

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Інноваційні
технології та обладнання
обробки матеріалів у
машинобудуванні та
металургії**

№ 41 (1317) 2018

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: Innovative
technologies and equipment
handling materials in
mechanical engineering and
metallurgy**

No 41 (1317) 2018

Collected Works

The publication was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2018

Kharkiv
NTU "KhPI", 2018

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 41 (1317) 2018. – 105 с. – ISSN 2519-2671.

Видання присвячене освітленню досягнень в галузі системного аналізу та управління технічними, технікоекономічними і соціальними системами, синтезу систем керування. Публікуються статті, що стосуються розробки інтелектуальних систем, застосування математичного моделювання в техніці, лінгвістиці та економіці, впровадження інформаційних технологій і розробки програмного забезпечення.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців в галузі системного аналізу, управління і комп'ютерних технологій.

The publication is devoted to the coverage of achievements in the field of system analysis and management of technical, technoeconomic and social systems, the synthesis of control systems. Articles are published on the development of intelligent systems, the application of mathematical modeling in technic, linguistics and economics, the introduction of information technology and software development.

For scientists, teachers of higher education, post-graduate students, students and specialists in the field of systems analysis, management and computer technology.

Державне видання.

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року.

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Наказом МОН України № 1328 від 21.12.2015 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року».

Офіційний сайт видання: <http://samit.khpi.edu.ua/Засновник>

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Головний редактор

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

Заст. головного редактора

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Секретар

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Редакційна колегія серії

Відповідальний редактор:

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Заступник відповідального редактора:

Ю.О. Плеснецов, канд. техн. наук, ст.н.с., НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар:

О.А. Юрченко, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

І.С. Алієв, д-р техн. наук, проф. ДГМА, Україна

Г.А. Баглюк, д-р техн. наук, проф., ПІМ НАНУ, Україна

Б.Рюдигер, д-р техн. наук, проф., Німеччина

В.В. Драгобецький, д-р техн. наук, проф., КрНУ, Україна

С.В. Єршов, д-р техн. наук, проф., ДДТУ, Україна

В.Л. Калюжний, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна

В.В. Кузарь, д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», Україна

Р. Г. Пузир, д-р техн. наук, проф., КрНУ, Україна

Б.П. Середа, д-р техн. наук, проф., ДДТУ, Україна

Є.М. Смирнов, д-р техн. наук, проф., СТИ НІТУ «МІСІС», Росія;

Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

В.А. Тітов, д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна

М.Є. Тараненко, д-р техн. наук, проф., НАУ «ХАІ», Україна

О.І. Тришевський, д-р техн. наук, проф., ХНТУСГ, Україна

С.В. Федоров, д-р техн. наук, проф., КГТУ, Росія

Є.А. Фролов, д-р техн. наук, проф., ПолтНТУ, Україна

В.Хомберг, д-р техн. наук, проф., Магдебурзький ун-т,

Німеччина;

В.В. Чигиринський, д-р техн. наук, проф., ДДТУ, Україна

Editor-in-chief

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor-in-chief

Marchenko A. P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Secretary

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

The editorial board of the series:

Editor:

A.P. Marchenko, Dr. of Sciences, professor, NTU "KhPI", Ukraine

Deputy managing editor:

Y.O. Plesnetsov, PhD., senior scientist, NTU "KhPI", Ukraine

Secretary:

O.A. Yurchenko, PhD., sciences assoc., NTU "KhPI", Ukraine

Members of the Editorial Board:

I.S. Aliev, Dr. of Sciences, professor, DSEA, Ukraine

G.A. Bagluk, Dr. of Sciences, professor, IPMS NASU, Ukraine

B.Ryudyher, Dr. of Sciences, professor, Germany

V.V. Drahobetsky, Dr. of Sciences, professor, KNU, Ukraine

S.V. Ershov Dr. of Sciences, professor, DSTU, Ukraine

V.L. Kalyuzhny, Dr. of Sciences, professor, NTUU "KPI", Ukraine

V.V. Kukhar, Dr. of Sciences, professor, PSTU, Ukraine

R.G. Puzyr, Dr. of Sciences, professor, KNU, Ukraine

B.P. Sereda, Dr. of Sciences, professor, DSTU, Ukraine

E.M. Smirnov, Dr. of Sciences, professor, STI NITU "MISiS", Russia

G.M. Suchkov, Dr. of Sciences, professor, NTU "KhPI", Ukraine

M.E. Taranenko, Dr. of Sciences, professor, NAU "KhAI", Ukraine

V.A. Titov, Dr. of Sciences, professor, NTUU "KPI", Ukraine

O.I. Trishevsky, Dr. of Sciences, professor, KhNTUA, Ukraine

S.V. Fedorov, Dr. of Sciences, professor, KSTU, Russia

E.A. Frolov, Dr. of Sciences, professor, PNTU, Ukraine

V. Homberh, Dr. of Sciences, professor, MOGU, Germany

V.V. Chigirinsky, Dr. of Sciences professor, DSTU, Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 8 від 02 листопада 2018 р.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2018

УДК 621.771.63

*А. В. АХЛЕСТИН, В. Н. ЛЕВЧЕНКО***ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННОЙ БАЛКИ КОРОбЧАТОЙ ФОРМЫ С НАКЛОННЫМИ ГОФРАМИ НА БОКОВЫХ СТЕНКАХ**

Отмечается интенсивное развитие производства тонкостенных гнутых профилей из рулонного проката с современными покрытиями. Наибольшие объёмы металлопродукции использует стройиндустрия (балки, стойки, раскосы и пр.). В связи со склонностью тонкого металла к дефектообразованию рассмотрены способы упрочнения как заготовки, так и непосредственно формируемого в валках профиля. Выявлены причины и природа образования различных изломов, в том числе периодически повторяющихся. Изломы на подгибаемых полках профиля имеют вид изогнутых несимметричных гофров. Открытой частью они расположены на кромке полки, а сходящейся – соединены с местом изгиба полки со стенкой. Изломы на боковых стенках, ограниченные местами её изгиба с полкой и нижней стенкой, образуют относительно прямые глухие гофры, расположенные под углом примерно 45°. Расстояния между гофрами (шаг) одинаковые и равны высоте профиля. Таким образом, изломы на полке и изломы на стенке возникают в результате локальной потери устойчивости металла. Причиной этому является ужесточение режима формовки. Изломы на полке искажают форму и размеры не только её самой, но и профиля в целом (продольный и поперечный изгибы), являясь дефектными признаками. Изломы же в виде прямых гофров, расположенных на линиях наибольших касательных напряжений стенок профиля и являющихся, по сути, упрочняющими элементами, называть дефектами не корректно. Особенности технологии изготовления балки коробчатой заключаются в следующем. Само наличие наклонных гофров на профиле можно считать особенностью, поскольку до сего времени не встречались на практике профили, производимые формовкой в валках с такими гофрами. Впервые предложено полученные путем потери локальной устойчивости стенки наклонные гофры рассматривать как упрочняющие профиль элементы.

Ключевые слова: валковая формовка, гнутый профиль, наклонный гофр, излом, анизотропия, потеря устойчивости.

