и приспособлений, кроме вентиляционных устройств, однако не является экологически безопасным методом.

Поэтому вместо электрохимической правки и химического травления круга предложено применять электроэрозионную правку круга, основанную на введении в зону резания или автономно к кругу дополнительной электрической энергии в виде электрических разрядов [1]. Этот метод правки является экологически более безопасным и чистым, так как не требует применения вредных электролитов, процесс протекает с использованием обычной технической воды, которая не вызывает отрицательного воздействия на рабочего как это имеет место при электрохимической правке. Кроме того, электроэрозионная правка алмазного круга обеспечивает более высокие технологические показатели процесса шлифования: производительность и качество обработки.

Сущность электроэрозионной правки алмазного круга при использовании высокочастотного генератора электрических импульсов представляется следующим образом: при сближении правящего электрода с алмазосодержащим слоем круга и подачей в зазор СОТС (используется техническая вода с антикоррозионной добавкой, 1,5 – 3 %-й содовый раствор) по кратчайшим расстояниям между токопроводящими участками металлической связки круга и электрода при наличии потенциала происходят разряды. Термическое воздействие импульсного разряда приводит к эрозии участков связки и образованию лунок. Продукты эрозии связки в виде застывших частиц вымываются из зоны обработки межэлектродной среды. В результате суммарного эрозионного воздействия электрических разрядов удаляется определенное количество связки, что приводит к обнажению зерен и восстановлению режущей способности алмазного круга на металлической связке [1].

Особенно значительный эффект от применения электроэрозионной правки алмазных кругов формы 1А1 на металлической связке был достигнут на операциях огранки природных алмазов в бриллианты. Традиционно эти операции производятся в условиях непрерывной электрохимической правки алмазного круга. Для этого вращающийся алмазный круг на металлической связке устанавливается в ванночку с электролитом, в результате чего происходит восстановление его режущей способности за счет электрохимического растворения металлической связки и постоянного обновления режущего контура круга. Однако, такой метод правки алмазного круга, во-первых,

ограничивает возможности увеличения скорости круга (т.е. увеличения производительности обработки) в связи с разбрызгиванием электролита, а во-вторых, приводит к загрязнению рабочего места химически активными веществами и возможному заболеванию рабочего. Поэтому переход от электрохимической правки алмазного круга к электроэрозионной правке открыл новые технологические возможности операций огранки природных алмазов в бриллианты, состоящие в исключении вредного воздействия электролита на здоровье рабочего, а также в повышении качества и производительности обработки.

Кроме алмазных кругов формы 1A1 на металлических связках, изготовленных методом порошковой металлургии, на этих операциях используются алмазные круги, изготовленные электрогальваническим методом. Как известно, этот метод является еще менее экологически «чистым» методом по сравнению с электрохимической правкой круга, так как приходится использовать значительные объемы вредных для здоровья рабочих электролитов. Поэтому, для исключения алмазных кругов, изготовленных электрогальваническим методом, из технологического цикла обработки природных алмазов в бриллианты, предложено использовать специальные ограночные алмазные круги на металлических связках (например, связке МЗ-04 с характеристиками 6A2 300x60x5x50 АС6 10/7 4), изготовленные методом порошковой металлургии.

При обработке ограночный круг базируется на оправке-оси и закрепляется механическим способом (рис. 1 [5]). Для нормального протекания процесса обработки биения режущей поверхности ограночного круга не должно превышать 0,01 мм. Поэтому ограночный круг обязательно проходит динамическую балансировку, т.к. вибрации существенно влияют на величину биения его режущей поверхности (диаметр круга – 300 мм, а частота вращения превышает 3000 об./мин).

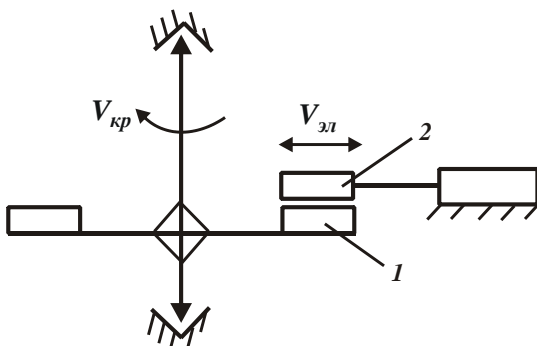


Рис. 1 – Схема электроэрозионной правки ограночного алмазного круга:

1 – алмазоносный слой круга; 2 – электрод

Практикой установлено, что устранить механическим способом увеличенное биение круга не приводит к положительным результатам. Несмотря на то, что происходит снятие алмазоносного слоя, профиль режущей поверхности фактически не изменяется (остается исходным) и биение не устраняется. Поэтому выполнять огранку природных алмазов этим кругом невозможно. В связи с этим была предложена идея устранения биения режущей поверхности круга с использованием метода электроэрозионной правки. Для этого было изготовлено специальное оборудование. Чтобы исключить ряд погрешностей при электроэрозионной правке круга, его обработку производили на ограночном станке, где размещали все необходимые элементы правки. Важным моментом данного решения стало то, что ограночный круг правился в собранном виде (на оправке-оси). Правящий электрод был изготовлен из графитового материала и имел пазы для попадания охлаждающей жидкости в зону исправления. Электроду сообщали возвратно-поступательные движения на всю ширину алмазоносного слоя круга (рис. 1). Направляющие электрода изготавливались из закаленной стали и соединялись между собой с помощью шариков. Такая конструкция исключала вибрации электрода и уменьшала погрешности при выравнивании режущей поверхности круга. Возратно-поступательные движения электрода осуществлялись от электродвигателя с редуктором с помощью кривошипно-шатунного механизма. Величину движения электрода регулировали увеличением или уменьшением штанги шатуна. Электродвигатель с редуктором имел небольшие габариты и легко устанавливался на приспособлении. Все устройство крепилось на столе станка. Врезная подача графитового электрода на алмазоносный слой круга осуществлялась с помощью пары "винт-гайка" по штифтовому направляющим. Длина этого перемещения составляла 1 ... 4 мм. С помощью винта можно вводить графитовый электрод в контакт с режущей поверхностью ограночного круга. Процесс электроэрозионной правки протекал при обильном охлаждении зоны правки с использованием технической воды. Принудительная подача жидкости осуществлялась от насосной станции (с использованием водяной помпы от заточного станка модели ЗД642Е). Для сбора отработанной жидкости под вращающимся ограночным кругом установлен специальный поддон, откуда вода поступает обратно в бачок насосной станции. Для исключения разбрызгивания жидкости при вращении круга используется защитный кожух. В качестве источника технологического тока электроэрозионной

правки применялся специальный импульсный генератор.

Электроэрозионная правка ограночных алмазных кругов с зернистостью 5 ... 10 мкм имеет свои особенности, связанные, прежде всего, с поддержанием необходимого зазора между электродом и правящей поверхностью круга. Решить эту задачу удалось путем использования электрода из графита и обильной подачи охлаждающей жидкости непосредственно в зону правки.

Электроэрозионная правка характеризуется переносом снятого материала связки алмазного круга на правящий электрод (на круг подается положительный заряд, а на электрод – отрицательный), который в застывшем виде накапливается в пазах электрода. Наступает такой момент, когда в отдельных местах он пережмает зазор между электродом и связкой круга. В результате резко увеличивается сила тока правки и на поверхности круга образуются борозды (за счет более интенсивного съема материала). При дальнейшей правке на режущей поверхности круга образуются значительные неровности. Описанный выше случай относится к правке электродом, изготовленным из металла. Устранить застывший на электроде материал связки сложно из-за небольшой величины выступания зерен. Данная задача успешно решается при использовании электрода из графита. Перенесенный на электрод материал связки легко отрывается от графитового электрода, т.к. температуры плавления графита и материала связки разные и между ними не происходит прочного сцепления.

Практика показывает, что при обработке природных алмазов все же эффективнее применять ограночные круги, изготовленные электрогальваническим методом. Это обусловлено меньшими затратами дорогостоящего алмазного порошка. Вместе с тем, изготовление ограночных кругов электрогальваническим методом является экологически вредным производством и поэтому ограничивает применение. Как отмечалось выше, вместо этих кругов следует применять специальные ограночные алмазные круги на металлических связках (связке М3-04 с характеристиками 6А2 300х60х5х50 АС6 10/7 4), изготовленные методом порошковой металлургии, с их периодической электроэрозионной правкой. Для этого определены оптимальные условия электроэрозионной правки ограночных алмазных кругов, обеспечивающие биение их режущей поверхности в пределах 0,01 мм, чего другими методами не достигалось [5]. Это позволило произвести эффективную замену алмазных кругов, изготовленных электрогальваническим методом, и

таким образом исключить их экологически вредное производство для осуществления операции огранки природных алмазов в бриллианты.

Метод электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках был использован при шлифовании блок-матриц для синтеза алмазного порошка. Блок-матрица состоит из стальной обоймы с запрессованной в нее твердосплавной камерой, в которой происходит процесс синтеза алмазного порошка. Для обеспечения плоскостности верхней части блок-матрицы выполняется ее шлифование алмазным кругом на плоскошлифовальном станке модели 3Г71. Совместная обработка стали и твердого сплава алмазным кругом 1А1 250х20х5 на органической связке, как показывает практика, приводит к его интенсивному износу и снижению производительности обработки. Применение алмазного круга на керамической связке позволяет в определенной степени повысить производительность обработки и снизить износ круга, однако полностью решить проблему высокопроизводительного шлифования не удалось. Проблема была решена за счет применения алмазного круга 1А1 300х20х5 на металлической связке М1-01 и его электроэрозионной правки. Для осуществления электроэрозионной правки была произведена модернизация плоскошлифовального станка, которая включала электроизоляцию алмазного круга и осуществление токоподвода к нему через графитовую щетку. В качестве правящего электрода сначала использовалась обрабатываемая деталь. В качестве источника технологического тока применялся специально изготовленный генератор импульсов.

Однако электроэрозионная правка алмазного круга непосредственно в процессе шлифования не позволила добиться ожидаемых результатов. Плотный контакт алмазного круга с обрабатываемой поверхностью, с одной стороны, приводил к существенному увеличению разрядного тока, а с другой стороны, вызывал интенсивное засаливание алмазного круга. Круг фактически не подвергался правке, его рабочая поверхность была полностью покрыта светло-серым слоем стальной стружки. Поэтому от такой идеи электроэрозионной правки алмазного круга пришлось отказаться. Вместо нее была предложена идея осуществления электроэрозионной правки с использованием ручного изолированного электрода. Первые опыты практической реализации данной идеи показали положительные результаты. Например, новый алмазный круг на металлической связке М1-01, который был установлен на станок и имел значительное биение рабочей поверхности, с помощью ручного электрода был подготовлен к

работе за небольшой промежуток времени. Суть электроэрозионной правки алмазного круга заключается в следующем. Изолированный Г-образный электрод прижимается к периферии круга в зоне интенсивного попадания на него охлаждающей жидкости. При этом не наблюдалось его отжатие в связи с отсутствием биения поверхности.

Электроэрозионной правкой в этом случае обеспечивалось быстрое очищение поверхности алмазного круга от продуктов обработки (стального налета) и вскрытие алмазоносного слоя. Время правки составило 5–7 секунд при силе тока 15–20 А. Для осуществления такой правки достаточно алмазный круг вывести из зоны обработки и исключить продольную подачу, что удобно для рабочего. Последующую правку круга необходимо осуществлять с появлением шума в зоне обработки, что является первым признаком засаливания круга. Установлено, что стойкость алмазного круга на металлической связке М1-01 после правки с использованием ручного изолированного электрода многократно увеличивается. Это позволяет эффективно производить шлифование твердосплавных блок-матриц при съеме больших припусков. Количество прошлифованных блок-матриц между правками круга при этом изменялось, однако, в основном из-за разной величины припуска.

Выводы. В работе обоснованы возможности эффективного применения электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках взамен традиционно применяемого метода электрохимической правки при шлифовании различных труднообрабатываемых материалов. Предложены новые конструктивные схемы осуществления электроэрозионной правки, которые позволяют существенно повысить его эффективность в производственных условиях, улучшить экологию производства. Приведены конкретные примеры реализации правки алмазных кругов на металлических связках в условиях огранки природных алмазов в бриллианты и твердосплавной оснастки синтеза искусственных алмазов.

Список литературы

1. *Беззубенко Н.К.* Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты» / *Н.К. Беззубенко.* – Харьков, 1995. – 56 с.
2. *Пахалин Ю.А.* Алмазная контактно-эрозионное шлифование. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 178 с.
3. *Мальхин В.В.* Повышение эффективности шлифования вольфрамсодержащих твердых сплавов совместно со сталью алмазными кругами: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / *Мальхин В.В.* – Харьков, 1985. – 266 с.
4. *Новиков Г.В.* Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / *Новиков Г.В.* – Харьков, 1989. – 210 с.
5. *Новиков Г.В.* Прогрессивные технологии алмазно-абразивной обработки природных алмазов в бриллианты / *Г.В. Новиков // Вісник НТУ «ХП».* Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП». – 2011. – № 40. – С. 72-90.
6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. *Ф.В. Новикова* и *А.В. Якимова.* В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т. 4. «Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов». – 802 с.

Bibliography (transliterated)

1. *Bezzubenko N.K.* Povyshenie effektivnosti almaznogo shlifovaniya putem vvedeniya v zonu obrabotki dopolnitelnoy energii v forme elektritheskikh razryadov: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk: spets. 05.03.01 «Protsestry mekhanitheskoy obrabotki, stanki i instrumenty» / *N.K. Bezzubenko.* – Kharkov, 1995. – 56 p.
2. *Pakhalin Yu.A.* Almaznaya kontaktno-erozionnoe ahlifovanie / *Yu.A. Pakhalin.* – Leningrad: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1985. – 178 p.
3. *Malykhin V.V.* Povyshenie effektivnosti shlifovaniya volframosoderzhashikh tverdykh splavov sovместno so staliiu almaznymi krugami: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01 / *Malykhin V. V.* – Kharkov, 1985. – 266 p.
4. *Novikov G.V.* Povyshenie effektivnosti almazno-iskrovogo shlifovaniya detaley s vysokoprothnymi pokrytiyami: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.08 / *G.V. Novikov.* – Kharkov, 1989. – 210 p.
5. *Novikov G.V.* Progressivnye tekhnologii almazno-abrazivnoy obrabotki prirodnykh almazov v brilianty / *G.V. Novikov // Visnyk NTU «KhP».* Zbirnyk naukovykh prats. Tematychny vypusk: Terhnologii v mashinobuduvanni. – Kharkiv: NTU «KhP». – 2011. – No 40. – P. 72-90.
6. *Fiziko-matematitheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya / Pod obsh. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova.* – V 10 tomakh. – Odessa: ONPU. – Vol. 4. «Teoriya abrazivnoy i almazno-abrazivnoy obrabotki materialov». – 802 p.

Поступила (received) 02.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Екологічні переваги застосування при шліфуванні електроерозійної правки алмазних кругів на металевих зв'язках замість електрохімічної правки / Ф. В. Новіков, Г. В. Новіков, С. О. Дитиненко, В. І. Полянський // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 38(1210). – С. 35–40. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

Экологические преимущества применения при шлифовании электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках взамен электрохимической правки / Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, С. А. Дитиненко, В.И. Полянский // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки

матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 35–40. –
Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2519-2671

**The environmental benefits of applying for grinding EDM dressing of diamond wheels on metal bonds instead
of electrochemical changes / F. V. Novikov, G. V. Novikov, S. A. Ditinenko, V.I. Polyansky // Bulletin of NTU «KhPI».**
Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv:
NTU «KhPI» – 2016. – No 38 (1210). – P. 35–40. – Bibliogr.: 6 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

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

Новіков Григорій Васильович – кандидат технічних наук, науковий співробітник, Науковий центр НТК
«Ельбор», м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

Новиков Григорий Васильевич – кандидат технических наук, научный сотрудник, Научный центр НТК
«Эльбор», г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

Novikov Grigory Vasiliviyth – PhD, Researcher, Research Center, STC "Elbor", Kharkiv; тел.: (0572) 69-55-62;
e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

Дитиненко Станіслав Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Природничі науки та
технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.:
(057) 7020265 (доп. 328); e-mail: kافتtech@hneu.edu.ua .