*О. В. АХЛЕСТИН, В. М. ЛЕВЧЕНКО***ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ТОНКОСТІННОЇ БАЛКИ КОРОбЧАТОЇ ФОРМИ З НАХИЛЕНИМИ ГОФРАМИ НА БІЧНИХ СТІНКАХ**

Відзначається інтенсивний розвиток виробництва тонкостінних гнутих профілів з рулонного прокату з сучасними покриттями. Найбільші обсяги металлопродукції використовує будівництво (балки, стійки, розкоси та ін.). У зв'язку зі схильністю тонкого металу до дефектоутворення розглянуто способи зміцнення як заготовки, так і безпосередньо профілю, що формується в валках. З'ясовано причини та природа утворення різних зламів, в тому числі періодично повторюваних. Злами профілю на полицях, що підгинаються, мають вигляд вигнутих несиметричних гофрів. Відкритою частиною вони розташовані на кромці полки, а тією, що сходиться – з'єднані з місцем згину полки зі стінкою. Злами на бічних стінках, обмежені місцями її згину з полицею і нижньою стінкою, утворюють відносно прямі глухі гофри, розташовані під кутом приблизно 45°. Відстані між гофрами (крок) однакові і дорівнюють висоті профілю. Таким чином, злами на полиці і злами на стінці виникають в результаті локальної втрати стійкості металу. Причиною цього є посилення режиму формування. Злами на полиці спотворюють форму і розміри не тільки її самої, але і профілю в цілому (поздовжній і поперечний вигини), будучи дефектними ознаками. Злами ж у вигляді прямих гофрів, розташованих на лініях найбільших дотичних напружень стінок профілю і є, по суті елементами, що зміцнюються, називати дефектами некоректно. Особливості технології виготовлення балки коробчастої полягають в наступному. Сама наявність нахилених гофрів на профілі можна вважати особливістю, оскільки до цього часу не зустрічалися на практиці профілі, вироблені формуванням в валках з такими гофрами. Вперше запропоновано отримані шляхом втрати локальної стійкості стінки нахилені гофри розглядати як елементи, що зміцнюють профіль.

Ключові слова: валкова формовка, гнутий профіль, нахилений гофр, злам, анизотропія, втрата стійкості.

*O. V. AKHLESTIN, V. M. LEVCHENKO***THE FEATURES OF THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING THIN-WALL BOX-SHAPED BEAM WITH TILTED CORRUGATIONS ON SIDE WALLS**

There has been the intensive development of the production of thin-walled cold roll profiles from rolled steel with modern coatings. The largest volumes of metal products are used by the building industry (beams, struts, braces, etc.). Due to the tendency of thin metal to defect formation the methods of hardening both the workpiece and directly the profile formed in the rolls are considered. The reasons and essence of the formation of various fractures, including those periodically repeated, have been found out. The kinks on the bendable boards of the profile have the appearance of curved asymmetrical corrugations. The open part of them is located on the edge of the board and converging ones connected with the place of bend of the board with the wall. The kinks on the side walls, limited by the places of its bend with the board and the bottom wall, form relatively straight blind corrugations located at an angle of about 45°. The distances between the corrugations (step) are the same ones and equal to the height of the profile. Thus, the kinks on the board and the kinks on the wall are originated due to the local loss of stability of the metal. The reason for this is the tightening of the forming mode. The kinks on the board distort the shape and size not only of board itself, but also of the profile as whole (lengthwise and cross bends), being the defective signs. The kinks in the form of straight corrugations located on the lines of the greatest tangential stresses of the profile walls and which, in essence, reinforcing elements, are not correctly called as defects. The features of the manufacturing technology of the box-shaped beam are as follows. The presence of tilted corrugations on the profile itself can be considered as feature, because until now the profiles produced by cold roll forming with such corrugations have not been found in practice. For the first time it is proposed to consider tilted corrugations obtained by loss of local stability of a wall as elements reinforcing the profile.

Keywords: roll forming, cold roll profile, tilted corrugation, fracture, anisotropy, loss of stability.

Введение. В настоящее время сортамент гнутых профилей расширяется преимущественно в направлении уменьшения толщины металла, увеличения габаритных размеров с усложнением конструкции изделий и использования современных покрытий. С уменьшением толщины металла в большей степени проявляются дефекты формообразования металла, в том числе дефекты пространственной формы

© А. В. Ахлестин, В. Н. Левченко, 2018

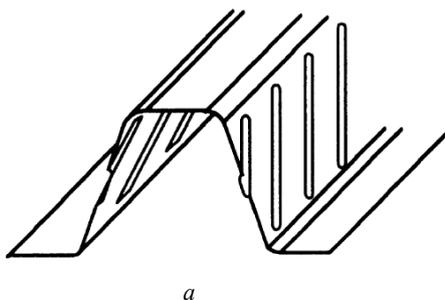
профиля (прогиб продольный и боковой, винтообразное скручивание, волнистость кромки, концевые эффекты, гофры на его элементах, изломы). Для повышения жесткости тонкостенного профиля на нём выполняют различные упрочняющие элементы: отбортовки, дополнительные продольные места изгибов, элементы двойной и тройной толщины металла, гофры, пуклевки, замковые соединения и пр. Все эти меры должны быть направлены на решение основной задачи – повышения качества продукции.

Технология изготовления гнутых профилей коробчатой формы в целом разработана достаточно полно [1–4], их производство осуществляется на большинстве предприятий-производителей гнутых профилей.

1. Постановка задачи. Стремление к повышению эффективности производства вынуждает некоторых изготовителей интенсифицировать процесс формовки профилей. С этой целью применяют профилегибочное оборудование с относительно небольшим количеством рабочих клетей и недостаточным расстоянием между ними, а также увеличенные углы подгибки элементов формируемых профилей. Естественно, без соответствующей квалификации и опыта работы получение должного качества профилей при этом не представляется возможным. На это их решение повлияло, по-видимому, широко разрекламированная Ульяновская разработка – «МИД» (метод интенсивного деформирования) [4]. Он предназначен для использования при изготовлении мелкосерийных партий гнутых профилей.

Поскольку в современных условиях надеяться на приобретение современного зарубежного оборудования не приходится, необходимо работать на уже имеющемся в наличии. При этом необходимо самим разрабатывать новые технические решения, направленные на совершенствование технологии и оборудования, делая упор на эффективные и одновременно относительно простые варианты.

Примером такой разработки из смежной области может служить способ изготовления полых цилиндрических изделий [5]. Он направлен на повышение качества изделий получаемых глубокой вытяжкой и основан на создании искусственной анизотропии.



2. Анализ последних публикаций. Более 20 лет приоритет в исследованиях теории и технологии гнутых профилей отдается преимущественно тонкостенным профилям. Основное внимание уделяется повышению качества продукции при сокращении затрат на ее производство [6]. С целью повышения прочностных характеристик гнутых профилей предварительно упрочняют листовую заготовку. Для этого на полосу валками наносят в определенных по ее ширине местах продольные рифления (рис. 1). При этом выступы и впадины выполнены одинаковыми с радиусом $R = 2$ мм. Путем локальной пластической деформации отформовываются рифления с высотой до 1,5 мм. Общая ширина заготовки при этом не изменяется. Преимуществом данного способа является возможность установки рабочей клетки с такими валками перед первой клетью профилегибочного стана [7, 8].

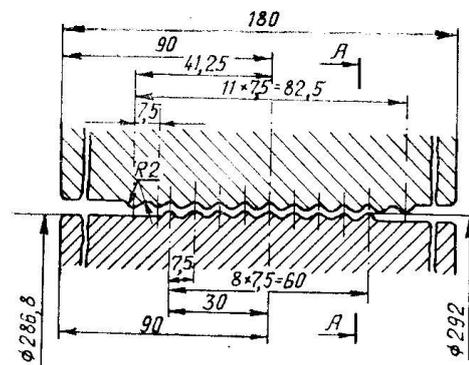


Рис. 1 – Валки для формовки рифлений [7]

В Ульяновском НИАТ [9] применяют дрессировку и обжим для предварительного деформационного упрочнения заготовки гнутого профиля в целях снижения кромочной волнистости, уменьшения вероятности появления линий Чернова-Людерса, а также для выравнивания механических свойств профиля по его сечению.

В североамериканских компаниях также применяют упрочняющие элементы на гнутых профилях [3]. Отличием этой технологии от рассмотренных выше является то, что гофры отформовывают на участках заготовки, соответствующих стенкам будущего корытного профиля (рис. 2). Направление гофров – перпендикулярно продольной оси профиля.

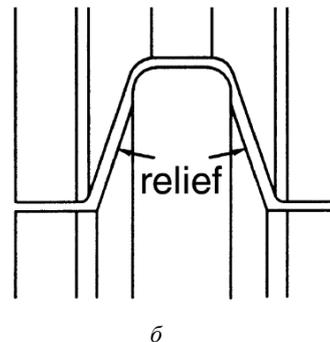


Рис. 2 – Пример выполнения корытного профиля с гофрами на боковых стенках [3]

С целью предохранения гофров от повреждения в калибрах валков общая ширина калибров выполняется больше на удвоенную высоту гофров.