Дитиненко Станислав Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Естественные науки
и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков;
тел.: (057) 7020265 (доп. 328); e-mail: kافتtech@hneu.edu.ua .

Ditinenko Stanislav Aleksandrovich – PhD, associate professor of "Science and Technology" Kharkiv National
Economic University named after Semen Kuznets on Kharkiv; tel. (057) 7020265 (доп. 328); e-mail:
kافتtech@hneu.edu.ua .

Полянський Володимир Іванович – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ «Імперія
металів», м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com .

Полянский Владимир Иванович – кандидат технических наук, Генеральный директор, ООО «Империя
металлов», г. Харьков; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com .

Polyansky Vladimir Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, General Director of LLC "Empire Metals",
Kharkov; tel. : +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com .

УДК 621.75.06-52

*Е. Н. СМІРНОВ, В. А. СКЛЯР, Л. Ф. УРАЗОВА, Р. Е. ПИВОВАРОВ***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МАКРОСТРУКТУРЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ**

Розроблено математичну модель процесу прокатки безперервнолитої заготовки з дефектами макроструктури на гладкій бочці і в калібрах. В якості граничних умов задаються швидкості обертання валків, обмеження ступенів свободи заготовки і валків, а також коефіцієнт тертя на поверхні контакту валок-заготовка. Для гарячої прокатки допустимо розглядати прокатні валки як жорстке тверде тіло, що не деформується. Для матеріалу заготовки використовується пружно-пластична модель поведінки середовища. Розглядалось два випадки: бескалібрової прокатки на гладкій бочці і прокатки в прямокутному калібрі. Матеріал валків – сталь, поверхня гладка. Діаметр валків в обох випадках становив 600 мм. В якості вихідної заготовки була обрана безперервнолито заготовка перетином 150x150 мм, довжина заготовки становила 500 мм для того щоб виключити вплив зовнішніх зон. Центральна пористість моделювалася наскрізним отвором діаметром 4 мм, 6 мм і 8 мм. Зміна температури від контакту з валками і процесу деформації не враховувалися. В якості умов на контакті задавався коефіцієнт тертя рівний 0,4. Швидкість прокатки – 0,1 м/с. Величина абсолютного обтиску – 30 мм, 40 мм і 50 мм. На прикладі прокатки в першому проході обтискової групи стана проведений порівняльний аналіз бескалібрової прокатки і прокатки в калібрах. Показано що прокатка на гладкій бочці має потенціал для використання в разі прокатки безперервнолитої заготовки з дефектами макроструктури. Зроблено оцінку впливу основних параметрів прокатки: абсолютне обтиснення і температура на «заліковування» дефектів макроструктури.

Ключові слова: прокатка; дефекти; безперервнолито заготовка; математичне моделювання; обтисна кліть, калібр.

Разработана математическая модель процесса прокатки непрерывнолитой заготовки с дефектами макроструктуры на гладкой бочке и в калибрах. В качестве граничных условий задаются скорости вращения валков, ограничения степеней свободы заготовки и валков, а также коэффициент трения на поверхности контакта валок-заготовка. Для горячей прокатки допустимо рассматривать прокатные валки как жесткое недеформируемое твердое тело. Для материала заготовки используется упруго-пластическая модель поведения среды. Рассматривалось два случая: бескалибровая прокатка на гладкой бочке и прокатка в прямоугольном калибре. Материал валков – сталь, поверхность гладкая. Диаметр валков в обоих случаях составлял 600 мм. В качестве исходной заготовки была выбрана непрерывнолитая заготовка сечением 150x150 мм, длина заготовки составляла 500 мм для того чтобы исключить влияние внешних зон. Центральная пористость моделировалась сквозным отверстием диаметром 4 мм, 6 мм и 8 мм. Изменение температуры от контакта с валками и процесса деформации не учитывались. В качестве условий на контакте задавался коэффициент трения равный 0,4. Скорость прокатки – 0,1 м/с. Величина абсолютного обжатия – 30 мм, 40 мм и 50 мм. На примере прокатки в первом проходе обжимной группы стана произведен сравнительный анализ бескалибровой прокатки и прокатки в калибрах. Показано что прокатка на гладкой бочке имеет потенциал для использования в случае прокатки непрерывнолитой заготовки с дефектами макроструктуры. Произведена оценка влияния основных параметров прокатки: абсолютное обжатие и температура на «залечивание» дефектов макроструктуры.

Ключевые слова: прокатка; дефекты; непрерывнолитая заготовка; математическое моделирование; обжимная клеть, калибр.

A mathematical model of rolling process of continuous casting defects macrostructure on the smooth barrel in caliber. The boundary conditions are set rotational speed of the rolls, the degrees of freedom limits the workpiece and rolls, and the coefficient of friction on the contact surface of the roll-billet. For hot rolling mill rolls is permissible to consider how the rigid solid. For workpiece material used elastic-plastic model of behavior of the environment. Material rolls – steel, the surface is smooth. The diameter of the rollers in both cases was 600 mm. The mathematical model of process rolling in smooth rolls and in the calibers of billets with defects of the macrostructure is developed. The model takes into account the main parameters of the process, the presence of defects in the metal of the billets and can be used to model the behavior of defects of a macrostructure during the rolling in all stands of the rolling mill. For example rolling in the first pass, the crimp mill group made a comparative analysis non-caliber rolling and rolling in calibers. It is shown that rolling in smooth rolls has the potential for use in the case of a rolling continuous cast billets with defects of the macrostructure. The analysis of process of rolling billets with a defect "axial porosity" on smooth rolls in the first pass in crimp mill group is made, the influence of main rolling parameters: absolute reducing and the temperature to "heal" defects of the macrostructure is studied.

Keywords: rolling; defects; concast billet; mathematical modeling; breakdown mill, caliber.

Введение. В условиях постоянного инновационно-технологического развития и глобализации рынков перед предприятиями, производителями металлопроката, остро стоит проблема повышения эффективности производства и обеспечения выпуска конкурентоспособной продукции, востребованного качества.

Использование сортовой непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) малого сечения выявило целый ряд проблем, которые ранее не проявлялись при использовании горячекатаной. В наибольшей степени это характерно для случаев производства сортового проката из качественных

конструкционных и рессорно-пружинных марок сталей.

Постановка задачи. Дефекты НЛЗ формируются в процессе затвердевания и могут развиваться как внутри литой заготовки, так и на внешней поверхности. В большинстве случаев дефекты оказывают негативное влияние на производство, вызывая отбраковку или увеличение себестоимости производства в результате необходимости приведения заготовок в соответствие с требуемыми техническими условиями перед их прокаткой.

В зависимости от причин образования дефекты можно разделить на две группы [1]:

© Е. Н. Смирнов, В. А. Скляр, Л. Ф. Уразова, Р. Е. Пивоваров, 2016

– дефекты, специфичные для определенного ручья (встречаются только на одном ручье из-за проблем оборудования или его настроек, например, из-за дефектов кристаллизатора, нарушений вторичного охлаждения, неправильной настройки тянущих и правящих валков и др.);

– дефекты, специфичные для определенной плавки (связаны со свойствами жидкой стали и вызваны перегревом, наличием примесей, раскислением на этапе внепечной обработки стали).

Применительно к условиям производства металлопроката из НЛЗ, полученной в условиях высокоскоростных сортовых МНЛЗ с малым радиусом изгиба, усредненные цифры брака по видам имеют вид: нарушения геометрии НЛЗ – 36,4 %, дефекты макроструктуры – 17,2 %, трещины 31,9 %, шлаковые включения – 4,5 % [2]. На многих темплатах наблюдаются осевая пористость, ликвационные полосы и трещины, развитая столбчатая структура и асимметрия зон слитка.

В этой связи, вопросы, связанные с изучением поведения дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовки (усадочная раковина, газовые пузыри, осевая пористость) в процессе деформирования, имеют актуальный характер.

Данная работа выполнена в рамках гранта на проведение научно-исследовательских работ по приоритетным направлениям социальноэкономического развития Белгородской области за счет средств областного бюджета Белгородской области, номер проекта – 2015.01.5.

Состояние вопроса исследования. Для исследования поведения данных дефектов в последнее время широкое распространение получили методы математического (компьютерного) моделирования с использованием программных комплексов типа ANSYS, DEFORM, QFORM, ПЛАСТ и т.д. в которых моделирование осуществляется с помощью метода конечных элементов. При этом многообразие исследуемых процессов требует в каждом конкретном случае свой подход к методике моделирования.

Так в работе [3] представлены результаты моделирования процессов резки и винтовой прокатки сплошных заготовок в программном комплексе Deform-3D. Изучалось влияние на глубину утяжины диаметра заготовки, угла подачи, калибровки валков обжимного стана, а также исходной формы концов заготовок.

В работе [4] проводилось математическое моделирование процесса винтовой прошивки заготовок большого диаметра. Целью работы было исследование с помощью программного комплекса Deform-3D таких параметров, как напряженно-деформованное состояние

металла, накопленная деформация по объему заготовки, характер развития деформации, энергосиловые параметры, время прошивки и т.д.

Представляет большой интерес работа [5] в которой проводилось математическое моделирование процесса деформации металла в калибрах различной формы. В ходе исследования анализировалось влияние напряженно-деформированного состояния на течение деформированного металла в различных зонах сортовых калибров в зависимости от их формы. Для проведения моделирования также использовался программный комплекс Deform-3D.

В работе [6] исследовались задачи проектирования калибровки, с целью снижения потребления энергоресурсов и уменьшения вероятности образования дефектов.

Цель работы. Таким образом, целью работы была разработка математической модели и проведение исследования особенностей поведения дефектов макроструктуры непрерывнолитого металла в процессе прокатки.

Методика моделирования. Для математического моделирования поведения дефектов макроструктуры во время прокатки был использован программный комплекс компьютерного моделирования с помощью метода конечных элементов Deform-3D.

Процесс прокатки является достаточно сложным для моделирования так как совмещает в себе вращательное движение валков и поступательное движение заготовки. Для получения корректных результатов необходимо точное позиционирование заготовки относительно прокатных валков и учет условий трения на контакте [7]. Также необходимо обеспечить захват заготовки валками.

В качестве граничных условий задаются скорости вращения валков, ограничения степеней свободы заготовки и валков, а также коэффициент трения на поверхности контакта валок-заготовка.

Для горячей прокатки допустимо рассматривать прокатные валки как жесткое недеформируемое твердое тело. Для материала заготовки используется упруго-пластическая модель поведения среды.

Рассматривалось два случая: бескалибровая прокатка на гладкой бочке и прокатка в прямоугольном калибре. Материал валков – сталь, поверхность гладкая. Диаметр валков в обоих случаях составлял 600 мм.

В качестве исходной заготовки была выбрана непрерывнолитая заготовка сечением 150x150 мм, длина заготовки составляла 500 мм для того чтобы исключить влияние внешних зон. Центральная

пористість моделювалась сквозним отверстием диаметром 4, 6 и 8 мм.

Внешний вид модели после импорта в программный комплекс Deform-3D и осуществления позиционирования заготовки относительно валков приведен на рис. 1. Геометрическая модель заготовки разбивалась на 70000 тетраэдральных конечных элементов. В качестве модели поведения материала НЛЗ была выбрана упруго-пластическая модель. В качестве материала была выбрана сталь 45.

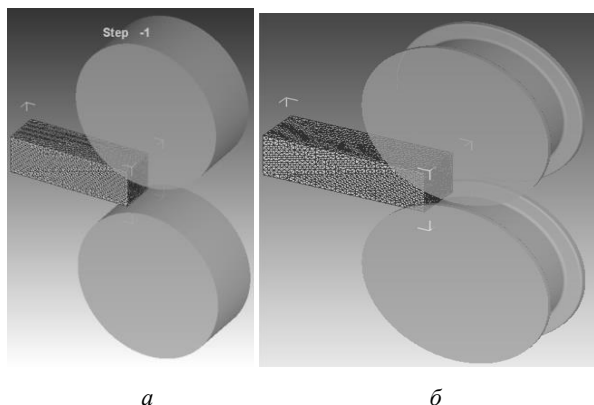


Рис. 1 – Геометрическая модель прокатки:
а – в гладких валках; б – прямоугольном калибре

Температура прокатки заготовки принималась равной по всему сечению заготовки и составляла 1000, 1100 и 1200 °С. Изменение температуры от контакта с валками и процесса деформации не учитывались. В качестве условий на контакте задавался коэффициент трения равный 0,4. Скорость прокатки – 0,1 м/с. Величина абсолютного обжатия – 30, 40 и 50 мм. Для обеспечения захвата заготовки валками прикладывалось кратковременное заталкивающее усилие к торцу заготовки [8].

Анализ результатов исследования. В качестве выходных параметров для анализа процесса прокатки НЛЗ с дефектами макроструктуры в гладких валках были выбраны: абсолютная высотная деформация Δh_i , интенсивность деформации ε_i , интенсивность напряжений σ_i и степень накопленной деформации Λ . Считывание указанных параметров из компьютерной модели производилось для 4 точек, расположенных по высоте заготовки: P1 – обжимаемая грань заготовки, P2 – $\frac{1}{4}$ высоты заготовки, P3 – начало зоны осевой пористости; P4 – ось заготовки. Оценка эффективности процесса выкатки осевой пористости оценивалась с точки зрения максимального сокращения ее размеров и создания благоприятного напряженно-деформированного состояния.

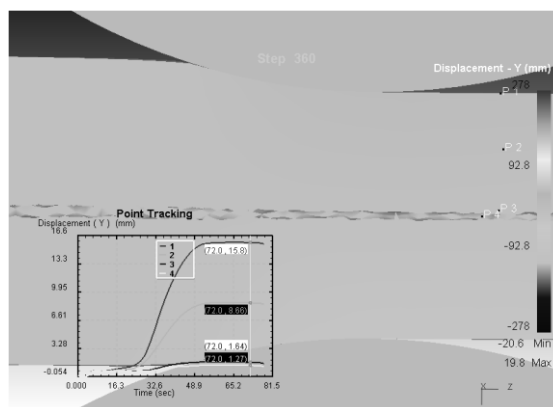
Рассмотрим сравнительный анализ процесса прокатки в калибрах и на гладкой бочке для

следующего сочетания факторов: температура прокатки $T_{II}=1200$ °С, абсолютное обжатие $\Delta h=30$ мм.

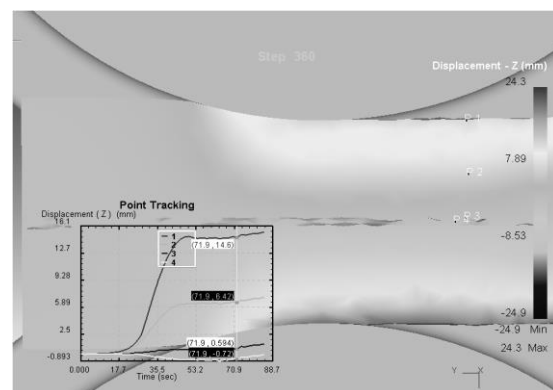
Сравнительный анализ характера проникновения деформации в осевую зону заготовки показан на рис. 2.

Данные расчетов свидетельствуют, что проникновение высотной деформации в осевую зону заготовки, а, следовательно, и сокращение размеров осевой пористости больше в случае прокатки на гладкой бочке: 1,6 мм против 0,6 мм. Аналогичный эффект наблюдался и в случае установки температуры прокатки на уровне 1000 и 1100 °С. Что позволяет сделать вывод о предпочтительном использовании прокатки на гладкой бочке в первых проходах обжимной группы прокатного стана.

Распределение интенсивности напряжений, показано на рис. 3. Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что уровень возникающих напряжений при прокатке на гладкой бочке в 1,1...1,3 раза меньше чем при прокатке в калибрах.

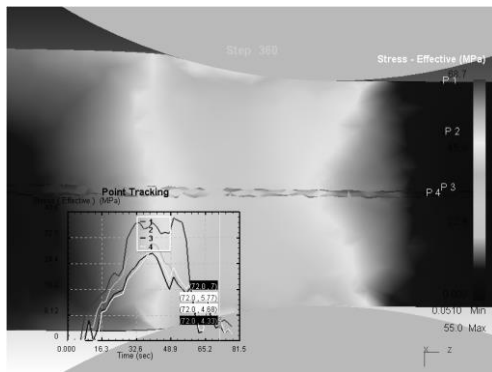


а

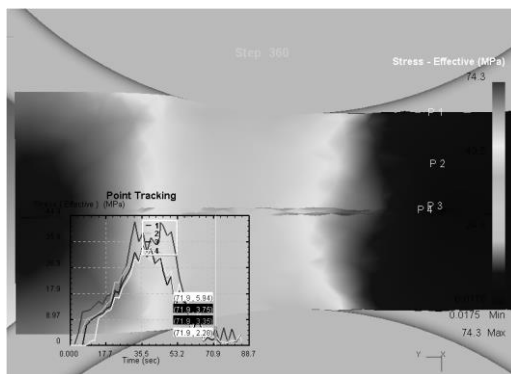


б

Рис. 2 – Распределение абсолютной деформации по высоте раската ($T_{II}=1200$ °С, $\Delta h=30$ мм) при прокатке:
а – на гладкой бочке; б – в прямоугольном калибре



a



б

Рис. 3 – Распределение интенсивности напряжений по высоте раската ($T_p=1200\text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta h=30\text{ мм}$) при прокатке:
а – на гладкой бочке; б – в прямоугольном калибре

Таким образом, в результате предварительных расчетов можно сделать предположение о имеющемся потенциале бескалибровой прокатки в случае использования заготовок с дефектами макроструктуры, так как такая прокатка характеризуется

большим проникновением высотной деформации в осевую зону слитка и более благоприятным напряженно-деформированным состоянием.

С учетом вышесказанного для первичного исследования поведения дефектов макроструктуры при прокатке был выбран случай прокатки на гладкой бочке. Результаты расчетов приведены на рис. 4.

В результате анализа полученных зависимостей можно сделать вывод о том, что с точки зрения максимального сокращения размеров осевой пористости наиболее благоприятными будут температура прокатки $1000\text{ }^\circ\text{C}$ и абсолютное обжатие 50 мм . В этом случае размеры осевой пористости сокращаются до минимального и будут устранены в течение последующих проходов. В то же время, как, например, при абсолютном обжатии 30 мм , наиболее благоприятной температурой прокатки является $1200\text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом о наиболее рациональном сочетании данных факторов можно говорить в случае дополнительного анализа возможностей оборудования и экономических факторов.

Анализ влияния факторов прокатки на напряженное состояние свидетельствует, что большее влияние на величину возникающих напряжений оказывает температура прокатки, в то время как влияние абсолютного обжатия меньше. В любом случае меньший уровень напряжений наблюдается при превышении температуры прокатки до $1200\text{ }^\circ\text{C}$ и снижении абсолютного обжатия до 30 мм .

Аналогичная картина наблюдается и на зависимостях накопленной степени деформации, однако здесь влияние температуры меньше чем влияние абсолютного обжатия.

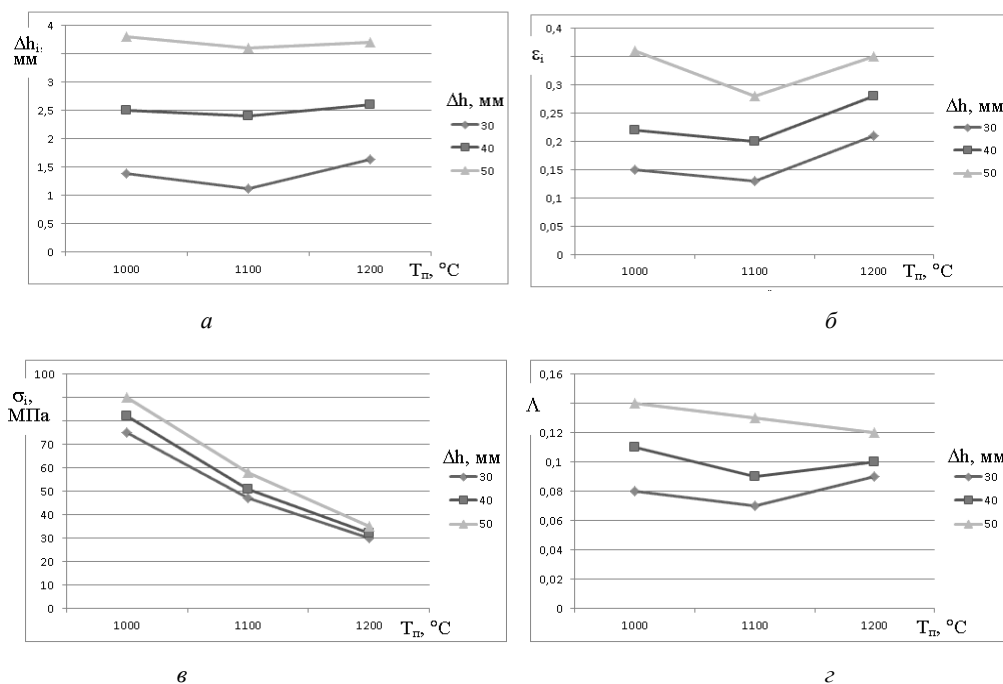


Рис. 4 – Зависимости от величины абсолютного обжатия и температуры прокатки:

а – проникновения высотной деформации; б – интенсивности деформации; в – интенсивности напряжений; г – накопленной степени деформации

Выводы. Разработана математическая модель процесса прокатки НЛЗ с дефектами макроструктуры на гладкой бочке и в калибрах. На примере прокатки в первом проходе обжимной группы стана произведен сравнительный анализ бескалибровой прокатки и прокатки в калибрах. Показано что прокатка на гладкой бочке имеет потенциал для использования в случае прокатки НЛЗ с дефектами макроструктуры. Произведена оценка влияния основных параметров прокатки: абсолютное обжатие и температура на «залечивание» дефектов макроструктуры.

Список литературы

1. Ботников С. А. Современный атлас дефектов непрерывной заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла / С. А. Ботников. – Волгоград, 2011. – 97 с.
2. Качество непрерывных заготовок / П. О. Быков, Г. М. Никитин, Р. И. Сержанов [и др.] // Труды Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы горно-металлургического комплекса Казахстана», 6–7 декабря 2007 г. – Караганда, 2007. – С. 379–383.
3. Исследование нестационарной стадии винтовой прокатки непрерывных заготовок на трехвалковом обжимном стане / Ю. В. Бодров, Д. В. Овчинников, В. Я. Устьянцев, А. А. Богатов // Труды XVII международной научно-технической конференции «ТРУБЫ – 2009». – 2009. – С. 287–288.
4. Романенко В. П. Моделирование процесса винтовой прошивки заготовок большого диаметра в двухвалковом стане методом конечных элементов / В. П. Романенко, Д. В. Сизов // Известия

высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2011. – С. 36–40.

5. Кадыков В. Н. Моделирование процессов формоизменения дефектов при прокатке в калибрах / В. Н. Кадыков, А. А. Уманский, Ю. А. Мартянов // Металлургия: Технологии, управление, инновации, качество. Сборник трудов всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2011. – С. 146–151.
6. Кинзин Р. И. Использование программного комплекса DEFORM-3D при моделировании процессов сортовой прокатки / Р. И. Кинзин, С. С. Рычков // Вестник МГТУ им. Носова. – 2011. – С. 45–48.
7. Скляр В. А. Конечно-разностные методы в обработке металлов давлением. Конспект лекций для студентов специальности 22.04.02. / В. А. Скляр, Е. Н. Смирнов. – Старый Оскол, 2016. – 68 с.
8. Шляпугин А. Д. Моделирование и оптимизация технологических процессов ОМД / Д. А. Шляпугин. – Самара, 2010. – 46 с.

Bibliography (transliterated)

1. Botnikov S. A. Sovremennyy atlas defektov nepreryvnoy zgotovki i prichiny vznikoventiya proryvov kristallizuyushchey korochki metalla [Modern atlas of defects billets and causes breakouts of crystallized crust metal]. Volgograd, 2011. 97 p.
2. Bykov P. O., Nikitin G. M., Serzhanov R. I. et al. Kachestvo nepreryvnykh zgotovok [The quality of continuous cast billets] Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa Kazakhstana» [Proceedings of the International scientific-practical conference «Actual problems of mining and metallurgical complex of Kazakhstan»]. Karaganda, 2007, pp. 379–383.
3. Bodrov Yu. V., Ovchinnikov D. V., Ust'yantsev V. JI., Bogatov A. A. Issledovanie nestatsionarnoy stadii vintovoy

- prokatki nepreryvnolytykh zagotovok na trekhvalkovom obzhimnom stane [Study of transient stages helical rolling continuously cast billets on a three-roll mill] // Trudy XVII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Proceedings of the XVII international scientific-technical conference]. 2009, pp. 287–288.
- Romanenko V. P., Sizov D. V. Modelirovanie protsessov vintovoy proshivki zagotovok bol'shogo diametra v dvukhvalkovom stane metodom konechnykh elementov [Modeling of the process of the firmware screw workpieces of a large diameter two-roll mill in the mill by finite element method] Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya. [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2011, pp. 36–40.
 - Kadykov V. N., Umanskiy A. A., Mart'yanov Yu. A. Modelirovanie protsessov formoizmeneniya defektov pri prokatke v kalibrakh [Simulation of forming defects during rolling in calibers] Metallurgiya: Tekhnologii, upravlenie, innovatsii, kachestvo. Sbornik trudov vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy

- konferentsii [Metallurgy: Technology, management, innovation, quality. Proceedings of all-Russian scientific-practical conference.]. Novokuznetsk, 2011, pp. 146–151.
- Kinzin R. I., Rychkov S. S. Ispol'zovanie programmno kompleksa DEFORM-3D pri modelirovanii protsessov sortovoy prokatki [The use of program complex DEFORM-3D in the modeling of processes of long steel rolling]. Vestnik MGTU im. Nosova, 2011, pp. 45–48.
 - Sklyar V. A., Smirnov E. N. Konechno-raznostnye metody v OMD. Konspekt lektsiy dlya studentov spetsial'nosti 22.04.02 [Finite-difference methods in metal forming. The abstract of lectures for students majoring 22.04.02.]. Staryy Oskol, 2016, 68 p.
 - Shlyapugin A. D. Modelirovanie i optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov OMD [Modeling and optimization of technological processes of metal forming]. Samara, 2010, 46 p.

Поступила (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Математическое моделирование поведения дефектов макроструктуры непрерывнолитого металла в процессе прокатки/ Е. Н. Смирнов, В. А. Скляр, Л. Ф. Уразова, Р. Е. Пивоваров // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 41–47. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Математическое моделирование поведения дефектов макроструктуры непрерывнолитого металла в процессе прокатки/ Е. Н. Смирнов, В. А. Скляр, Л. Ф. Уразова, Р. Е. Пивоваров // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 41–47. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Mathematical modeling of the behavior of defects macrostructure of the continuous cast metal in the rolling process/ Y. N. Smyrnov, V. A. Skliar, L. F. Urazova, R. Y. Pivovarov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 38 (1210). – P. 41–47. – Bibliogr.: 8 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Смирнов Евгений Николаевич – доктор технических наук, профессор, Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», профессор, тел.: +7(980) 388-74-89; e-mail: en_smirnov@i.ua.

Смирнов Євген Миколайович – доктор технічних наук, професор, Старооскольський технологічний інститут ім. А. А. Угарова (філія) федерального державного автономного освітнього закладу вищої освіти «Національний дослідницький технологічний університет «МІСіС», професор, тел.: +7(980) 388-74-89; e-mail: en_smirnov@i.ua.

Smyrnov Yevgen – Dr. of Engineering Science, Professor, Stary Oskol Technological Institute. A. A. Ugarov (Branch) Of Federal State Autonomous Educational Institution Of Higher Professional Education "National Research Technological University "MISIS", Professor, tel.: +7(980) 388-74-89; e-mail: en_smirnov@i.ua.

Скляр Виталий Александрович – кандидат технических наук, доцент, Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», доцент, тел.: +7(980) 387-17-24; e-mail: konfor1@yandex.ru.

Скляр Віталій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Старооскольський технологічний інститут ім. А. А. Угарова (філія) федерального державного автономного освітнього закладу вищої освіти «Національний дослідницький технологічний університет «МІСіС», доцент, тел.: +7(980) 387-17-24; e-mail: konfor1@yandex.ru.

Skliar Vitalii – PhD, docent, Sary Oskol Technological Institute. A. A. Ugarov (Branch) Of Federal State Autonomous Educational Institution Of Higher Professional Education "National Research Technological University "MISIS", Associate professor, tel.: +7(980) 387-17-24; e-mail: konfor1@yandex.ru.

Уразова Людмила Федоровна – Старооскольський технологічний інститут ім. А. А. Угарова (філіал) федерального державного автономного освітнього закладу вищої освіти «Національний дослідницький технологічний університет «МІСіС», старший викладач.

Уразова Людмила Федорівна – Старооскольський технологічний інститут ім. А. А. Угарова (філія) федерального державного автономного освітнього закладу вищої освіти «Національний дослідницький технологічний університет «МІСіС», старший викладач.

Urazova Lyudmila Fedorovna – Sary Oskol Technological Institute. A. A. Ugarov (Branch) Of Federal State Autonomous Educational Institution Of Higher Professional Education "National Research Technological University "MISIS", senior lecturer.

Пивоваров Роман Євгенєвич – Старооскольський технологічний інститут ім. А. А. Угарова (філіал) федерального державного автономного освітнього закладу вищої освіти «Національний дослідницький технологічний університет «МІСіС», аспірант.

Пивоваров Роман Євгенович – Старооскольський технологічний інститут ім. А. А. Угарова (філія) федерального державного автономного освітнього закладу вищої освіти «Національний дослідницький технологічний університет «МІСіС», аспірант.

Pivovarov Roman Evgenievich – Sary Oskol Technological Institute. A. A. Ugarov (Branch) Of Federal State Autonomous Educational Institution Of Higher Professional Education "National Research Technological University "MISIS", PhD student.

УДК 620. 179. 16; 620. 179. 17

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, Р. П. МИГУЩЕНКО, Г. М. СУЧКОВ, О. Н. ПЕТРИЩЕВ, А. В. МИТИН

ОБНАРУЖЕНИЕ ИМПУЛЬСАМИ ВОЛН РЕЛЕЯ НЕСПЛОШНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ, ИМЕЮЩИХ СЛОЖНУЮ ФОРМУ

У статті наводиться експериментальне дослідження в області ультразвукової дефектоскопії. Встановлено, що при відображенні поверхневої хвилі про-виходить трансформація хвилі Релея на кромці виробу. Експериментально підтверджено факт формування поверхневої хвилі за межами гострої кромки. Для збудження і прийому імпульсів хвиль Релея традиційно застосовували п'єзоелектричні перетворювачі, однак їх точність недостатня через застосування контактної рідини. Підтверджено ефективність застосування сумішених ЕМА-перетворювачів для виявлення поверхневих дефектів і виявлення дефектів поверхні за межами різкої зміни форми поверхні об'єкта контролю. Виявлено умови прийняття максимального сигналу від поверхневої хвилі.

Ключові слова: ультразвукове дослідження, хвилі Релея, ЕМА перетворювачі, об'єкт контролю, трансформація хвилі.

В статье приводится экспериментальное исследование в области ультразвуковой дефектоскопии. Установлено, что при отражении поверхностной волны происходит трансформация волны Релея на кромке изделия. Экспериментально подтвержден факт формирования поверхностной волны за пределами острой кромки. Для возбуждения и приема импульсов волн Релея, традиционно применяли пьезоэлектрические преобразователи, однако их точность недостаточна из-за применения контактной жидкости. Подтверждена эффективность применения совмещенных ЭМА-преобразователей для обнаружения поверхностных дефектов и выявляемость дефектов поверхности за пределами резкого изменения формы поверхности объекта контроля. Выявлены условия принятия максимального сигнала от поверхностной волны.

Ключевые слова: ультразвуковое исследование, волны Релея, ЭМА преобразователи, объект контроля, трансформация волны.