Вертикальные гофры существенно повышают служебные характеристики таких профилей.

Известен способ изготовления замкнутых сварных гнутых профилей с продольными гофрами на боковых стенках [10]. Эти гофры формируются одновременно с другими элементами профиля. Они увеличивают продольную жесткость изделия.

В УкрНИИМете проведен эксперимент по получению корытного профиля при подгибке стенки под углом 35° в одном проходе. При этом на боковых стенках образовывались замкнутые гофры переменного сечения шириной до 10 мм и высотой до 1,5 мм, ориентированные под углом $\sim 45^\circ$ к направлению формовки с примерно одинаковым шагом между ними (рис. 3).

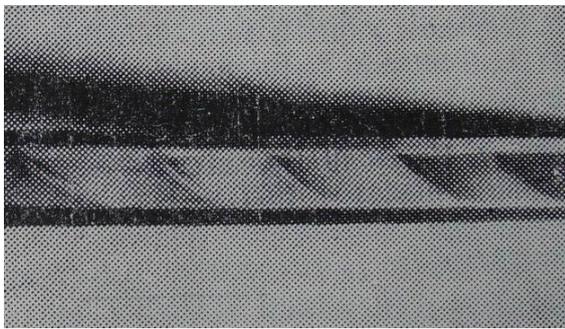


Рис. 3 – Участок стенки корытного профиля, полученный экспериментально при подгибке в одной клетке под углом 35° [11]

Подобный дефект описан в работе [4] при разработке технологии изготовления Т-образного профиля с жестким режимом формовки (рис. 4). Этот дефект располагается на вертикальных стенках. Его классифицируют как линии Чернова-Людерса, повреждения покрытия и локальные выпуклости металла.



Рис. 4 – Дефекты металла при формовке Т-образного профиля [4]

Целью работы является повышение служебных свойств гнутых профилей за счет формирования гофров, возникающих при потере устойчивости.

3. Особенности изготовления профилей.

Изломы на подгибаемых полках профиля имеют вид изогнутых несимметричных гофров. Открытой частью они расположены на кромке полки, а

сходящейся – соединены с местом изгиба полки со стенкой. Изломы на боковых стенках, ограниченные местами её изгиба с полкой и нижней стенкой, образуют относительно прямые глухие гофры, расположенные под углом примерно 45° . Расстояния между гофрами (шаг) одинаковые и равны высоте профиля. Таким образом, изломы на полке и изломы на стенке возникают в результате локальной потери устойчивости металла [12]. Причиной этому является упрочнение режима формовки. Изломы на полке искажают форму и размеры не только её самой, но и профиля в целом (продольный и поперечный изгибы), являясь дефектными признаками. Изломы же в виде прямых гофров, расположенных на линиях наибольших касательных напряжений стенок профиля и являющихся, по сути, упрочняющими элементами, называть дефектами не корректно.

Особенности технологии изготовления балки коробчатой заключаются в следующем. Само наличие наклонных гофров на профиле можно считать особенностью, поскольку до сего времени не встречались на практике профили, производимые формовкой в валках с такими гофрами. Предлагается полученные путем потери локальной устойчивости стенки наклонные гофры рассматривать как элементы, упрочняющие профиль.

На рис. 5 показаны периодически повторяющиеся изломы подгибаемой полки при формовке швеллера полками вниз. Угол подгибки полки 45° , её ширина – 40 мм. Толщина полосы – 0,5 мм. Точной зависимости между шириной полки и расстоянием между изломами не наблюдается. Излом в виде несимметричного гофра имеет несколько изогнутую форму: более широкую на кромке полки и сужающуюся выходящую к месту сопряжения полки со стенкой швеллера по излому боковой стенки коробчатого профиля. Для корытного профиля качество продукции должно быть выше, так как проблем доступа инструмента к местам изгиба практически нет. Следует отметить, что излом на полке контактирует с коническим элементом по узкой поверхности по форме сходной с вершиной этого гофра. Это можно наблюдать через прозрачный валок по методике [13].

Коробчатый профиль с гофрами на боковых стенках не только не уступает по прочностным свойствам тонкостенному профильному элементу С-образной формы с гофрами на стенке [14], а также тонкостенной металлической балке аналогичной формы и имеющей значительно больше ребер жесткости (гофров) [15], но и значительно их превосходит. Это объясняется тем, что наклонные под 45° гофры расположены на линиях максимальных касательных напряжений, и они заполняют всю поверхность боковых стенок. Сам же способ изготовления значительно проще и не требует каких-либо дополнительных действий, инструмента, приспособлений и пр.

На рис. 6 приведен 12 метровый профиль коробчатой формы $56 \times 56 \times 1,2$ мм с наклонными гофрами на боковых стенках. По этой технологии произведена промышленная партия профилей «Балка коробчатой формы $56 \times 56 \times 1,2$ мм с наклонными

гофрами на боковых стенках». Партия таких профилей была использована строительной организацией. Претензий к качеству не было.

Поскольку имеется положительный опыт такого производства его необходимо расширять и рекламировать.



Рис. 5 – Фрагмент полки швеллера с изломами в результате потери устойчивости металла



Рис. 6 – Тонкостенная балка коробчатой формы с наклонными гофрами на боковых стенках 56x56x1,2 мм

Выводы. Применение искусственной потери устойчивости при реализации технологии изготовления профиля «Балка тонкостенная коробчатой формы с наклонными гофрами на боковых стенках 56x56x1,2 мм» на профилегибочном стане позволило получить указанный профиль с наклонными гофрами как имеющий упрочняющие элементы.

Получение гофров осуществлялось в одном технологическом переходе совместно с подгибкой стенок, на которых они отформованы, при этом не задействовали дополнительных устройств.

Целесообразно провести исследования, направленные на определение технического эффекта применения новшества и на расширение сферы его использования.

Список литературы

1. Тришевский И. С., Докторов М. Е. *Теоретические основы процесса профилирования*. Москва: Металлургия, 1980. 287 с.
2. Давыдов В. И., Максаков М. П. *Производство гнутых тонкостенных профилей*. Москва: Металлургия, 1959. 240 с.
3. Halmos G. T., ed. *Roll Forming Handbook*. Boca Ration, CRC Press, 2006. 583 p.
4. Филимонов С. В. *Формообразование в роликах профилегибочных станков тонкостенных многоэлементных профилей с элементами жёсткости: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.09*. Самара, 2017. 475 с.
5. Бровман Т. В., Горященко А. Б., Васильев М. Г., Ухабов С. С. Пат. 2491144, Российская Федерация. *Способ изготовления полых цилиндрических изделий*. 2013.
6. Ахлестин А. В. О путях повышения качества тонкостенных гнутых профилей с покрытием. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр.* Краматорськ: ДДМА. 2004. С. 614-619.
7. Тришевский О. И., Янчинский А. П., Дебердеев Р. Ю., Ковалёв В. И., Плеснецов Ю. А. Упрочнение и увеличение жесткости листовых заготовок методом валковой формовки. *Теория и технология производства гнутых профилей проката*. Харьков: УкрНИИМет, 1981. С. 85-88.