The article presents an experimental research in the field of ultrasonic testing. It is established that the reflection of the surface wave is based on the transformation of Rayleigh wave on the edge of the item. Rayleigh waves have the advantage, due to relatively little attenuation as they propagate along the surface of the material, including those having a curved shape. Experiments confirmed the fact of the formation of surface waves beyond the sharp edge. For the excitation pulse and receiving of Rayleigh waves, conventionally piezoelectric transducers are used. This type of converters involves the use of contact fluid for signal transmission. This factor leads to a significant reduction of accuracy and limits the usefulness of the piezoelectric transducers in the inspection. It is possible to eliminate the above contradiction by applying methods of surface excitation and reception of ultrasonic pulses without couplant, such as, for example, – electromagnetic acoustic transducer. The efficacy of combined EMA-transducers for detecting surface defects and surface defects detection outside the abrupt change in the surface shape of the object of control is affirmed. The conditions for the adoption of maximum signal of the surface wave.

Keywords: ultrasound, Rayleigh wave, EMA transducers, monitoring object, the transformation of the wave.

Введение. Поверхностные волны Релея используются в области неразрушающего ультразвукового контроля (УЗК) изделий [1–3] достаточно давно. Они имеют преимущество, обусловленное относительно небольшим ослаблением при их распространении по поверхности материала, в том числе имеющих криволинейную форму. Это позволяет осуществлять высокопроизводительный контроль.

Для возбуждения и приема импульсов волн Релея, традиционно применяли пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) [1–4]. Для эффективной работы ПЭП, для передачи ультразвуковых импульсов к объекту контроля (ОК) и обратно, необходимо применять контактную жидкость. Ее применение необходимо, но приводит к существенному недостатку. Наличие капель контактной жидкости на поверхности ОК приводит к появлению ложных отраженных сигналов [1], что, соответственно, может привести к ложной браковке изделия. Т.е. имеется противоречие. С одной стороны поверхностные волны обеспечивают высокую производительность, а с другой им свойственна низкая помехозащищенность.

Исключить указанное противоречие возможно за счет применения способов возбуждения и приема поверхностных ультразвуковых импульсов без применения контактной жидкости, например,

например, электромагнитно – акустического (ЭМА) [5–6].

Конструкция некоторых металлоизделий предусматривает наличие торцов, углов, пазов, на поверхности которых также могут быть опасные дефекты. Поэтому задача по обнаружению дефектов поверхности ЭМА преобразователями (ЭМАП) с использованием волн Релея является актуальной.

Цель работы. Исследовать возможность обнаружения поверхностных дефектов волнами Релея за границей резкого излома формы поверхности контролируемого изделия.

Основная часть. Для выполнения экспериментальных исследований разработан стенд, блок-схема которого показана на рис. 1. Стенд содержит возбуждающий ЭМАП 1, основу которого составляют источник поляризующего магнитного поля 2 и высокочастотная катушка индуктивности 3 (индуктор). Индуктор 3 питается от генератора 4 зондирующих импульсов (ГЗИ) пакетными импульсами с заданным количеством периодов высокой частоты заполнения. Возбуждающий ЭМАП 1 с небольшим зазором располагается над объектом контроля (ОК) 5. Зазор моделировался диэлектрической прокладкой толщиной 0,5 мм. В качестве ОК 5 был выбран образец, изготовленный из металлической плиты из стали 09Г2С, имеющий кромку 6 (изгиб -90°, наиболее часто встречающийся на практике).

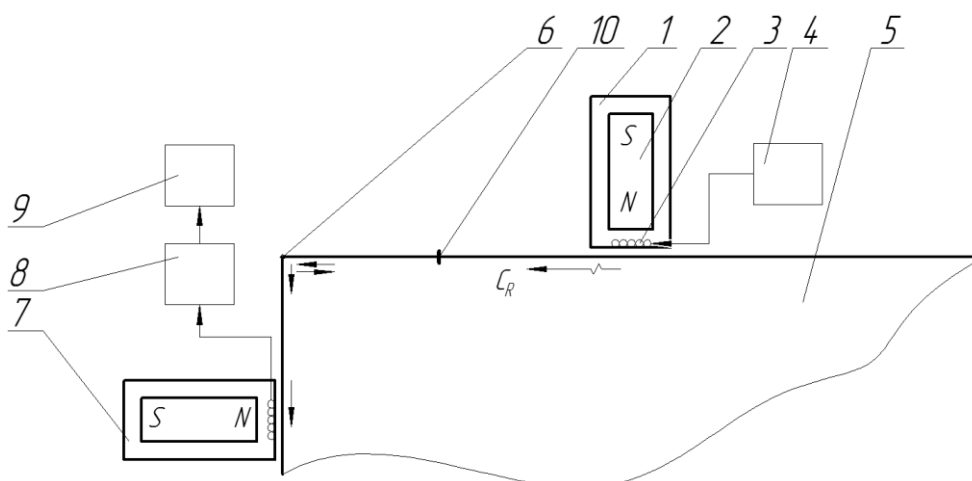


Рис. 1 – Блок схема для исследований возможности распространения импульсов волн Релея за границу резкого изменения формы поверхности металла: 1 – возбуждающий ЭМАП; 2 – магнитное поле; 3 – катушка индуктивности; 4 – генератор зондирующих импульсов; 5 – объект контроля; 6 – кромка; 7 – ЭМАП; 8 – усилитель; 9 – осциллограф; 10 – поверхность образца

Прием импульсов волн Релея осуществлялся ЭМАП 7, аналогичный по конструкции возбуждающему. Индуктор ЭМАП 7 подключен к малошумящему усилителю 8. Усиленный сигнал с малошумящего усилителя 8 визуализируется осциллографом 9. ЭМАП 7 располагали над торцом плиты с небольшим зазором. Зазор моделировался диэлектрической прокладкой толщиной 0,5 мм.

При проведении экспериментальных исследований реализована следующая методика. Возбуждающий ультразвуковые волны Релея ЭМАП 1 размещался на поверхности 10 образца 5 на заданном расстоянии от торца 6. Возле ЭМАП 1, со стороны исследуемого торца 6, размещался приемный ЭМАП 7. Приемный ЭМА преобразователь 7 был настроен на ту же частоту, что и возбуждающий ЭМАП 1. Для подмагничивания применялось нормальное магнитное поле с индукцией 0,4 Тл. Длительность питающих ЭМАП 1 пакетов импульсов высокочастотного тока выбиралась в пределах 6–8 периодов. Ток в индукторе 3 излучающего ЭМА

преобразователя 1 формировался транзисторным ГЗИ и достигал 20 А. При этом напряжение на индукторе 3 ЭМАП 1 составляло 700 В. Частота тока, питающего ЭМАП 1 устанавливалась равной 0,22 МГц, исходя из конструктивных особенностей преобразователя. В процессе исследований ЭМАП 7 перемещался от ЭМАП 1 до кромки 6 ОК 5 вдоль поверхности 10. Принятые ЭМАП 7 ультразвуковые импульсы волн Релея усиливались малошумящим усилителем 8 и отображались на экране осциллографа С1-65А. Результаты измерений амплитуды принятых импульсов относительно шума приведены на рис. 2.

Анализ результатов, приведенных на рис. 2, показал, что на близком к кромке расстоянии принятый сигнал претерпевает довольно резкие изменения. Эти осцилляции можно объяснить наложением волн пришедших от излучающего ЭМА преобразователя и волн, отраженных от кромки изделия.

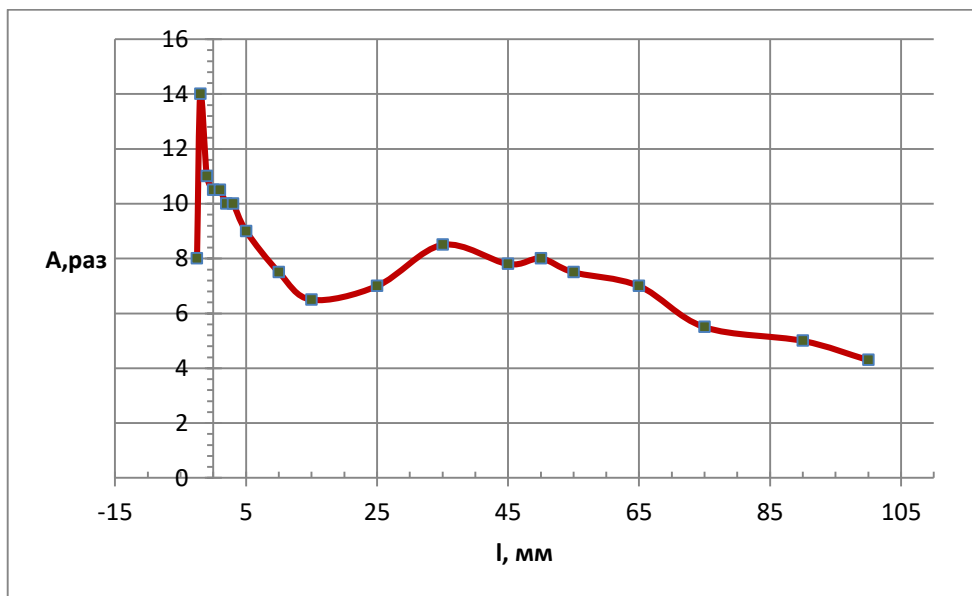


Рис. 2 – Влияние расстояния L между излучающим и приемным ЭМАП на отношение амплитуд поверхностной волны и шума при наличии кромки изделия. Отсчет расстояния – от кромки изделия

Следует отметить интересную особенность. При перемещении приемного ЭМАП 7 вдоль плоскости поверхности 10 за пределы кромки изделия т.е. вне металла, сигнал также присутствует и вблизи кромки может даже превышать сигнал, принятый на металле. Это говорит о том, что кроме сложения сигналов пришедших от излучающего преобразователя и отраженного от кромки ОК, к сумме добавляются, при совпадении фазы, и сигнал, распространяющийся по поверхности 11 вдоль

торца изделия 5. Проверка этого предположения осуществлена путем перемещения приемного ЭМАП 7 вдоль поверхности 11 торца ОК. Полученные данные подтверждают существование поверхностной волны Релея со значительной амплитудой, распространяющейся за резким изломом формы поверхности контролируемого изделия, рис.3. Проведены также исследования для частот волн Релея 0,5; 0,8 и 1 МГц. Полученные результаты аналогичны описанным выше.

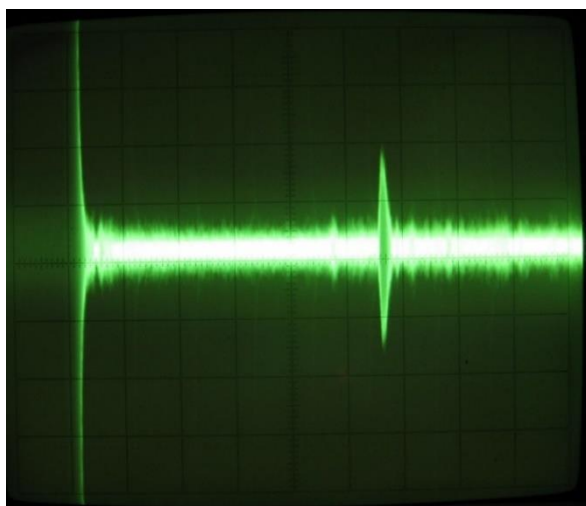


Рис. 3 – Временная развертка на экране осциллографа с сигналом волны Релея, принятом на торце образца. 1 – зондирующий импульс; 2 – импульс, прошедший на торцевую поверхность ОК

Поскольку на практике доступ к поверхности торца изделия не всегда возможен, выполнены исследования по получению отраженных сигналов

от его второй кромки, рис.4, лежащей на расстоянии 30 мм от первой по пути распространения поверхностных волн

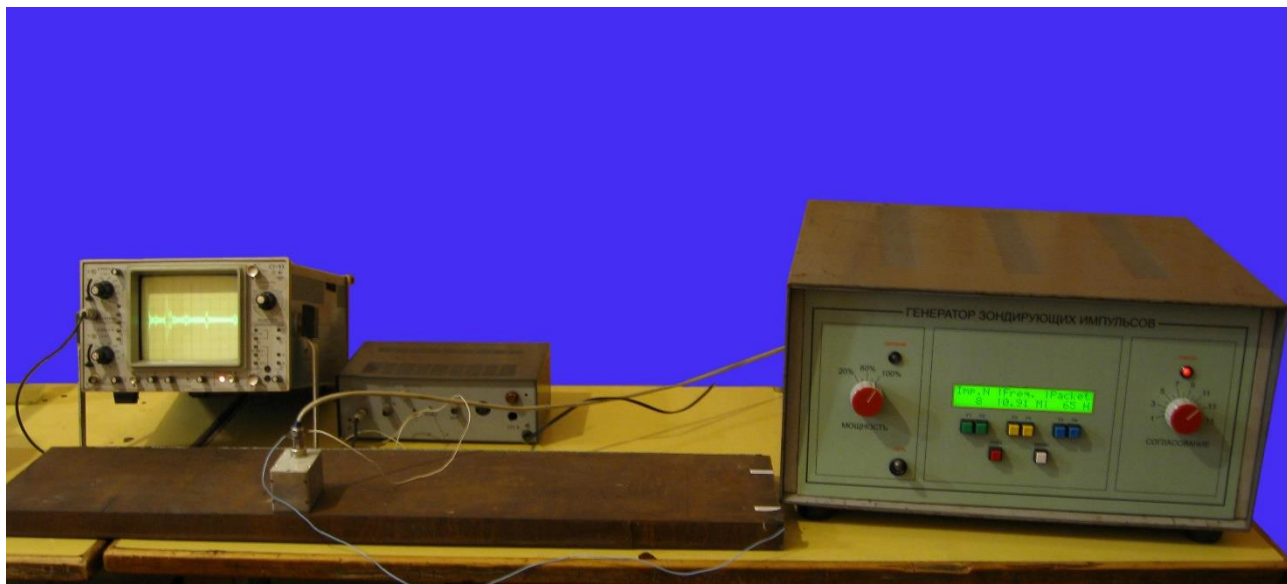


Рис. 4 – Стенд для исследования распространения и отражения поверхностной волны от моделей отражателей, лежащих за резкими изломами формы поверхности изделия

Объектом для исследований служил образец 1, изготовленный из листа толщиной 30 мм, сталь 09Г2С. Поверхность образца ржавая. Применен совмещенный ЭМАП 2, который питали током 20 А от мощного ГЗИ 3. Частота ультразвуковых колебаний – 1 МГц. Индукция поляризующего магнитного поля создавалась постоянным магнитом на основе керамики NeFeB и равнялась 0,75 Тл. Диэлектрический зазор между индуктором ЭМАП и металлом составлял 0,2 мм. Усиление принятого сигнала выполнялось малошумящим усилителем 4. Отображение принятой информации в виде временной развертки фиксировалось на экране осциллографа С1-86.

Выполненные исследования показали, что амплитуды эхоимпульсов отражённых от первой по ходу луча кромки ОК и второй кромки торца относительно амплитуды шума составляли около 30 и 20 раз соответственно. При измерениях наблюдался импульс второго переотражения между кромками торца, относительная амплитуда которого достигала 7 раз.

Из приведенного анализа следует несколько важных выводов:

1. При отражении поверхностной волны происходит трансформация волны Релея на кромке изделия, приводящая к переизлучению этой волны вдоль резкого излома формы поверхности ОК.

2. Формирование поверхностной волны за пределами острого торца изделия дает принципиальную возможность проводить обнаружение поверхностных дефектов при использовании, например, совмещенных ЭМА преобразователей волн Релея.

3. Поскольку на торце изделия принимается максимальный сигнал от поверхностной волны, то в дальнейшем целесообразно изучить возможность увеличения амплитуды и излучаемого импульса при условии, что излучающий или (и) приемный ЭМАПы будет располагаться над торцом изделия.

Окончательное решение о возможности обнаружения дефектов на торце изделия возможно путем проведения соответствующих экспериментов. Для их выполнения был разработана схема, рис. 5.