8. Тришевский О. И., Бондаренко С. Н. Нанесение упрочняющих рифлений на плоские элементы гнутых профилей как фактор снижения металлоёмкости продукции. *Вісник Харківського Національного технічного університету сільськогосподарства*. Харків: ХНТУСГ. 2011. Вип. 115: «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільгосподарському виробництві». С. 31-35.
9. Филимонов С. В., Кокорина И. В., Филимонов В. И. Предварительное деформационное упрочнение заготовок при формовке гнутых профилей в роликках методом интенсивного деформирования. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2016, № 6. С. 18-22.
10. Докторов М. Е., Пшеничная Н. В., Кириенко-Гринь Е. И., Горбач Е. Н., Олейник Г. В., Мирошниченко С. В. А. с. 1579603, СССР. *Способ изготовления замкнутых сварных гнутых профилей с гофрами на боковых стенках*. 1990.
11. Юрченко А. Б., Брыков К. С., Мар'ян В. С., Каширский С. А. Организация производства гнутых профилей для объектов энергетики. *Гнутые профили проката: Отрасл. сб. научн. тр.* Харьков: УкрНИИМет, 1987. С. 75-84.
12. Яковлев С. С., Ремнев К. С. Критерий локальной потери устойчивости ортотропного анизотропно упрочняющегося листа. *Известия Тульского гос. ун-та*. Тула: ТулГУ, 2011. Вып. 4: Технические науки. С. 109-113.
13. Левченко В. М., Ахлестин О. В. Пат. 60780, Україна. *Спосіб визначення форми і розмірів фактичної поверхні контакту взаємодіючих тіл*. 2005.
14. Ткаченко С. В., Глазунов А. Ю., Бобряшов В. М., Насонкин В. Д., Горпинченко В. М. Пат. 2203758. Российская Федерация. *Тонкостенный профильный элемент*. 2003.
15. Маслов В. К., Лютов А. М., Росляков В. Ф., Кашкинов П. П., Олейник Г. В., Смирнов Б. А., Дмитриев А. Н. Пат. 2137891, Российская Федерация. *Тонкостенная металлическая балка*. 1999.
- thematic collection of scientific papers]. Kramatorsk, DDMA Publ. 2004, pp. 614-619.
7. Trishevskiy O. I., Yanchinskiy A. P., Deberdeev R. Yu., Kovalev V. I., Plesnetsov Yu. A. Uprochnenie i uvelichenie zhestkosti listovikh zagotovok metodom valkovoy formovki [The hardening and increasing stiffness of the sheets blanks by the method of roll forming]. *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva gnutykh profiley prokata* [The theory and technology of production of cold roll profiles]. Kharkov, UkrNIIMet Publ., 1981, pp. 85-88.
8. Trishevskiy O. I., Bondarenko S. N. Nanesenie uprochnyayushchikh rifleniy na ploskie elementy gnutykh profiley kak faktor snizheniya metalloemkosti produktsii [The application of reinforcing riffls on flat elements of cold roll profiles as the factor in reducing the metal intensity of products]. *Visnyk Kharkivskoho Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva* [The bulletin of the Kharkov National Technical University of Agriculture]. Kharkiv, KhNTUSH Publ. 2011, issue 115: «Tekhnichniy servis APK, tekhnika ta tekhnolohii u silhospodarskomu vyrobnytvu» [«The technical service of the agro-industrial complex, equipment and technology in agricultural production»], pp. 31-35.
9. Filimonov S. V., Kokorina I. V., Filimonov V. I. Predvaritel'noe deformatsionnoe uprochnenie zagotovok pri formovke gnutykh profiley v rolikakh metodom intensivnogo deformirovaniya [The preliminary strain hardening of blanks under cold roll forming profiles in rollers by intensive deformation]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [The strengthening technologies and coatings]. 2016, issue 6, pp. 18-22.
10. Doktorov M. E., Pshenichnaya N. V., Kirienko-Grin' E. I., Gorbach E. N., Oleynik G. V., Miroshnichenko S. V. *Sposob izgotovleniya zamknytykh svarnykh gnutykh profiley s goframi na bokovykh stenkakh* [The method of manufacturing closed welded cold roll profiles with corrugations on the side walls]. Copyright certificate USSR, no 1579603, 1990.
11. Yurchenko A. B., Brykov K. S., Mar'in V. S., Kashirskiy S. A. Organizatsiya proizvodstva gnutykh profiley dlya ob'ektov energetiki [The organization of production of cold roll profiles for energy facilities]. *Gnutye profili prokata: Otrasl. sb. nauchn. tr.* [The cold roll profiles: The branch collection of scientific papers]. Kharkov: UkrNIIMet Publ., 1987, pp. 75-84.
12. Yakovlev S. S., Remnev K. S. Kriteriy lokal'noy poteri ustoychivosti ortotropnogo anizotropno uprochnyayushchegosya lista [The criterion of local loss of stability of orthotropic anisotropic hardening sheet]. *Izvestiya Tul'skogo gos. un-ta* [The news of Tula State University]. Tula, TulGU Publ., 2011, issue. 4: Tekhnicheskie nauki [The technical science], pp. 109-113.
13. Levchenko V. M., Akhlestin O. V. *Sposib vyznachennia formy i rozmiriv faktychnoi poverkhni kontaktu vzaemodiuyuchykh til* [The method for determining the shape and size of the actual contact surface of the interacting bodies]. Pat. UA, no 60780, 2005.
14. Tkachenko S. V., Glazunov A. Yu., Bobryashov V. M., Nasonkin V. D., Gorpinchenko V. M. *Tonkostennyi profil'nyy element* [The thin-walled profile element]. Pat. RF, no 2203758, 2003.
15. Maslov V. K., Lyutov A. M., Roslyakov V. F., Kashkinov P. P., Oleynik G. V., Smirnov B. A., Dmitriev A. N. *Tonkostennaya metallicheskaya balka* [The thin-walled metal beam]. Pat. RF, no 2137891, 1999.

References (transliterated)

1. Trishevskiy I. S., Doktorov M. E. *Teoreticheskie osnovy protsessy profilirovaniya* [The theoretical foundations of the profiling process]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 287 p.
2. Davydov V. I., Maksakov M. P. *Proizvodstvo gnutykh tonkostennykh profiley* [The production of cold roll thin-walled profiles]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1959. 240 p.
3. Halmos G. T., ed. *Roll Forming Handbook*. Boca Ration, CRC Press, 2006, 583 p.
4. Filimonov S. V. *Formoobrazovanie v rolikakh profilegibochnykh stankov tonkostennykh mnogoelementnykh profiley s elementami zhestkosti: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.02.09* [The forming in rolls of roll forming machines of thin-walled multi-element profiles with stiffeners. Dr. eng. sci. diss.]. Samara, 2017. 475 p.
5. Brovman T. V., Goryashchenko A. B., Vasil'ev M. G. Ukhayov S. S. *Sposob izgotovleniya polykh tsilindricheskikh izdeliy* [The method of manufacturing hollow cylindrical products]. Pat. RF, no 2491144, 2013.
6. Akhlestin A. V. O putyakh povysheniya kachestva tonkostennykh gnutykh profiley s pokrytiem. [On ways to improve the quality of thin-walled cold roll profiles with coating] *Udoskonalennia protsesiv i obladnannia obrobky tyskom v metalurhii i mashynobuduvanni: Tematychn. zb. nauk. pr.* [The improvement of metal forming processes and equipment in metallurgy and mechanical engineering. The

Посмунила (received) 31.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ахлестін Олександр Володимирович (Akhlestin Aleksandr Vladimirovich, Akhlestin Oleksandr Volodymyrovych) – директор ТОВ «Роллформ», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3627-0937>; e-mail: form2@i.ua

Левченко Володимир Миколайович (Levchenko Vladimir Nikolaevich, Levchenko Volodymyr Mykolayevich) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Донбаська державна машинобудівна академія, докторант кафедри обробки металів; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2411-4198>; e-mail: goldangel271@gmail.com

А. В. АШКЕЛЯНЕЦЬ, Д. В. КОНОВОДОВ, В. В. АНДРЕЄВ, О. В. БОНДАРЕНКО

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНИ ТА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПРИ ВІЛЬНОМУ КУВАННІ ЗАГОТОВОК ІЗ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ З ПИТОМОЮ МІЦНІСТЮ БІЛЬШЕ 120 м²/с²

Застосування в сучасній промисловості нових матеріалів з особливими властивостями, наприклад, питома міцність яких 120 м²/с², найактуальніше завдання. Одними з таких матеріалів є високоміцні алюмінієві сплави системи Al-6%Mg, які додатково леговані скандієм. Наявність зниженої пластичності в традиційних умовах деформації призводить до складності/неможливості їх обробки, що пов'язано з можливою появою гарячих тріщин. Сучасні технології деформаційної обробки високоміцних сплавів включають в себе операції попередньої обробки литої структури – гомогенізації, і проміжну термічну обробку – відпал. Використання зазначених технологічних операцій при виробництві готових виробів призводить до суттєвого підвищення їх собівартості. Використання операцій вільного кування в якості попередньої обробки литої структури перед прямим пресуванням дозволить уникнути витрат на термічну обробку матеріалу.

Виконано дослідження формозміни і напруженого стану металу при вільному куванні заготовок з алюмінієвого сплаву Al-6%Mg, які леговані скандієм. Для досягнення зазначеної мети в роботі поставлені наступні задачі: створення математичної моделі операцій осадження і «протягання»; аналіз формозміни заготовок, отриманих при моделюванні, шляхом порівняння з експериментальними даними; дослідження напруженого стану металу з метою оцінки можливого пропрацювання структури металу. Дослідження операцій осадження і протягання проведено для умов: температура нагріву заготовки – 400 °С; температура робочого інструмента – 200 °С; устаткування – пневматичний молот зі швидкістю переміщення інструменту 6000 мм/с.

Аналіз формозміни заготовок показав високу точність математичної моделі, відносна похибка якої не перевищує 5%, в порівнянні з експериментальними даними. Встановлено, що спільне використання операцій осадження і подальше протягання призводить до суттєвого пропрацювання металу, однак, в свою чергу, і носить негативний характер – можлива поява тріщин в центральній області зразка, що пов'язано з виникненням високих за величиною напружень, що розтягують.

Ключові слова: алюміній, скандій, заготовка, математична модель, осадження, протягання, формозміна, напруження.

А. В. АШКЕЛЯНЕЦЬ, Д. В. КОНОВОДОВ, В. В. АНДРЕЄВ, О. В. БОНДАРЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ СВОБОДНОЙ КОВКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С УДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ БОЛЬШЕ 120 м²/с²

Применение в современной промышленности новых материалов с особенными свойствами, например, удельная прочность которых 120 м²/с², наиболее актуальная задача. Одними из таких материалов являются высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al-6%Mg, которые дополнительно легированы скандием. Наличие сниженной пластичности в традиционных условиях деформации приводит к сложности/невозможности их обработки, что связано с возможным появлением горячих трещин. Современные технологии деформационной обработки высокопрочных сплавов включают в себя операции предварительной обработки литой структуры – гомогенизации, и промежуточную термическую обработку – отжиг. Использование указанных технологических операций при производстве готовых изделий приводит к существенному повышению их себестоимости. Использование операций свободнойковки в качестве предварительной обработки литой структуры перед прямым прессованием позволит избежать затрат на термическую обработку материала.

Выполнено исследование формоизменения и напряженного состояния металла при свободнойковке заготовок из алюминиевого сплава Al-6%Mg, которые легированы скандием. Для достижения указанной цели в работе поставлены задачи: создание математической модели операций «осадка» и «протяжка»; анализ формоизменения заготовок, полученных при моделировании, путем сравнения с экспериментальными данными; исследование напряженного состояния металла с целью оценки возможной проработки структуры металла. Исследование операций «осадка» и «протяжка» проведены для условий: температура нагрева заготовки – 400 °С; температура рабочего инструмента – 200 °С; оборудование – пневматический молот со скоростью перемещения инструмента 6000 мм/с.

Анализ формоизменения заготовок показал высокую точность математической модели, относительная погрешность которой не превышает 5%, в сравнении с экспериментальными данными. Установлено, что совместное использование операций осадки и протяжки приводит к существенной проработки металла, однако, в свою очередь, и носит негативный характер – возможное появление трещин в центральной области образца, что связано с возникновением высоких по величине растягивающих напряжений.

Ключевые слова: алюминий, скандий, заготовка, математическая модель, осадка, протяжка, формоизменение, напряжение.

A. V. ASHKELIANETS, D. V. KONOVODOV, V. V. ANDREIEV, O. V. BONDARENKO

INVESTIGATION OF FORM CHANGE AND STRESS STATE IN THE FREE FORGING OF ALUMINUM ALLOY BILLET WITH A SPECIFIC STRENGTH MORE THAN 120 м²/sec²

The use of new materials with special properties in modern industry, for example, the specific strength of which is 120 м²/s², is the most actual task. One of such materials are high-strength aluminum alloys of the Al-6%Mg system, which are additionally alloyed with scandium. The presence of reduced ductility in traditional deformation conditions leads to the complexity/impossibility of their processing, which is associated with the possible appearance of hot cracks. Modern technologies of deformation processing of high-strength alloys include pretreatment operations of the cast structure – homogenization, and intermediate heat treatment – annealing. The use of these technological operations in the production of finished products leads to a significant increase in their cost. The use of free forging operations as a pretreatment of the cast structure before to direct extrusion will avoid the cost of heat treatment of the material.

The study of the form-changes and stress state of the metal in the free forging of billets of aluminum alloy Al-6%Mg, which are alloyed with scandium was done. To achieve this goal in the work set tasks: the creation of a mathematical model of operations upsetting and forging drawing; analysis of the form-changes of the billet which obtained in the simulation, by comparison with experimental data; study of the stress state of the metal in order to assess the possible pretreatment of the metal structure. The investigations of the operations upsetting and forging drawing were carried out for the following conditions: the heating temperature of the billet is 400 °C; working tool temperature is 200 °C; equipment is a pneumatic hammer with a tool displacement speed of 6000 mm/s.

The analysis of the form-changes billets showed a high accuracy of the mathematical model, the relative error of which does not exceed 5% in comparison with the experimental data. It has been established that the joint use of upsetting and forging drawing leads to a substantial averaging of the metal structure, however, in turn, and is negative – the possible appearance of cracks in the central zone of the sample, which is associated with the occurrence of high tensile stresses.

Keywords: aluminum, scandium, billet, mathematical model, upsetting, forging drawing, form-changes, stress.

Вступ. Актуальною задачею сучасного виробництва металів та сплавів є отримання матеріалів з особливими властивостями. Обробка тиском таких матеріалів дозволяє отримати вироби з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Однією з таких характеристик є питома міцність. Високі значення даного показника важливі при створенні конструкцій та деталей машин, які володіють високою міцністю при малій вазі.

До сплавів з високою питомою міцністю можна віднести алюмінієві сплави системи Al-Mg, які леговані скандієм, зокрема сплави із вмістом 5,5...6,5% мас. Mg та 0,3...0,5% мас. Sc. Межа міцності виробів із даних сплавів після кінцевої деформаційної обробки досягає 390-410 МПа [1], що відповідає величині питомої міцності $120 \text{ м}^2/\text{с}^2$. На даний час вказані сплави розглядаються в промисловості як заміники дюралюмінію та нержавіючих сталей. За хімічним складом вони близькі до традиційних алюмінієво-магнієвих сплавів та відрізняються лише наявністю скандію. Недоліком вищевказаних сплавів є складність обробки тиском, що пов'язано з їх низькою пластичністю у звичайних умовах деформації. Тому дослідження процесів обробки тиском цих сплавів куванням є актуальними.

Аналіз відомих публікацій. Відомо, що рекомендований діапазон температур гарячої деформації сплавів Al-6%Mg, які леговані скандієм складає 370-530 °C [2, 3]. Цей інтервал температур обрано із-за наявності максимуму пластичності матеріалу в гарячому стані. В той самий час гаряча деформація в цій області температур часто супроводжується утворенням гарячих тріщин і навіть руйнуванням зразків в процесі обробки тиском. У науковій літературі існують дані, які виділяють дві головні причини появи тріщин у процесі деформації сплавів Al-Mg-Sc: оплавлення границь зерен та наявність концентраторів напружень на границях зерен у вигляді плівкових фаз [4]. Однак, якщо першу проблему можна вирішити шляхом використання процесу високотемпературної формовки в умовах надпластичності [5], то для мінімізації другої – необхідна попередня гомогенізація структури вихідних заготовок.