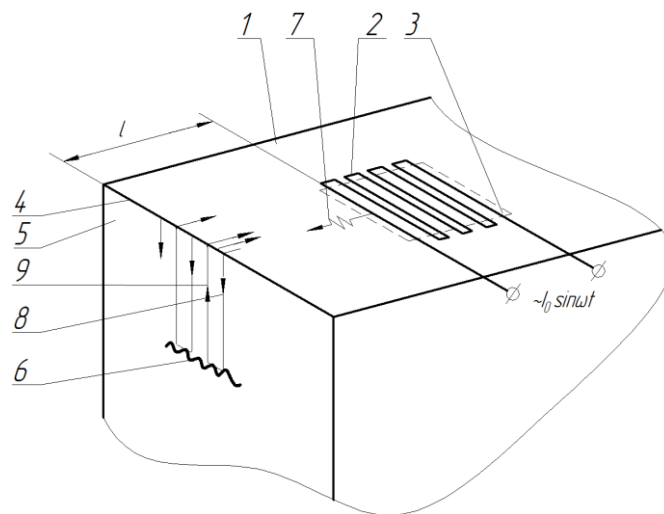


Рис. 5 – Схема обнаружения дефектов типа «трещина», которые располагаются на торце изделия: 1 – объект контроля; 2 – индуктор; 3 – магнитное поле; 4 – кромка; 5 – торец; 6 – дефект; 7, 8 – волна; 9 – импульс

Согласно рис. 5 на поверхности объекта контроля 1 располагается ЭМАП с индуктором 2, выполненным в виде зигзагообразной высокочастотной катушки индуктивности. Расстояние между соседними проводниками индуктора 2 равно половине длины волны Релея. Индуктор 2 располагается над металлом на расстоянии до 0,5 мм. К зоне действия индуктора 2 к поверхности ОК 1 прикладывается поляризующее магнитное поле 3 (оконтурено черточками). ЭМАП располагается на поверхности ОК 1 на расстоянии l от торца 4, достаточным для получения отраженного от торца 4 импульса, отделяющегося на временной развертке от зондирующего импульса. Эти величины связаны выражением

$$l = C_r \cdot (t_1 + t_2)$$

где C_r – скорость распространения волн Релея, мм/мкс;

t_1 – время распространения импульса волн Релея от ЭМАП до торца ОК, мкс;

t_2 – длительность зондирующего импульса тока, питающего ЭМАП, мкс.

С другой стороны расстояние l не должно быть большим, т.к. его существенное увеличение может привести к уменьшению чувствительности выявления дефектов на торце 5 ОК 1.

Для исследований использован образец из плиты, изготовленный из стали 09Г2С, на торце которого была изготовлена модель дефекта 6 типа «трещина» в виде паза глубиной 2,5 мм и раскрытием 0,5 мм.

Выявление дефекта 6 осуществляется следующим образом. В индукторе 2 возбуждался импульсный пакет тока в 20 А длительностью 8 периодов частоты заполнения с помощью мощного ГЗИ [7]. От индуктора 2 в сторону кромки 4 распространяется поверхностная волна 7. На кромке 4 волна 7 частично отражается в обратном направлении, а часть волны 8 распространяется по поверхности торца 5 до дефекта 6. Частично импульс 9 отражается от дефекта 6 и распространяется до кромки, а затем к индуктору 2, проводники которого включены по схеме, приведенной в работе [8], рис. 6. По времени появления отраженного сигнала можно определить наличие дефекта на торце изделия и его эквивалентную величину [1–4].



Рис. 6 – Временная развертка на экране осциллографа при обнаружении дефекта на поверхности торца изделия

Выводы.

1. Установлено, что при отражении поверхностной волны происходит трансформация волны Релея на кромке изделия, приводящая к переизлучению этой волны перпендикулярно резкому излому формы поверхности ОК.

2. Экспериментально подтверждено факт формирования поверхностной волны за пределами острой кромки изделия, что дает принципиальную возможность проведения эффективного ультразвукового контроля.

3. Подтверждена эффективность применения совмещенных ЭМА преобразователей для обнаружения поверхностных дефектов импульсами волн Релея на торцах ОК при изменении формы его поверхности на 90°.

4. Экспериментально подтверждена выявляемость дефектов поверхности за пределами резкого изменения формы поверхности объекта контроля.

5. Установлено, что на кромке изделия принимается максимальный сигнал от поверхностной волны. Этот эффект обусловлен суперпозицией падающей, отраженной и трансформированной на кромке волн.

В дальнейших исследованиях целесообразно изучить возможность увеличения амплитуды и информационного импульса при условии, что излучающий или (и) приемный ЭМАПы будет располагаться над торцом изделия.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – Москва: Машиностроение, 2004. – 864 с.
2. Ермолов И.Н. Неразрушающий контроль: практ. пособие: в 5 кн., кн. 2. Акустические методы контроля / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; под ред. В.В. Сухорукова. – Москва: Высшая школа, 1991. – 283 с.
3. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М: Машиностроение, 1981. – 240 с.
4. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, В.Н.Филипов и др. Под ред. В.В.Клюева. – Москва: Машиностроение, 1995. – С. 488.
5. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 4. Экспериментальные исследования возможностей ультразвукового контроля ЭМА способом: монография / Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Глоба С.М. – Х: Щедра садиба плюс, 2015 – 104 с.
6. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств ультразвукового контроля металлоизделий: монография / Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В. – Х: ТОВ «Планета-принт», 2016 – 230 с.
7. Suchkov G. M., Petrishchev O. N., Cherednichenko I. V., Fedorov V. V., Desyatnichenko A. V., Khashchina S. V., Maslova M. S. Generator of Probing Pulses for EMA Flaw Detectors//Russian Journal of Nondestructive Testing (USA). – 2012. – Vol. 48. – No. 9. – Pp. 537–540.
8. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Радев Х.К., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В. Электрмагнитно-акустический преобразователь для ультразвуковой толщинометрии ферромагнитных металлоизделий без удаления диэлектрического покрытия // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 2. – С. 78–82.

Bibliography (transliterated)

1. Nerazrushayushiy kontrol: Spravochnik: Pod red. V.V. Klyueva. Vol.3: Ultrazvukovoy kontrol / I.N. Ermolov, Yu.V. Lange. – Moscow: Mashinostroenie, 2004. – 864 p.
2. Ermolov I.N. Nerazrushayushiy kontrol: prakt. posobie: kn. 2. Akusticheskie metody kontrolya / I.N. Ermolov, N.P. Aleshin, A.I. Potapov; pod red. V.V. Suhorukova. – Moscow: Vysshaya shkola, 1991. – 283 p.
3. Ermolov I. N. Teoriya i praktika ultrazvukovogo kontrolya. – Moscow: Mashinostroenie, 1981. – 240 p.
4. Nerazrushayushiy kontrol i diagnostika. Spravochnik / V.V.Klyuev, F.R.Sosnin, V.N.Filipov i dr. Pod red. V.V. Klyueva.- Moscow: Mashinostroenie. 1995. P. 488.
5. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 4. Eksperimentalnyie issledovaniya vozmozhnostey ultrazvukovogo kontrolya EMA sposobom: monografiya / Suchkov G.M., Petrishev O.N., Globa S.M. – Kharkiv: Schedra sadiba plyus, 2015 – 104 s.
6. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 5. Osobennosti konstruirovaniya i prakticheskogo primeneniya EMA ustroystv ultrazvukovogo kontrolya metalloizdeniy: monografiya / Miguschenko R.P., Suchkov G.M., Petrishev O.N., Desyatnichenko A.V. – Kharkiv: TOV «Planeta-print», 2016 – 230 s.
7. Suchkov G. M., Petrishev O. N., Cherednichenko I. V., Fedorov V. V., Desyatnichenko A. V., Khashchina S. V., Maslova M. S. Generator of Probing Pulses for EMA Flaw Detectors//Russian Journal of Nondestructive Testing (USA). – 2012. – Vol. 48. – No. 9. – Pp. 537–540.
8. Miguschenko R.P., Suchkov G.M., Radev H.K., Petrishev O.N., Desyatnichenko A.V. Elektrmagnitno-akusticheskiy preobrazovatel dlya ultrazvukovoy tolschinometrii ferromagnitnyih metalloizdeliy bez udaleniya dielektricheskogo pokryitiya // TehnIchna elektrodinamIka. – 2016. – No 2. – P. 78–82.

Поступила (received) 08.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Обнаружение импульсами волн Релея несплошностей поверхности металлоизделий, имеющих сложную форму / С. Ю. Плеснецов, Р. П. Мигущенко, Г. М. Сучков, О. Н. Петрищев, А. В. Митин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 48–55. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Виявлення імпульсами хвиль Релея несутцільності повертінні металовиробів, що мають складну формк/ С. Ю. Плеснецов, Р. П. Мигущенко, Г. М. Сучков, О. Н. Петрищев, А. В. Митин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 48–55. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2519-2671

Rayleigh wave pulse detection of discontinuities on complex-shaped metal surfaces / S. Yu. Plesnetsov, R. P. Migushenko, G. M. Suchkov, O. N. Petryshev, A. V. Mitin // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 38 (1210). – P. 48–55. – Bibliogr.: 8 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плеснецов Сергей Юрьевич – асистент кафедри «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков. Тел +38(057)7076380, e-mail: rastrelly@gmail.com

Плеснецов Сергій Юрійович – асистент кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків. Тел +38(057)7076380, e-mail: rastrelly@gmail.com

Plesnetsov Sergey Yurievich – assistant of «Devices and methods of nondestructive control» department, National technical university “Kharkiv polytechnical institute», Kharkiv. Phone +38(057)7076380, e-mail: rastrelly@gmail.com

Мигущенко Руслан Павлович – доктор технічних наук, проректор по науково-педагогічній роботі, доцент Національного технічного університету «Харьковский политехнический институт», г. Харьков. Тел. +38(057)706-32-13, e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Мигущенко Руслан Павлович – доктор технічних наук, проректор з науково-педагогічної роботи, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків. Тел +38(057)706-32-13, e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Migushenko Ruslan Pavlovich – doctor of technical sciences, scientific and pedagogics prorektor, docent National technical university “Kharkiv polytechnical institute», Kharkiv. Phone +38(057)706-32-13, e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Сучков Григорій Михайлович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков. Тел +38(057)7076380, e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Сучков Григорій Михайлович – доктор технічних наук, завідувач кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків. Тел +38(057)7076380, e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Suchkov Grigoriy Michailovich – doctor of technical sciences, chairman of “Devices and methods of nondestructive control» department, National technical university “Kharkiv polytechnical institute», Kharkiv. Phone +38(057)7076380, e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

Петрищев Олег Николаевич – доктор технических наук, доцент кафедры «Акустика и акустоэлектроника» Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев. Тел +38(044)4549072, e-mail: kafedra@ae.kpi.ua

Петрищев Олег Миколайович – доктор технічних наук, доцент кафедри «Акустика та акустоелектроніка» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», м. Київ. Тел +38(044)4549072, e-mail: kafedra@ae.kpi.ua

Petryshev Oleg Nikolaevich – doctor of technical sciences, docent of “Acoustics and acoustoelectronics» department, National technical university of Ukraine “Kyiv polytechnical institute», Kyiv. Phone +38(044)4549072, e-mail: kafedra@ae.kpi.ua

Митин Александр Владимирович – студент кафедры «Приборы и методы неразрушающего контроля» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков. Тел +38(057)7076380, e-mail: khpi.ndt@gmail.com

Мітін Олександр Володимирович – студент кафедри «Прилади і методи неруйнівного контролю» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків. Тел +38(057)7076380, e-mail: khpi.ndt@gmail.com

Mitin Alexander Vladimirovich – student of «Devices and methods of nondestructive control» department, National technical university “Kharkiv polytechnical institute», Kharkiv. Phone +38(057)7076380, e-mail: khpi.ndt@gmail.com

УДК 621.77

Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ, Т. А. ДЖОРУБОВ, А. Г. КРЮК

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ РАДИУСОВ МЕСТ ИЗГИБА ПРИ ВАЛКОВОЙ ФОРМОВКЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Возрастающие требования к качеству гнутых профилей из сталей различных марок поставили задачу правильной оценки прочностных и пластических свойств материала. Вопрос о разрушении материала в процессе профилирования (о минимальных допустимых радиусах мест изгиба) долгое время решали, базировавшись на показателе относительного удлинения δ_{10} . Однако, в дальнейшем, было доказано, что более точной оценкой следует считать показатель пластичности материала – относительное поперечное сужение $\psi_{ш}$. Методом механики сплошных сред с использованием поля скоростей перемещений определена удельная работа деформирования элементарного объема места изгиба при профилировании. В работе установлено, что удельная работа деформирования с уменьшением радиуса места изгиба и увеличением угла подгибки возрастает. Из сравнения удельной работы деформирования при изгибе с критической работой разрушения получен критический радиус разрушения, который для стали Ст. 3сп равен 0,16, для стали 09Г2 равен 0,27. С увеличением угла изгиба величина критического радиуса также увеличивается. Технологические радиусы мест изгиба должны отличаться от расчетных значений критического радиуса изгиба на коэффициент запаса прочности. При поштучном процессе профилирования в результате разрезки ленты перед профилегибочным станом концы полосы получают наклепанными. Кроме того, на них могут образовываться заусенцы, которые на переднем конце получают на наружной поверхности профиля, что ужесточает условия деформирования концов полосы. Экспериментальные исследования показывают, что минимальный допустимый радиус места изгиба для наклепанного металла должен быть в 1,7÷2 раза больше, чем для отожженного.

Ключевые слова: место изгиба, радиус, минимальный, допустимый, пластичность, материал, формоизменение, метод конечных элементов.

Зростаючі вимоги до якості гнутих профілів зі сталей різних марок поставили завдання правильної оцінки міцності і пластичних властивостей матеріалу. Питання про руйнування матеріалу в процесі профілювання (щодо мінімальних допустимих радіусів місць згину) довгий час вирішували, базуючись на показнику відносного подовження δ_{10} . Однак, в подальшому, було доведено, що більш точною оцінкою слід вважати показник пластичності матеріалу – відносне поперечне звуження $\psi_{ш}$. Методом механіки суцільних середовищ з використанням поля швидкостей переміщень визначена питома робота деформування елементарного об'єкта місця згину при профілюванні. У роботі встановлено, що питома робота деформування зі зменшенням радіуса місця згину і збільшенням кута підгинання зростає. З порівняння питомої роботи деформування при згині з критичною роботою руйнування отримано критичний радіус руйнування, який для сталі Ст. 3сп дорівнює 0,16, для сталі 09Г2 дорівнює 0,27. Зі збільшенням кута згину величина критичного радіуса також збільшується. Технологічні радіуси місць згину повинні відрізнятися від розрахункових значень критичного радіуса згину на коефіцієнт запасу міцності. При поштучному процесі профілювання в результаті розрізання стрічки перед профілезгинальним станом кінці смуги виходять наклепаними. Крім того, на них можуть утворюватися задирки, які на передньому кінці виходять на зовнішню поверхню профілю, що посилює умови деформування кінців смуги. Експериментальні дослідження показують, що мінімальний допустимий радіус місця згину для наклепаного металу повинен бути в 1,7÷2 рази більшим, ніж для відпаленого.

Ключові слова: місце згину, радіус, мінімальний, допустимий, пластичність, матеріал, формозміння, метод кінцевих елементів.

Increasing demands on the quality of cold-formed sections of steel of various grades set the task of correct assessment of the strength and plastic properties of the material. The issue of the destruction of the material in the profiling process (on the minimum permissible bending radii places) for a long time to decide, based on the index of elongation δ_{10} . However, in the future, it has been proved that a more accurate estimate should be considered as indicator of plasticity – the relative transverse contraction ψ . The method of continuum mechanics using field movement speed is determined by the specific work of deformation of an elementary volume of space bending when profiling. The paper found that the specific work of deformation with decreasing bend radius and increased space hems angle increases. From a comparison of compressive deformation in bending with the critical work of destruction is received critical radius of destruction, which for steel 3 is equal to 0.16 for steel 09G2 is 0.27. With an increase in the critical angle of the bend radius also increases. Technological bend radii of seats should be different from the calculation of the critical bend radius values on the safety factor. In the process of shaping the piece as a result of cutting the ribbon to the ends of the strip section bending pitched obtained rivet. In addition, they may form burrs are obtained at the front end on the outer surface profile that is tightening all bands deformation conditions. Experimental studies show that the minimum bending radius space for cold-hardened metal should be 1,7÷2 times greater than for the annealed.

Keywords: place the bending radius, the minimum allowable, plasticity, material forming, finite element method.

Введение. Возрастающие требования к качеству гнутых профилей из сталей различных марок поставили задачу правильной оценки прочностных и пластических свойств материала. Вопрос о разрушении материала в процессе профилирования (минимальных допустимых радиусах мест изгиба) долгое время решали, базировавшись на показателе относительного удлинения δ_{10} . Однако, в дальнейшем, было доказано [1, 2], что более точной оценкой следует считать показатель пластичности материала – относительное поперечное сужение $\psi_{ш}$. Исходя из оценки пластичности по $\psi_{ш}$ были разработаны [3–7] методы определения минимальных допустимых радиусов мест изгиба. Но, так как $\psi_{ш}$ при одноосном растяжении не равно этому показателю при двuosном растяжении [4] (что имеет место на наружной поверхности места изгиба), необходима корректировка полученных результатов. Попытки

учесть влияние схемы напряженно-деформированного состояния привели к появлению дополнительных коэффициентов, точное определение которых зачастую невозможно.

Методика исследований. В работе [8] показано, что критерием разрушения материалов может быть только величина, учитывающая накопление энергии в различных точках тела. Такой величиной является удельная работа деформирования единичного объема разрывного образца до разрушения. На основании условия пластичности Губера-Мизеса этот критерий можно распространить на различные схемы напряженно-деформированного состояния.

Результаты исследований. Для определения максимальных величин удельной работы деформирования элементарного объема (заготовки) при профилировании необходимо знать величины интенсивности скоростей деформаций ϵ_i ,

деформацій ε_i , а также интенсивности напряжений σ_i .

Согласно [9], поле скоростей перемещений частиц при профилировании можно описать уравнениями:

$$\vartheta_r = -\frac{\omega}{2\varphi_0} \left(r + \frac{\rho^2}{r} \right) - \frac{R_H(r^2 - R_B^2)\Delta s_{\max}}{2\rho r s_0} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0};$$

$$\vartheta_\varphi = \omega \frac{\varphi}{\varphi_0} r + \frac{R_H r \Delta s_{\max}}{\rho s_0} \left(\frac{3}{8} \varphi + \frac{\varphi_0}{2\pi} \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{\varphi_0}{16\pi} \sin \frac{2\pi\varphi}{\varphi_0} \right). \quad (1)$$

Выражение для интенсивности скоростей деформации имеет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[\frac{\omega}{\varphi_0} \left(1 - \frac{\rho^2}{r^2} \right) + \frac{\Delta s_{\max} R_H}{\rho s_0} \left(1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right) \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2 + \left[\frac{4R_H \varphi_0 \Delta s_{\max} (r^2 - R_B^2)}{\rho s_0 \pi r^2} \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2}, \quad (2)$$

где ϑ_φ и ϑ_r – проекции тангенциальной и радиальной составляющих скоростей перемещения частиц на соответствующие оси;

ω – угловая скорость поворота торца заготовок;

φ, φ_0 – текущая и конечная величина углов изгиба;

R_H и R_B – наружный и внутренний радиус изгиба;

r – текущая величина радиуса;

$\rho = \sqrt{R_H R_B}$ – радиус нейтрального слоя напряжений;

s_0 – толщина изгибаемой заготовки;

Δs_{\max} – максимальная величина абсолютного уменьшения толщины (утонения) изогнутой заготовки;

ε_i – интенсивность скоростей деформации.

Если ввести относительные величины, формула (2) примет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[\frac{\omega}{\varphi_0} \left(1 - \frac{\rho_1^2}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\eta r_H}{\rho_1} \left(1 + \frac{r_B^2}{\bar{r}^2} \right) \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2 + \left[\frac{4r_H \varphi_0 \eta (\bar{r}^2 - r_B^2)}{\pi \rho_1 \bar{r}^2} \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2},$$

где r_H, r_B и r – относительные величины наружного, внутреннего и текущего радиусов;

$\eta = \frac{\Delta s_{\max}}{s_0}$ – относительное утонение.

Функция диссипации энергии E определяется выражением [10]:

$$E = \varepsilon_i \sigma_i. \quad (4)$$

Подставляя в это уравнение значение ε_i из (3), получим:

$$E = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_i \sqrt{\left[\frac{\omega}{\varphi_0} \left(1 - \frac{\rho_1^2}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\eta r_H}{\rho_1} \left(1 + \frac{r_B^2}{\bar{r}^2} \right) \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2 + \left[\frac{4r_H \varphi_0 \eta (\bar{r}^2 - r_B^2)}{\pi \rho_1 \bar{r}^2} \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2}, \quad (5)$$

Из выражения (5), следует, что диссипация энергии достигает максимума на наружной и внутренней поверхностях места изгиба при $\varphi=0$.

Подставляя значение $\varphi=0$ в (5), получим:

$$E = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[\frac{\omega}{\varphi_0} \left(1 - \frac{\rho_1^2}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\eta r_H}{\rho_1} \left(1 + \frac{r_B^2}{\bar{r}^2} \right) \right]^2}. \quad (6)$$

Согласно (9), при изгибе до относительного внутреннего радиуса $r_B > 0,05$ разрушению раньше будут подвергаться волокна наружной поверхности места изгиба. Подставляя в (6) значение $\bar{r} = r_H$ и относительный радиус нейтрального слоя напряжений $\rho_1 = \sqrt{r_H r_B}$ получим выражение для диссипации энергии в наиболее опасной точке наружной поверхности:

$$E = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left[\frac{\omega}{\varphi_0} \left(1 - \frac{r_B}{r_H} \right) + \frac{\eta \sqrt{r_H}}{\sqrt{r_B}} \left(1 + \frac{r_B^2}{r_H^2} \right) \right]. \quad (7)$$

Максимальную удельную работу деформирования элементарного объема наружной поверхности места изгиба можно получить, проинтегрировав выражение (7) по времени:

$$A_{уд} = \int_0^+ \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left[\frac{\omega}{\varphi_0} \left(1 - \frac{r_B}{r_H} \right) + \frac{\eta \sqrt{r_H}}{\sqrt{r_B}} \left(1 + \frac{r_B^2}{r_H^2} \right) \right] dt. \quad (8)$$

В этом выражении σ_i, r_B, r_H и η взаимосвязаны и зависят от времени t . Проинтегрировать выражение (8) в общем виде не представляется возможным, поэтому, для определения величины удельной работы деформирования, был применен метод приближенного вычисления.

При определении деформаций на наружной и внутренней поверхностях места изгиба [9] весь процесс изгиба до относительного внутреннего радиуса r_B был разбит на n интервалов и определено среднее значение интенсивности скоростей деформаций $\varepsilon_{i\text{ср}}$, действующей в данном интервале, и приращение деформаций за интервал.

Согласно (8) аппроксимацию кривых $\sigma_i - \varepsilon_i$ производим степенной функцией. При этом:

- на участке, где $e \leq 0,4$,

$$\sigma_i = B_1 e_i^m, \quad (9)$$

- на участке, где $e \geq 0,4$,

$$\sigma_i = K + B_2 e_i^{m_1}. \quad (10)$$

В выражениях (9) и (10) B_1, B_2, m, m_1 и K – константы материала.

Таким образом, средняя величина диссипации энергии в каждом интервале может быть определена по зависимости:

$$E_{\text{ср}} = \varepsilon_{i\text{ср}} \cdot \sigma_i. \quad (11)$$

Приращение работы деформирования за интервал получим, умножив диссипацию энергии на время деформирования:

$$\Delta A = E_{\text{ср}} \Delta t. \quad (12)$$

Суммарную работу, затрачиваемую на деформирование элементарного объема при изгибе полосы в валках профилегибочных станов до относительного внутреннего радиуса изгиба r_B , получим, просуммировав приращения работы в отдельных интервалах:

$$A_{\text{сум}} = \sum \Delta A. \quad (13)$$

$$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}, \quad (14)$$

Пример определения величины удельной работы деформирования элементарного объема при изгибе полосы с углом $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$ и относительным внутренним радиусом изгиба $r_b = 1$ для стали Ст. 3сп приводится в табл. 1.

Как и при определении деформаций, зафиксированы промежуточные положения при r_b , равном 250, 100, 50 и т.д. с соответствующими углами изгиба. Поскольку скорости перемещения частиц при профилировании относительно малы, можно принять $\omega = 1$. Тогда, из соотношения

получим:

$$\Delta \varphi = \Delta t.$$

По уравнению (12) определено приращение работы между двумя смежными положениями. По уравнению (13) определена суммарная работа, затрачиваемая на деформирование элементарного объема при изгибе с конечным относительным внутренним радиусом r_b и углом изгиба φ_0 .

Таблица 1 – Пример последовательности расчета удельной работы деформирования элементарного объема при изгибе полосы с углом $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$ и относительным внутренним радиусом изгиба $r_b = 1$ для стали Ст. 3сп

Определяемая величина	при r_b							
	250	100	50	25	10	5	2	1
$\epsilon_i, 1/\text{сек}$	0,536	0,536	0,523	0,505	0,458	0,472	0,5	0,49
ϵ_n	0,002	0,005	0,0099	0,0194	0,0464	0,0826	0,1758	0,3308
$\sigma_i, \text{Мн}/\text{м}^2$	188	211	273	288	388	443	530	610
$E, \text{Мн}/\text{м}^2 \text{ сек}$	0,101	0,113	0,143	0,145	0,178	0,209	0,265	0,299
$\Delta t, \text{сек}$	$\frac{1}{233,2}$	$\frac{1}{233,2}$	$\frac{1}{93,6}$	$\frac{1}{46,8}$	$\frac{1}{23,4}$	0,088	0,224	0,366
$\Delta A, \text{Мдж}/\text{м}^3$	0,42	0,73	1,53	3,1	11,4	18,4	56	106
$A, \text{Мдж}/\text{м}^3$	0,42	1,15	2,68	5,78	17,2	35,6	91,6	197,6

Подобным образом рассчитана максимальная величина удельной работы деформирования элементарного объема при изгибе полосы с углом $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$ и различными относительными внутренними радиусами изгиба.

Величины максимальной удельной работы деформирования в зависимости от относительного внутреннего радиуса изгиба для сталей Ст. 3сп и 09Г2 приведены в табл. 2

Таблица 2 – Максимальная удельная работа деформирования

Марка стали	Значение удельной работы деформирования $A, \text{Мдж}/\text{м}^3$, при r_b				
	0,1	0,25	0,5	1	2
Ст. 3сп	688	462	286	198	109
09Г2	737	490	311	203	113

По данным табл. 2 построен график изменения удельной работы деформирования элементарного объема в зависимости от относительного внутреннего радиуса изгиба (рис. 1). На этом же графике в виде прямых линий нанесены величины удельной работы разрушения для сталей марок Ст.

3сп (1) и 09Г2 (2). Пересечение кривой зависимости удельной работы деформирования от относительного внутреннего радиуса изгиба с прямой критической работы разрушения дает критическое значение относительного внутреннего радиуса изгиба.

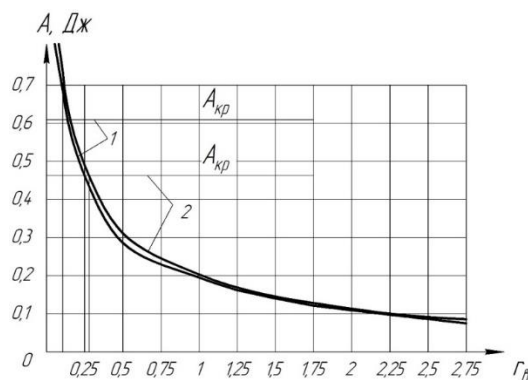


Рис. 1 – Графики удельной работы деформирования в зависимости от относительного внутреннего радиуса изгиба:
1 – для стали Ст.3сп; 2 – для стали 09Г2

Из выражения (7) видно, что удельная работа деформирования зависит не только от радиуса, но также и от угла изгиба.

Зависимость удельной работы деформирования от относительного внутреннего радиуса изгиба для угла изгиба $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$ приведена в табл. 2.

Такие же расчетные данные получены для различных значений угла φ_0 , по полученным результатам построены соответствующие графики (см. рис. 2 и рис. 3)

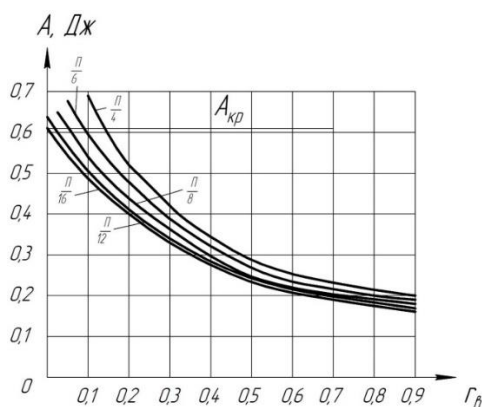


Рис. 2 – Графики изменения удельной работы деформирования для стали Ст. 3сп при различных значениях углов подгибки

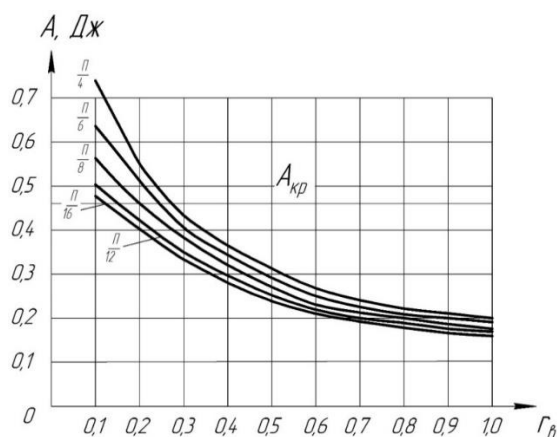


Рис. 3 – Графики изменения удельной работы деформирования для стали 09Г2 при различных значениях углов подгибки

Из графиков, приведенных на рис. 2 и рис. 3 видно, что с уменьшением углов подгибки удельная работа деформирования уменьшается. Пересечение кривых, соответствующих различным значениям угла φ_0 , с прямыми критической удельной работы

разрушения дает значения критических радиусов для различных углов подгибки заготовки.

В соответствии с полученными данными, построен график изменения критического радиуса разрушения в зависимости от углов подгибки для различных марок стали. График для сталей марок

сталь Ст. 3сп и сталь 09Г2 приведен на рис. 4. Так как все расчеты приведены в относительных величинах, радиус в конкретных случаях изгиба необходимо определять следующим образом: по заданному углу изгиба на готовом профиле с помощью графика

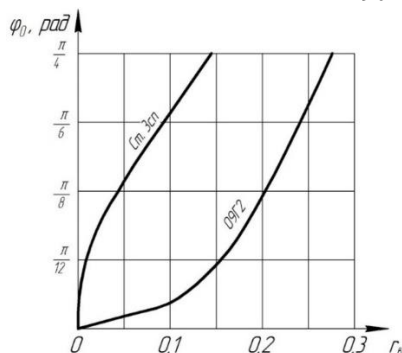


Рис. 4 – Графики критического радиуса разрушения r_k в зависимости от угла подгибки φ_0

Технологические радиусы изгиба отличаются от расчетных значений коэффициентом запаса прочности. Следовательно, при непрерывном процессе профилирования минимальный допустимый радиус изгиба равен

$$r_{\min} = k \cdot r_k. \quad (15)$$

Из графика (рис. 1) видно, что при малых величинах радиусов незначительное уменьшение радиуса изгиба вызывает резкое повышение удельной работы деформирования. При коэффициенте запаса прочности, равном 2, удельная работа деформирования будет значительно меньше критической работы разрушения, в связи с чем будет гарантировано получение профилей без трещин.

При непрерывном процессе профилирования (принимая $k=2$), при подгибке на 90° профилирования получим минимальные допустимые радиусы изгиба:

- для рядовых сталей $r_{\min} = 2 \cdot 0,16 = 0,32$;
- для низколегированных сталей

$$r_{\min} = 2 \cdot 0,27 = 0,54.$$

При поштучном процессе профилирования в результате разрезки ленты перед профилигибочным станом концы полосы получают наклепанными. Кроме того, на них могут образовываться заусенцы, которые на переднем конце получают на наружной поверхности профиля. Все это ужесточает условия деформирования концов полосы.

Эксперименты показывают, что минимальный допустимый радиус изгиба для наклепанного металла должен быть в $1,7 \div 2$ раза больше, чем для отожженного. Изгиб заусенцами наружу также требует увеличения минимального радиуса изгиба в $1,65 \div 1,75$ раза.