З метою зменшення вірогідності появи тріщин використовують термічну обробку вилівка, яка забезпечує вирівнювання хімічного складу по магнію [6, 7]. Наприклад, для алюмінієвого сплаву з вмістом 5,8% Mg та 0,3% Sc тривалість термічної обробки складає 25...100 годин [8].

В роботі [9], при виробництві заготовок з титанового сплаву, запропоновано, у якості попередньої обробки, використовувати процеси осадки та кручення. Показано, що попередня деформаційна обробка дозволяє отримати рівноосну дрібнозернисту структуру. Такий підхід може бути використаний при обробці тиском сплавів Al-6%Mg, які додатково леговані скандієм, з метою підготовки литої структури для подальшої деформації. Це дає змогу уникнути довготривалої термічної обробки (гомогенізації). Однак, на даний час відсутні відомості

про поведінку вказаних сплавів в процесах вільного кування.

Метою даної роботи є дослідження формозміни та напруженого стану металу при вільному куванні заготовок із алюмінієвого сплаву Al-6%Mg, який додатково легований скандієм (5,8% мас. Mg та 0,3% мас. Sc).

Результати роботи. Дослідження формозміни та напруженого стану при вільному куванні заготовки зі сплаву Al-6%Mg, виконано шляхом математичного моделювання у програмі Forge3. Використання ліцензійного програмного продукту (ПП) Forge3 [10], який засновано на базі методу скінчених елементів, дозволило виконати теоретичне дослідження двох операцій кування: попереднє осадження та наступне протягання заготовки. Можливість використання вказаного ПП надана в рамках проекту DAAD «Praxispartnerschaft Metallurgie» в університеті ім. Лейбніца (м. Ганновер, Федеративна Республіка Німеччина).

Осадження виконували в підкладному кільці з метою формування хвостовика у нижній частині заготовки. Хвостовик використовувався для утримання заготовки при виконанні операції протягання.

Результати математичного моделювання операції осадження, а саме формозміна заготовки, були порівняні з результатами натурального експерименту з метою перевірки точності заданих граничних умов при математичному моделюванні.

При виконанні операції осадження була обрана ступінь деформації 20% і 40%. Температура нагріву заготовки $T_0=400 \text{ °C}$; температура інструменту $T_{інстр}=200 \text{ °C}$; діаметр та висота заготовки склали відповідно $D_0=40 \text{ мм}$ та $H_0=80 \text{ мм}$. В якості деформуючого обладнання був обраний пневматичний молот зі швидкістю переміщення інструменту $V_{молот}=6000 \text{ мм/с}$. Для опису реологічних властивостей матеріалу вихідної заготовки було обрано модель Хензеля-Шпіттеля із коефіцієнтами рівняння регресії, які попередньо отримані після статистичної обробки пластометричних випробувань в гарячому стані [11].

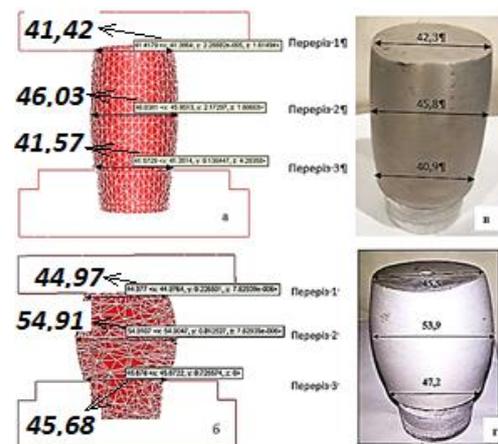


Рис. 1 – Формозміна заготовки при виконанні операції осадження: а, б – розміри зразків у контрольних перерізах, що отримані при математичному моделюванні зі ступенем деформації 20% та 40% відповідно; в, г – розміри зразків у контрольних перерізах, які отримані при фізичному моделюванні зі ступенем деформації 20% та 40% відповідно

З метою аналізу формозміни заготовки після проведення операції осадження, були обрані контрольні перерізи: 1 – верхній діаметр у перерізі осадженого зразка; 2 – середина висоти осадженого зразка, яка відповідає діаметру по бочці; 3 – нижній діаметр у перерізі осадженого зразка.

На рис. 1 наведено перерізи зразків, які отримані у результаті математичного та фізичного моделювання операції осадження.

На рис. 2 наведено співставлення результатів математичного та фізичного моделювання щодо формозміни зразків під час виконання операції осадження.

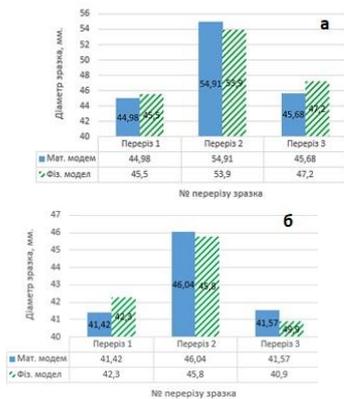


Рис. 2 – Співставлення експериментальних даних та результатів математичного моделювання формозміни заготовки при осадженні: а – ступінь деформації 20%; б – ступінь деформації 40%

З рисунку 2 видно, що розбіжність між теоретичними та експериментальними даними формозміни заготовки не перевищує 5%.

Напружено-деформований стан заготовки в процесі осадження, характеризували величиною та розподілом напружень і показника деформації.

На рис. 3 наведено результати математичного моделювання щодо розподілу напружень та показника деформації у поперечному перерізі заготовки при осадженні зі ступенем деформації 20%.

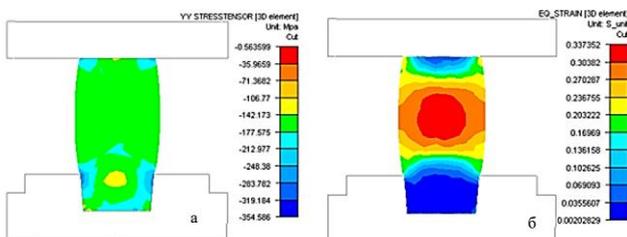


Рис. 3 – Результати математичного моделювання напружень на деформації при осадженні зразка циліндричної форми в підкладному кільці зі ступенем деформації 20%:

а – розподіл напружень по перерізу зразка; б – розподіл показника деформації по перерізу зразка.

При аналізі зображення (рис. 3, а), на якому наведено розподіл напружень по перерізу заготовки, видно, що по всьому перерізу зразка всі напруження стискаючі та знаходяться в діапазоні від -212 МПа до -106 МПа. Це свідчить про те, що при даному ступені деформації зразок буде деформуватися без руйнування чи утворення тріщин на боковій поверхні. При проведенні експериментальних досліджень це

підтвердилось оглядом отриманих зразків (див. рис. 1, в).

Показник деформації (рис. 3, б) вказує на пропрацювання структури матеріалу зразка. З рис. 3, а видно, що найбільше значення цього показника складає 0,33 та знаходиться в центральній частині, але ця частина має невеликий розмір відносно розміру всього перерізу, що свідчить про досить велику неоднорідність деформації. Це може призвести до отримання неоднорідної структури при виконанні подальшої операції протягання.

З рис. 4, а видно, що напруження, які виникають по перерізу зразка при ступені деформації 40%, стискаючі, та знаходяться в діапазоні від -258 МПа до -57 МПа.

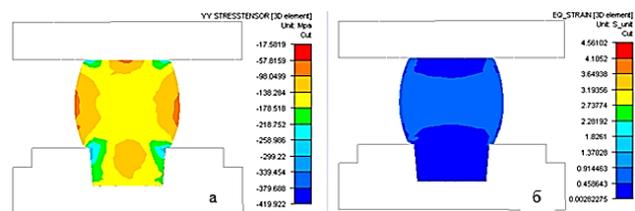


Рис. 4 – Результати математичного моделювання напружень та деформації при осадженні зразка циліндричної форми в підкладному кільці зі ступенем деформації 40%:

а – розподіл напружень по перерізу зразка; б – розподіл показника деформації по перерізу зразка

Це також свідчить, що при деформації 40% зразок формозмінюється без утворення поверхневих дефектів, що підтверджується експериментальними дослідженнями (рис. 1, г). Але на зовнішній поверхні зразка напруження, які виникають в процесі деформації мають набагато менші значення ніж у центральній частині. Це вказує на те, що при збільшенні ступеня деформації на поверхні зразка, напруження можуть змінитися зі стискаючих на розтягуючі, що може призвести до утворення тріщин.