Таким образом, для поштучного процесса профилирования необходимо принимать

$$r_{\min} = (2,8 \div 3,5)kr_k. \quad (16)$$

При изгибе с углом $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$ радиусы необходимо принимать:

- для рядовых сталей $r_{\min} = 0,9 \div 1,1$;
- для низколегированных сталей

$$r_{\min} = 1,5 \div 1,9.$$

(рис. 4) можно определить критические радиусы разрушения:

- для рядовых сталей (Ст. 3сп), при изгибе на 90° $r_k = 0,16$;
- для низколегированных сталей (09Г2) при изгибе на 90° $r_k = 0,27$.

Выводы. Методом механики сплошных сред с использованием поля скоростей перемещений определена удельная работа деформирования элементарного объема места изгиба при профилировании. Удельная работа деформирования с уменьшением радиуса и увеличением угла изгиба возрастает. Из сравнения удельной работы деформирования при изгибе с критической работой разрушения получен критический радиус разрушения r_k , который при изгибе на угол $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$ соответственно равен: для стали Ст. 3сп $r_k=0,16$, для стали 09Г2 $r_k=0,27$. С увеличением угла изгиба величина критического радиуса также увеличивается. Технологические радиусы изгиба должны отличаться от расчетных значений критического радиуса изгиба коэффициентом запаса прочности, то есть $r_{\min} = kr_k$. При поштучном процессе профилирования, когда имеют место наклеп и заусенцы на концах полосы, относительный минимальный внутренний радиус изгиба следует определять по формуле $r_{\min} = (2,8 \div 3,5)kr_k$.

Список литературы

1. Фридман Я.Б. Деформация и разрушение металлов при статических и ударных нагрузках. / Я.Б. Фридман. – Москва: Оборонгиз, 1946. – 285 с.
2. Томлёнов А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томлёнов – Москва: Металлургия, 1972. – 480 с.
3. Смирнов-Аляев Г.А. Критерии пластичности, степени деформируемости и начала разрушения металлов в инженерных расчетах процессов обработки давлением. Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением. / Г.А. Смирнов-Аляев. – Москва: Metallurgizdat, 1963.
4. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию // Г.А. Смирнов-Аляев. – Москва: Mashiz, 1981. – 464 с.
5. Datskol, Jang C.T. Determine Minimum Bend Radii from standard Tensile Test Results. / Jang C.T. Datskol // Materials in Design Engineering, 1960. Vol. 51, p. 128–129.
6. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением: учебное пособие для вузов / Г.Я. Гун. – Москва: Металлургия, 1983. – 285 с.
7. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. / А.А. Ильюшин. 3-е изд. – Москва: Изд-во МГУ, 1990. – 285 с.
8. Бровман И.Я. Применение теории пластичности в прокатке / И.Я. Бровман. – Москва: Металлургия, 1991. – 265 с.

9. Алексеев Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием / Ю.Н. Алексеев. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1969. – 107 с.
10. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов. / Ю.Н. Алексеев. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1958. – 158 с.

Bibliography (transliterated)

- Fridman Ya.B. Deformatsiya i razrushenie metallov pri staticheskikh i udarnykh nagruzkah [Deformation and fracture of metals under static and impact loads]. – Moscow: Oborongiz, 1946. – 285 p.
- Toml'yonov A.D. Teoriya plasticheskogo deformirovaniya metallov [The theory of plastic deformation of metals] – Moscow: Metallurgiya, 1972. – 480 p.
- Smirnov-Alyayev G.A. Kriterii plastichnosti, stepeni deformiruemosti i nachala razrusheniya metallov v inzhenernykh raschetakh protsessov obrabotki davleniem. Inzhenernyye metodyi rascheta tehnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem [Criteria of plasticity, the degree of deformability and early destruction of metals in engineering calculations forming processes. Engineering methods of calculation of technological processes of metal forming]. – Moscow: Metallurgizdat, 1963.
- Smirnov-Alyayev G.A. Soprotivlenie materialov plasticheskomu deformirovaniyu [Resistance to plastic deformation of materials] Moscow: Mashgiz, 1981. – 464 p.
- Datskol, Jang C.T. Determine Minimum Bend Radii from standard Tensile Test Results. / Jang C.T. Datskol // Materials in Design Engineering, 1960. Vol. 51, p. 128–129.
- Gun G.Ya. Matematicheskoe modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniem: uchebnoe posobie dlya vuzov [Mathematical modeling of metal forming processes: textbook for high schools] – Moscow: Metallurgiya, 1983. – 285p.
- Ilyushin A.A. Mehanika sploshnoy sredy. [Continuum Mechanics] 3-e izd. – Moscow: Izd-vo MGU, 1990. – 285 p.
- Brovman I.Ya. Primenenie teorii plastichnosti v prokatke [Application of the theory of plasticity in the rolling] – Moscow: Metallurgiya, 1991. – 265 p.
- Alekseev Yu.N. Vvedenie v teoriyu obrabotki metallov davleniem, prokatkoy i rezaniem [Introduction to the Theory of metal forming, rolling and cutting. Kharkov: Izd-vo KhGU, 1969. – 107 p.
- Alekseev Yu. N. Voprosyi plasticheskogo techeniya metallov. [Questions plastic flow of metals] – Kharkov: Izd-vo KhGU, 1958. – 158 p.

Поступила (received) 15.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Исследование возможности получения минимальных радиусов мест изгиба при валковой формовке гнутых профилей / Ю. А. Плеснецов, Т. А. Джорубов, А. Г. Крюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 56–62. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671

Дослідження можливості отримання мінімальних радіусів місць вигину при валковій формуванні гнутих профілів / Ю. О. Плеснецов, Т. А. Джорубов, А. Г. Крюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 56–62. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2671

Research the possibility of obtaining the minimum bend radius places during roll forming cold-formed sections / Yu.A. Plesnetsov, T.A. Dzhorubov, A.G. Kryuk // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 38 (1210). – P. 56–62. – Bibliogr.: 10 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плеснецов Юрий Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002, тел.: (057) 707-60-40, e-mail: plesnetsov@gmail.com

Плеснецов Юрій Олександрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри «Обработка металів тиском» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002, тел.: (057) 707-60-40, e-mail: plesnetsov@gmail.com

Plesnetsov Yuri, Ph.D – Senior Research Fellow, Head of the Department «Metal Forming» of the National Technical University «Kharkiv polytechnic institute», tel.: (057) 707-60-40, e-mail: plesnetsov@gmail.com

Джорубов Тохир Алишерович – магистрант кафедры «Обработка металлов давлением» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002, тел.: (097) 243-19-90, e-mail: tohir13@gmail.com

Джорубов Тохір Алішерович магистрант кафедри «Обработка металів тиском» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002, тел.: (097) 243-19-90, e-mail: tohir13@gmail.com

Dzhorubov Tokhir – graduate student of the Department «Metal Forming» of the National Technical University «Kharkiv polytechnic institute», tel.: (097) 243-19-90, e-mail: tohir13@gmail.com

Крюк Анатолій Григорьевич – кандидат технических наук, профессор кафедры «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (057) 7020265 (доп. 328); e-mail: kaftech@hneu.edu.ua.

Крюк Анатолій Григорович – кандидат технічних наук, професор кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (057) 7020265 (доп. 328); e-mail: kaftech@hneu.edu.ua.

Kryuk Anatoliy Grigorievich – PhD, professor of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets on Kharkiv; tel. (057) 7020265 (dop. 328); e-mail: kaftech@hneu.edu.ua

УДК 621.771.63

Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ, С. А. МЕХ, А. Г. КРЮК**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЧАСТКА ПЛАВНОГО ПЕРЕХОДА ПРИ ФОРМОВКЕ В ВАЛКАХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ С ОТБОРТОВКАМИ**

Профили с отбортовками широко применяются в автомобилестроении, вагоностроении, авиастроении, транспортном, химическом машиностроении. Объем их производства и потребления постоянно растет. Повышаются и требования к их качеству. Задача повышения технико-экономических показателей может быть решена при условии широкого внедрения высокопроизводительных процессов. Преимуществами профилирования по сравнению с прессованием, гибкой в штампах и другими технологическими процессами являются более высокая производительность, безотходность, возможность получения длинномерных деталей. Профили с отбортовками получили широчайшее распространение в силу большого разнообразия форм и типоразмеров. Получены графики зависимости утонения от радиуса места изгиба и угла подгибки. Установлено, что увеличение ширины стенки профиля приводит к уменьшению длины участка плавного перехода. Приведены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных влияния ширины полки профиля на длину участка плавного перехода. Установлено, что межклетевое расстояние профилегибочного стана оказывает влияние на длину участка плавного перехода – при увеличении межклетевого расстояния в два раза длина участка плавного перехода уменьшается на 2–5% для тонкостенных профилей. Выполненный анализ участка плавного перехода, позволяет гарантировать отсутствие переформовки заготовки, а также обеспечить сокращение количества технологических переходов.

Ключевые слова: профиль, гнутый, с отбортовками, участок, плавного, перехода, данные, экспериментальные.

Профілі з відбортуванням широко застосовуються в автомобілебудуванні, вагонобудуванні, авіабудуванні, транспортному, хімічному машинобудуванні. Обсяг їх виробництва та споживання постійно зростає. Підвищуються і вимоги до їх якості. Завдання підвищення техніко-економічних показників може бути вирішена за умови широкого впровадження високопродуктивних процесів. Перевагами профілювання в порівнянні з пресуванням, згинанням в штампах і іншими технологічними процесами – є більш висока продуктивність, безвідходність, можливість отримання довгомірних деталей. Профілі з відбортуванням отримали широке розповсюдження в силу великої різноманітності форм і типорозмірів. Отримано графіки залежності потоншення від радіуса місця згину і кута підгинання. Встановлено, що збільшення ширини стінки профілю призводить до зменшення довжини ділянки плавного переходу. Наведено результати зіставлення розрахункових і експериментальних даних впливу ширини полиці профілю на довжину ділянки плавного переходу. Встановлено, що міжкльтьова відстань профілезгинального стану впливає на довжину ділянки плавного переходу – при збільшенні міжкльтьової відстані в два рази довжина ділянки плавного переходу зменшується на 2-5% для тонкостінних профілів. Виконаний аналіз ділянки плавного переходу, дозволяє гарантувати відсутність переформування заготовки, а також забезпечити скорочення кількості технологічних переходів.

Ключові слова: профіль, гнутий, з відбортуванням, ділянка, плавного, переходу, дані, експериментальні.

Profiles flare widely used in the automotive, railroad car, aircraft, transportation, chemical engineering. Volume of production and consumption is increasing. Go up and to their quality requirements. The task of raising the technical and economic indicators can be solved provided the widespread introduction of high-performance processes. The advantages of profiling in comparison with compression, flexible dies and in other technological processes is a high performance, non-waste, the possibility of long parts. Profiles flare received the widest distribution because of the large variety of shapes and sizes. Obtain plots of thinning of the radius of the bend location and angle hem. It is found that increasing the width of the profile wall reduces the smooth transition portion length. The results of the comparison of the calculated and experimental data, the effect of the section width of the shelf on the length of a smooth transition area. It is found that the distance between the stands of roll forming mill influences the length of the smooth transition section – as the distance between stands is twice the length of the smooth transition is reduced by 2-5% for thin-walled profiles. The analysis of a smooth transition area, ensures the absence of excessive deformation billet, and to decrease the number of technological transitions.

Keywords: profile, bent, flare, land, smooth, transition, data, experimental.

Введение. В последнее время в Украине наметилась устойчивая тенденция к применению все большего количества гнутых металлических профилей практически во всех отраслях экономики страны. За последние 10 лет увеличились не только объемы производства гнутых профилей, но и существенно расширился их сортамент. В общем сортаменте гнутых профилей более 50% имеют отбортованные элементы. С учетом изложенного, работа, направленная на совершенствование технологии их производства, является важной и актуальной.

Современное состояние производства и применения профилей с отбортовками. Профили с отбортовками широко применяются в автомобилестроении, вагоностроении, авиастроении, транспортном, химическом

машиностроении [1–3]. Объем их производства и потребления постоянно растет. Повышаются и требования к их качеству. Задача повышения технико-экономических показателей может быть решена при условии широкого внедрения высокопроизводительных процессов. Преимуществами профилирования по сравнению с прессованием, гибкой в штампах и другими технологическими процессами являются более высокая производительность, безотходность, возможность получения длинномерных деталей. Профили с отбортовками получили широчайшее распространение в силу большого разнообразия форм и типоразмеров.

Одним из самых крупных потребителей несимметричных гнутых профилей различного сечения является отрасль автомобилестроение (рис. 1)

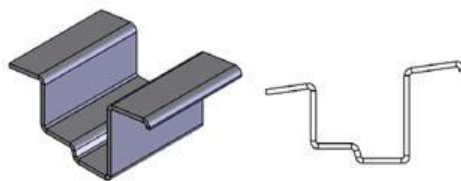


Рис. 1 – Направляющая двери легкового автомобиля

В автомобилестроении сортament профилей с отбортовками является довольно значительным (пороги, окантовки дверей и окон, соединения панельных дверей, каркас и планки сидений, обоймы уплотнителя поворотного стекла, сточный желоб крыши и его облицовка, уплотнитель фланца задней двери, направляющие подлокотника, молдинги и многие другие детали, применяемые во внутренней и внешней отделки автомобилей). Внедрения технологий профилирования в данной отрасли осложняется тем, что к изготовленным профилированием деталям предъявляются жесткие требования по допускам их изготовления.

Помимо производства автомобилей, профили с отбортовками используются также в вагоностроении (рис. 2). Гнутые профили с отбортовками позволяют получать, наряду с известными, совершенно новые конструктивные решения по отдельным узлам и элементам вагонов со снижением трудовых затрат на их изготовление при высоких прочностных характеристиках. Около 25% массы в конструкции четырехосных цельнометаллических вагонов составляют гнутые профили, что позволяет создать полувагон с высокими эксплуатационными качествами. Изготовление вагонов из гнутых профилей позволяет добиться снижения его стоимости до 10%.

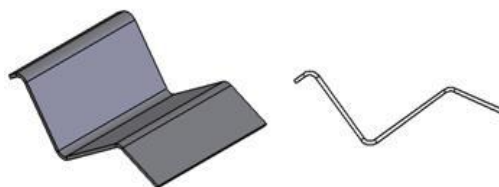


Рис. 2 – Профиль конструкции обвязки четырехосных цельнометаллических вагонов

В авиастроении профилирование является одним из путей, которые позволяют повысить эксплуатационные характеристики изделий. Помимо того, использование гнутых профилей и панелей, подкрепленных ими, обеспечивает снижения массы и повышения ресурса, как отдельных частей, так и всего летательного

аппарата. В настоящее время в авиастроении используется порядка 300 типоразмеров гнутых профилей из авиационных сплавов разнообразных поперечных сечений, приведенных в табл. 1. Определенную часть в них занимают гнутые профили с отбортовками.

Таблица 1 – Применение гнутых профилей в авиастроении

Тип профиля	Количество типоразмеров	Годовой объем, погонных м.
Уголок	155	316000
Зетовый	37	323500
Швеллер	56	20600
Корытный	47	474200
Специальный	5	2100

Значительная роль играют гнутые профили с отбортовками в строительной индустрии. Большое количество этих профилей используется в качестве коньков крыш, противовеетровых уголков, воронок,

подоконников, дождевых стоков, а также соединительных элементов, деталей герметизации, снегозащиты и тому подобное (рис. 3).

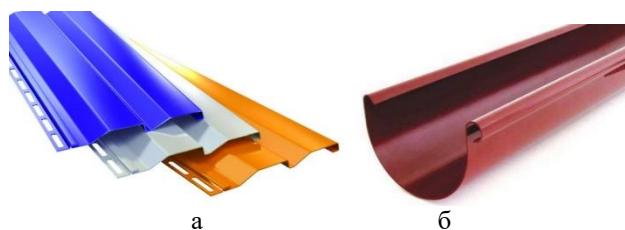


Рис. 3 – Гнутые профили с отбортовками в строительной индустрии:
а – сайдинги; б – водосточный желоб

Широкое применение также нашли гнутые профили с отбортовками в производстве стальных входных дверей, как в каркасе дверного полотна, так и в коробке дверного блока. Коробка дверного блока может изготавливаться из уголка, профильной трубы и гнутого профиля с отбортовками. Преимущество применения в коробке гнутого профиля с отбортовками заключается в обеспечении сложного контура прилегания обшивочного листа полотна к коробке. Применение гнутых профилей в каркасе дверного полотна позволяет добиться следующих преимуществ: увеличить жесткость двери в 3 раза; создать дверь большой толщины при минимальном увеличении веса; установить два контура уплотнения по всему периметру двери, что улучшит ее теплоизоляционные и шумоизоляционные свойства и герметичность. Чем

сложнее геометрическая форма гнутого профиля, образующего в конструкции сложные замкнутые контуры, и больше толщина материала, тем жестче и прочнее получается конечное изделие. Дверные коробки из гнутого профиля с отбортовками (рис. 4), обеспечивая требуемую жесткость конструкции, позволяют «утопить» полотно двери в коробку, в отличие от коробок, изготовленных из профильной трубы или уголка. Это улучшает внешний вид изделий, повышает их устойчивость к взлому, позволяет создать два контура прилегания с особой геометрией. При установке в контуры лепестковых или трубчатых уплотнителей, максимально улучшаются теплоизоляционные и шумоизоляционные свойства и герметичность дверей.