Аналіз показника деформації (рис. 4, б) вказує на те, що при ступеню деформації 40% пропрацювання структури зразка краще і більш однорідне, ніж при ступені деформації 20%. На зображенні видно, що найбільше значення цього показника дорівнює 1,82 та знаходиться майже по всьому перерізу зразка окрім хвостової частині і зони прилипання на контакт з верхнім інструментом. Це свідчить про те, що при подальшій деформації при виконанні операції протягання буде отримано більш однорідний розподіл показника деформації.

Для моделювання процесу протягання були використані дані про напружено-деформований стан заготовки після операції осадження. Вихідні розміри заготовки дорівнювали тим, які були отримані після попередньої операції осадження. Кінцевий діаметр заготовки при математичному моделювання дорівнював 45 мм.

Температура нагріву заготовки складала $T_0=400$ °С; температура інструменту – $T_{інстр}=200$ °С. У якості деформуючого обладнання був обраний пневматичний молот із швидкістю переміщення інструменту $V_{молот}=6000$ мм/с.

На рис. 5 представлено вид зразка до і після виконання операції протягання. Операція протягання виконувалась з чітко обумовленими кутами кантування, які варіювались від 15° до 90° та послідовною подачею на задану величину в діапазоні 0,4-0,8 ширини бойка молота.

На рис. 5, а зображена вихідна заготовка для моделювання операції протягання, яка отримана після виконання операції осадження.

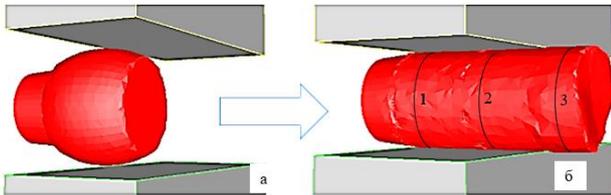


Рис. 5 – Формозміна осадженого зразка при виконанні операції протягання: а – форма зразка до виконання операції протягання; б – форма зразка після виконання операції протягання

На рис 5, б наведено форма зразка після операції протягання, а також місця контрольних перерізів для подальшого аналізу отриманих результатів.

На рис. 6, а наведено розподіл напружень та показника деформації по перерізам зразка 1, 2, 3 (см. рис. 5, б) після виконання операції протягання.

В 1-му та 2-му перерізі напруження, які виникають, мають стискаючий характер і знаходяться в діапазоні від -79 МПа до -17 МПа. У 3-му перерізі, в центральній частині, мають місце напруження розтягнення з величиною 4 МПа. Це свідчить про те, що в центральній частині переднього кінця заготовки є велика ймовірність утворення тріщин.

На рис. 6, б наведено показник деформації, величина якого знаходиться у діапазоні від 2,56 до 3,36. Ці значення є більшими ніж при операції осадження. Аналіз цього показника по перерізам показав, що бочкоутворення, яке з'являється після виконання операції осадження, призводить до неоднорідності деформації по довжині заготовки.

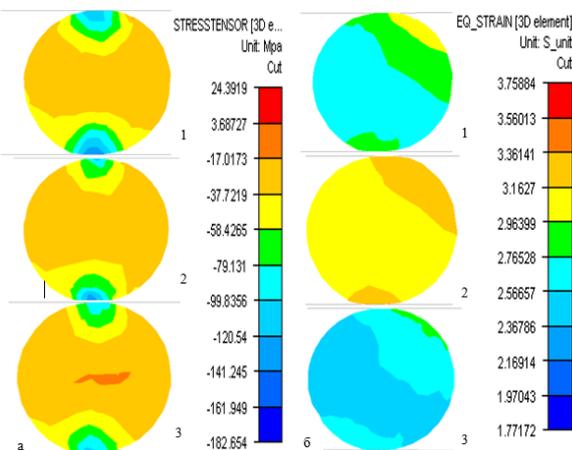


Рис. 6 – Результати математичного моделювання напружень та деформації при виконанні операції протягання попередньо осадженого зразка: а – розподіл напружень у контрольних перерізах заготовки; б – розподіл показника деформації у контрольних перерізах заготовки

З рис. 6, б видно, що у 2-му перерізі показник деформації має найбільші значення і знаходиться в

діапазоні від 2,96 до 3,36. При цьому у 1-му та 3-му перерізах, цей показник має від 2,36 до 3,16.

Для перевірки результатів математичного моделювання операції протягання, були проведені експериментальні дослідження протягання попередньо осаджених зразків. На рис. 7 наведено фото отриманого зразка.



Рис. 7 – Вигляд попередньо осадженого зразка після операції протягання

Результати експериментальних досліджень підтвердило адекватність математичної моделі. Це вказує на вірний вибір граничних умов та реологічних властивостей матеріалу при проведенні математичного моделювання. Також математична модель дозволяє прогнозувати напружено-деформований стан заготовки у процесі протягання. Це підтверджується утворенням дефекту в центральній частині на передньому кінці заготовки, яке викликають напруження розтягання.

Висновки. Запропоновано для гомогенізації структури сплаву системи Al-6%Mg, який додатково легований скандієм, застосовувати операції осаджування та протягання.

Створено математичну модель процесу осаджування та протягання у програмі Forge3. Досліджено формозміну заготовки зі сплаву системи Al-6%Mg при осадженні зі ступенями деформації 20% та 40%. Порівняльний аналіз даних математичного моделювання з результатами експериментальних досліджень показав, що різниця у геометричних розмірах зразків після осадження при математичному моделюванні та натурному експерименті не перевищує 5%.

Досліджено напружено-деформований стан заготовки зі сплаву системи Al-6%Mg при осадженні та протяганні. Встановлено, що при осадженні зі ступенем деформації 40%, деформації розподіляється по перерізу заготовки більш рівномірно. Також встановлено, що при виконанні наступної операції протягання, на передньому кінці, в середині заготовки, можуть виникати напруження розтягання. Наявність цих напружень може призводити до появи дефектів у вигляді тріщин. Даний факт був підтверджений експериментальними дослідження операції протягання на пневматичному молоті.

Отримана математична модель може бути використана для прогнозування формозміни та напружено-деформованого стану заготовки зі сплаву системи Al-6%Mg, який додатково легований скандієм, при виконання операцій вільного кування – осадження та протягання.