Рис. 4 – Дверная коробка из гнутого профиля с отбортовками

Гнутые профили с отбортовками используются также для армирования металлопластиковых окон (рис. 5). Армирующий профиль – металлический профиль, проходящий внутри пластикового

оконного профиля для придания последнему большей жесткости. К армирующему профилю крепятся наружные петли и различные внутренние механизмы фурнитуры.



Рис. 5 – Гнутый профиль с отбортовкой для армирования металлопластиковых окон

Несимметричные гнутые профили (рис. 6) нашли применение за последнее десятилетие также и в производстве мебели. Чаще всего профили используются в качестве несущих, функциональных или декоративных элементов в комбинации с

деревом для производства столов, кроватей, шкафов-купе. Однако, помимо этого, изготавливаются также различные виды деталей торгового оборудования для современных торговых комплексов.

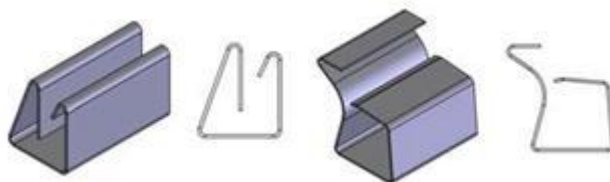


Рис. 6 – Гнутые профили с отбортовками, применяемые в мебельном производстве

Широкий сортамент гнутых профилей с отбортовками используется во внутренней отделке помещений. Домашние интерьеры предполагают использование гибких, эстетичных конструкций для защиты и укрепления поверхностей. Однако на открытых участках и в местах с высокой проходимостью необходимы нержавеющие профили, изготавливаемые из стали (рис. 7). Высокая механическая устойчивость предполагает

использование металлических деталей, которые укрепляют конструкцию. Это может понадобиться в следующих случаях: облицовка фасадов камнем, керамической плиткой, организация декоративных вставок; облицовка ступеней лестниц в местах с высокой проходимостью, там, где особенно требуется защита от стирания и механических повреждений; изготовление сложных подвесных многоуровневых конструкций.



Рис. 7 – Профиль для отделки

Цель работы – анализ особенностей формообразования металла на участке плавного перехода при валковой формовке профилей с отбортовками.

Метод исследований: тензометрия.

Результаты работы. Получены графики зависимости утонения, от радиуса места изгиба и угла подгибки, приведены на рис. 8.

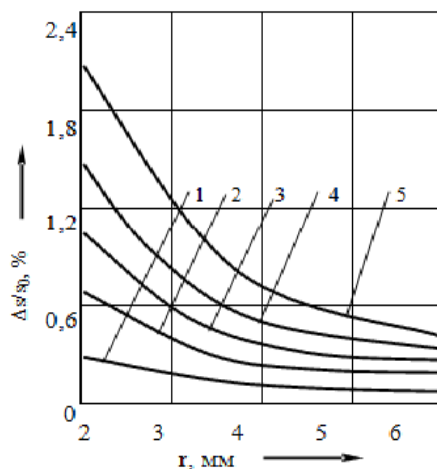


Рис. 8 – Зависимость утонения Δ от радиуса места изгиба r и угла подгибки α :
1, 2, 3, 4, 5 – $\alpha=5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$

Сопоставление результатов теоретического анализа с экспериментальными данными по утонению мест изгиба на первых переходах показывает, что расхождение не превышает 2%.

Особенностью деформирования заготовки в первых переходах состоит в том, что происходит монотонное изменение радиуса ее кривизны от бесконечности до конечного значения на готовом профиле. Вместе с тем, полученные формулы не учитывают упрочнение, которое на изменение

толщины влияет незначительно. Однако упрочнение следует учитывать при определении минимально допустимого радиуса изгиба.

Результаты исследований швеллерных профилей с шириной стенки $C=50$ мм и $C=100$ мм из стали 08 кп толщиной 1 мм при различных углах подгибки приведены на рис. 9. Как видно из графиков, увеличение ширины стенки профиля приводит к уменьшению длины участка плавного перехода.

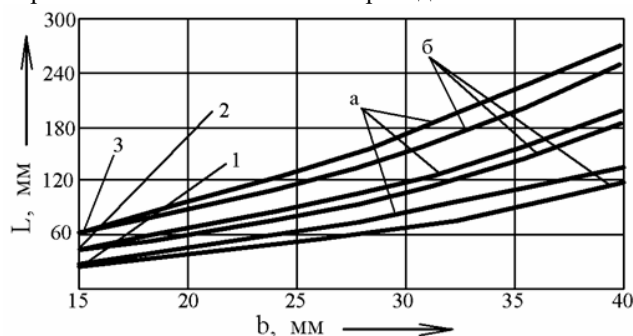


Рис. 9 – Зависимость участка плавного перехода от ширины полки:
1, 2, 3 – углы подгибки, равные 15° , 30° и 45° , соответственно;
а – $C=50$ мм; б – $C=100$ мм

На рис. 10 приведены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных

данных влияния ширины полки b на длину участка плавного перехода L при углах подгибки 15° и 30°

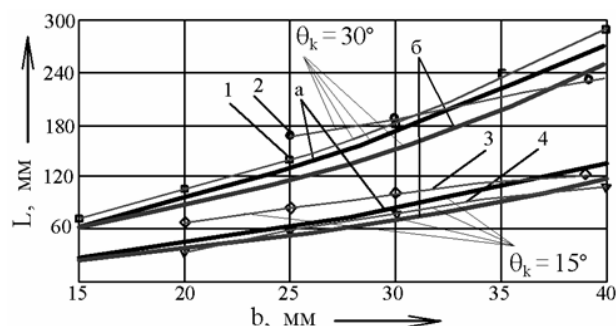


Рис. 10 – Сопоставление расчетных и экспериментальных данных:
экспериментальные данные: 1 – сталь 08кп; $S = 0,6$ мм; $C = 0$;
2, 3 – сталь 10; $S = 0,55$ мм; $C = 0$; 4 – сталь 08кп; $S = 0,6$ мм; $C = 110$ мм;
расчетные данные: а – сталь 08кп; $S = 0,55$ мм; $C = 50$ мм;
б – сталь 08кп; $S = 0,55$ мм; $C = 100$ мм

Анализ результатов показывает, что сходимость теоретических и опытных данных достаточна для их использования в инженерных расчетах. Экспериментальные данные получены с применением тензометрии (датчики наклеивались с двух сторон полосы учета влияния изгиба полки). Сравнение длины участка плавного перехода для различных технологий не всегда возможно, поскольку схемы формовки, катающие диаметры валков и их конструкция, а также режимы формообразования могут отличаться, оказывая тем

самым существенное влияние на исследуемый параметр.

Межклетевое расстояние профилегибочного стана оказывает влияние на длину участка плавного перехода (при увеличении межклетевого расстояния в два раза длина участка плавного перехода уменьшается на 2–5% для тонкостенных профилей). Это связано с прогибом не только стенки профиля, но и полок профиля в указанном промежутке. Как видно на рис. 9 и рис. 10, длина участка плавного перехода профилей с широкой стенкой несколько

меньше, чем при валковой формовке профилей с узкой стенкой.

Используя результаты теоретического анализа, можно получить количественную зависимость между углами подгибки и шириной стенки профиля.

Результаты расчетов приведены на рис. 11 и рис. 12. Очевидно, что увеличение углов подгибки в ряде переходов позволит уменьшить число переходов и использовать профилировочные станы с небольшим числом клетей.

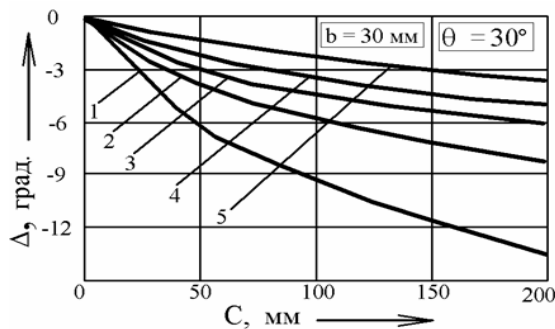


Рис. 11 – Зависимость углов подгибки от ширины стенки профиля:
1, 2, 3, 4, 5 – толщина заготовки $S=0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ мм, соответственно

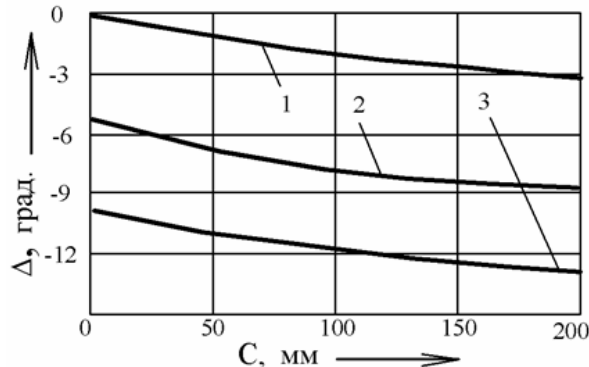


Рис. 12 – Зависимость углов подгибки от ширины стенки профиля C :
1, 2, 3 – углы подгибки, равные $15^{\circ}, 30^{\circ}$ и 45° , соответственно

При формовке многоэлементных профилей, подгибаемая полка обладает большей жесткостью за счет «надстройки», чем гладкая полка. В этом случае необходимо учитывать жесткость элементов, которые несет основная полка. Учет изменения жесткости полки можно производить с использованием метода «локальных жесткостей», по которому подсчитывают характеристики жесткости соответствующего участка заготовки на предшествующем переходе, а затем определяется толщина эквивалентной гладкой полки той же ширины. Дальнейшие технологические расчеты с использованием предлагаемой модели не отличаются от описанной выше процедуры, однако для некоторых видов потери устойчивости полузакрытых профилей необходимо экспериментальное подтверждение теоретических результатов.

Выводы. Выполненный анализ участка плавного перехода, позволяет гарантировать отсутствие переформовки заготовки путем

ограничения углов подгибки полок с отбортовками, а также обеспечивает сокращение количества технологических переходов.

Список литературы

1. И.С. Тришевский. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката / И.С. Тришевский, В.И. Мирошниченко, В.П. Стукалов. – Киев: Техника, 1980. – 168 с.
2. И.С. Тришевский. Производство и применение гнутых профилей проката: Справочник. – Москва: Металлургия, 1975. 536 с.
3. И.С. Тришевский. Производство гнутых профилей (оборудование и технология) / И.С. Тришевский, А. Б. Юрченко, В. С. Марьин. – Москва: Металлургия, 1982. 384 с.

Bibliography (transliterated)

1. I.S. Trishevskiy. Kalibrovka valkov dlya proizvodstva gnutyyh profilyey prokata / I.S. Trishevskiy, V.I. Miroshnichenko, V.P. Stukalov. – Kiev: Tehnika, 1980. – 168 p.
2. I.S. Trishevskiy. Proizvodstvo i primeneniye gnutyyh profilyey prokata: Spravochnik. – Moscow: Metallurgiya, 1975. 536 p.
3. I.S. Trishevskiy. Proizvodstvo gnutyyh profilyey (oborudovaniye i tehnologiya) / I.S. Trishevskiy, A. B. Yurchenko, V. S. Marin. – Moscow Metallurgiya, 1982. 384 p.

Поступила (received) 15.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Экспериментальные исследования участка плавного перехода при формовке в валках гнутых профилей с отбортовками / Ю. А. Плеснецов, С. А. Мех, А. Г. Крюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 63–69. – Бібліогр.: 3 назви. – ISSN 2519-2671

Експериментальні дослідження ділянки плавного переходу при формуванні в валках гнутих профілів з відбортуваннями / Ю. О. Плеснецов, С. О. Мех, А. Г. Крюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 38(1210). – С. 63–69. – Бібліогр.: 3 назви. – ISSN 2519-2671

Experimental investigations of the smooth transition when forming rolls in roll-formed shapes with flare / Yu.A. Plesnetsov, S.A. Mekh, A.G. Kryuk // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2016. – No 38 (1210). – P. 63–69. – Bibliogr.: 3 – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плеснецов Юрий Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002, тел.: (057) 707-60-40, e-mail: plesnetsov@gmail.com

Плеснецов Юрий Александрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри «Обработка металів тиском» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002, тел.: (057) 707-60-40, e-mail: plesnetsov@gmail.com

Plesnetsov Yuri – Ph. D – Senior Research Fellow, Head of the Department «Metal Forming» of the National Technical University «Kharkiv polytechnic institute»

Мех Сергей Александрович – магистрант кафедры «Обработка металлов давлением» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002, тел.: (066) 315-93-21, e-mail: sergey.meh.9413@mail.ru

Мех Сергій Олександрович – магістрант кафедри «Обработка металів тиском» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002, тел.: (066) 315-93-21, e-mail: sergey.meh.9413@mail.ru

Mekh Sergey – graduate student of the Department «Metal Forming» of the National Technical University «Kharkiv polytechnic institute», 21, Frunze str., 61002, Kharkiv, Ukraine

Крюк Анатолий Григорьевич – кандидат технических наук, профессор кафедры «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (057) 7020265 (доп. 328); e-mail: kafttech@hneu.edu.ua.

Крюк Анатолий Григорьевич – кандидат технічних наук, професор кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (057) 7020265 (доп. 328); e-mail: kafttech@hneu.edu.ua.

Kryuk Anatoliy Grigorievich – PhD, professor of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets on Kharkiv; tel. (057) 7020265 (dop. 328); e-mail: kafttech@hneu.edu.ua

ЗМІСТ

Алиева Л. И. Силовой режим формообразования полых деталей при холодном радиально-прямом выдавливании с обжатием.....	5
Дмитрик В. В., Баранова Т. А., Лузан С. А., Литвин О. Н., Носов К. В. К совершенствованию моделирования сварочного нагрева изготавливаемых соединений.....	13
Злочевська Н. К., Тітов А. В. Формування механічних та структурних властивостей сплаву 1420 в умовах великих пластичних деформацій зсуву.....	19
Калюжний В. Л., Піманов В. В., Савченко А. В. Холодне формоутворення порожнистих виробів з профільованою внутрішньою поверхнею.....	24
Новиков Ф. В., Новиков Г. В., Дитиненко С. А., Полянский В. И. Экологические преимущества применения при шлифовании электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках взамен электрохимической правки.....	35
Смирнов Е. Н., Скляр В. А., Уразова Л. Ф., Пивоваров Р. Е. Математическое моделирование поведения дефектов макроструктуры непрерывнолитого металла в процессе прокатки.....	41
Плеснецов С. Ю., Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Митин А. В. Обнаружение импульсами волн Релея несплошностей поверхности металлоизделий, имеющих сложную форму.....	48
Плеснецов Ю. А., Джорубов Т. А., Крюк А. Г. Исследование возможности получения минимальных радиусов мест изгиба при валковой формовке гнутых профилей.....	56
Плеснецов Ю. А., Мех С. А., Крюк А. Г. Экспериментальные исследования участка плавного перехода при формовке в валках гнутых профилей с отбортовками.....	63

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХП»**

Збірник наукових праць

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

Випуск 38 (1210) 2016

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. Фрунзе, 21, 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. № 33-16

Підп. до друку 15.11.2016 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. RISO-друк. Гарнітура Таймс.
Ум. друк. арк. 8,6. Обл.-вид. арк. 8,9.

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

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 от 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Видавництво та друк ФО-П Шейніна О.В.
61052, Україна, м. Харків, вул. Слов'янська, 3
Тел. 057 759-48-79

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