Список літератури

1. Бронз А. В. Сплав 1570с – материал для герметичных конструкций перспективных многофазовых изделий РКК «Энергия» / [Бронз А.В., Ефремов В.И., Плотников А.Д., Чернявский А.Г.] // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 4 (7). – С. 62–67.
2. Автократова Е.В. Перспективный Al-Mg-Sc сплав для самолетостроения / Е. В. Автократова // Вестник уфимского государственного авиационного технического университета. – 2007. – Т. 9. – № 1. – С. 182–183.
3. Roynet J. Kinetics and mechanisms of precipitation in an Al–0.2 wt. % Sc alloy / Roynet J., Ryum N. // Materials Science and Engineering. – 2005. – А 39 – PP. 409–422. – doi: 10.1016/j.msea.2005.02.015.
4. Филатов Ю.А. Деформируемые сплавы на основе системы Al-Mg-Sc и перспективы их применения в автомобилестроении / Ю.А. Филатов // Цветные металлы. – 1997. – № 2. – С. 60–62.
5. Автократова Е.В. Перспективный Al-Mg-Sc сплав для самолетостроения / Е. В. Автократова // Вестник уфимского государственного авиационного технического университета. – 2007. – Т. 9. – № 1. – С. 182–183.
6. Добаткин, В. И. Гранулируемые алюминиевые сплавы / В. И. Добаткин, В. И. Елагин. – М.: Metallurgiya, 1981. – 176 с.
7. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. – М.: Metallurgiya, 1978. – 248 с.
8. Приходько М. В. Дослідження впливу гомогенізації на структурні зміни в алюмінієвому сплаві Al-Mg-Mn-Sc / [М. В. Приходько, В. В. Андреев, О. Ф. Леднянский, О. В. Бондаренко] // Пластическая деформация металлов. : сб. научн. трудов в 2-х томах. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – Т. 2. – С. 237–241.
9. А. Е. Волков. Деформация сдвигом методом кручения, осадки и прессования / Волков А. Е. / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgiya. – 2016. – Т. 16. – № 4. – С. 129–139. – DOI: 10.14529/met160415
10. J. L. Chenot / Forge 3 – a general tool for practical optimization of forging sequence of complex three-dimensional parts in industry / Chenot J. L., Fourment L., Coupez T, Ducloux R., Wey E. // Forging and Related Technology. – Birmingham, (UK). – 1998. – P. 113–122.
11. Исследование реологических свойств алюминиевого сплава системы Al-Mg-Sc / А. Н. Головкин, Я. В. Фролов, В. В. Андреев [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2012. – No1-2 (90-91). – С. 98–100.

References (transliterated)

1. Bronz A. V. Splyav 1570s – material dlya germetichnykh konstruksiy perspektivnykh mnogofazovykh izdeliy RKK «Energiya» / [Bronz A.V., Yefremov V.I., Plotnikov A.D., Chernyavskiy A.G.] // Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. – 2014. – No 4 (7). – P. 62–67.
2. Avtokratova Ye.V. Perspektivnyy Al-Mg-Sc splyav dlya samoletostroyeniya / Ye. V. Avtokratova // Vestnik ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. – 2007. – Vol. 9. – No 1. – P. 182–183.
3. Roynet J. Kinetics and mechanisms of precipitation in an Al–0.2 wt. % Sc alloy / Roynet J., Ryum N. // Materials Science and Engineering. – 2005. – А 39 – PP. 409–422. – doi: 10.1016/j.msea.2005.02.015.
4. Filatov YU.A. Deformiruyemye splyavy na osnove sistemy Al-Mg-Sc i perspektivy ikh primeneniya v avtomobilostroyenii / YU.A. Filatov // Tsvetnyye metally. – 1997. – No 2. – P. 60–62.
5. Avtokratova Ye.V. Perspektivnyy Al-Mg-Sc splyav dlya samoletostroyeniya / Ye. V. Avtokratova // Vestnik ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. – 2007. – Vol. 9. – No 1. – P. 182–183.
6. Dobatkin, V. I. Granuliruyemye alyuminiyevyye splyavy / V. I. Dobatkin, V. I. Yelagin. – Moscow: Metallurgiya, 1981. – 176 p.
7. Bokshiteyn B. S. Diffuziya v metallakh. – Moscow: Metallurgiya, 1978. – 248 p.
8. Prikhod'ko M. V. Doslidzhennya vplyvu gomogenizatsii na strukturni znini v alyuminiyevomu splyavi Al-Mg-Mn-Sc / [M. V. Prikhod'ko, V. V. Andreev, O. F. Lednyans'kiy, O. V. Bondarenko] // Plasticheskaya deformatsiya metallov.: sb. nauchn. trudov v 2-kh tomakh. – Dnepropetrovsk : Aktsent PP, 2014. – Vol. 2. – P. 237–241.
9. A. Ye. Volkov. Deformatsiya sdvigom metodom krucheniya, osadki i pressovaniya / Volkov A. Ye. / Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya. – 2016. – Vol. 16. – No 4. – P. 129–139. – DOI: 10.14529/met160415
10. J. L. Chenot / Forge 3 – a general tool for practical optimization of forging sequence of complex three-dimensional parts in industry / Chenot J. L., Fourment L., Coupez T, Ducloux R., Wey E. // Forging and Related Technology. – Birmingham, (UK). – 1998. – P. 113–122.
11. Issledovaniye reologicheskikh svoystv alyuminiyevogo splyava sistemy Al-Mg-Sc / A. N. Golovko, YA. V. Frolov, V. V. Andreyev [i dr.] // Teoriya i praktika metallurgii. – 2012. – No1-2 (90-91). – P. 98–100.

Надійшла (received) 01.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ашкелянець Антон Володимирович (Ашкелянец Антон Владимирович, Ashkelianets Anton V.) – кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О. П. Чекмарьова, e-mail: ashkelyanets@metal-forming.org.

Коноводов Дмитро Володимирович (Коноводов Дмитрий Владимирович, Konovodov Dmytro V.) – кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О. П. Чекмарьова, e-mail: konovodov@metal-forming.org.

Андреев Віталій Валерійович (Андреев Виталий Валериевич, Andreyev Vitalii V.) – кандидат технічних наук, Національна металургійна академія України, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О. П. Чекмарьова, e-mail: andreyev@metal-forming.org.

Бондаренко Олег Віталійович (Бондаренко Олег Витальевич, Bondarenko Oleh V.) – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, доцент кафедри технології виробництва.

УДК 621.791.01: 536.2

УДК 681.5.033.5

А. Ю. БОНДАРЕНКО, И. И. КЛЮЧНИК, А. Д. БЕМБЕЛЬ**ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРОВ**

В работе рассматриваются динамические характеристики пьезоэлектрических детекторов, а именно переходные процессы при их реакции на импульсное тепловое воздействие. Отмечены особенности переходных характеристик как при нагревании, так и при охлаждении детектора. Полученные зависимости использованы при разработке симулятора пьезоэлектрического преобразователя, с помощью которого возможен анализ и визуализация характеристик как существующих детекторов, так и вновь разрабатываемых. Указаны примеры использования пьезодетекторов, для которых переходные характеристики наиболее важны. Разработанный симулятор может быть использован и в учебных целях.

Ключевые слова: пьезоэлектрический детектор, переходной процесс, тепловой поток, пьезоэлектрический ток, выходное напряжение пьезодетектора, симулятор пьезоэлектрического преобразователя.

О. Ю. БОНДАРЕНКО, І. І. КЛЮЧНИК, О. Д. БЕМБЕЛЬ**ПЕРЕХІДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІРОЕЛЕКТРИЧНИХ ДЕТЕКТОРІВ**

У роботі розглядаються динамічні характеристики піроелектричних детекторів, а саме перехідні процеси при їх реакції на імпульсну теплову дію. Відмічені особливості перехідних характеристик як при нагріванні так і при охолодженні детектора. Отримані залежності використані при розробці симулятора піроелектричного перетворювача, за допомогою якого можливий аналіз і візуалізація характеристик як існуючих детекторів, так і тих, що розробляються знову. Вказані приклади використання піродетекторів, для яких перехідні характеристики найбільш важливі. Розроблений симулятор може бути використаний і в навчальних цілях.

Ключові слова: піроелектричний детектор, перехідний процес, тепловий потік, піроелектричний струм, вихідна напруга піродетектора, симулятор піроелектричного перетворювача.

О. Ю. BONDARENKO, I. I. KLYUCHNYK, O. D. BEMBEL**TRANSIENT PROCESSES IN A PYROELECTRIC DETECTOR**

In this paper, we consider the transient characteristics of a standard single-chip pyroelectric detector. Output voltage transients are easy to measure. Direct measurement of the pyroelectric current presents some difficulties, associated primarily with a sharp jump in the initial crystal current and the input capacitance of the measuring device. Direct measurement of the crystal temperature is impossible, so it can be obtained either by modeling based on known processes, or by mathematical transformations of the results of measuring the thermal time constant with respect to the pyroelectric current. Dynamic characteristics in the time domain, particularly, transient responses are considered. Specificities of transient responses when the detector is heated and cooled, are noted. Results obtained applied to a simulator of a pyroelectric detector. The simulator plots the transient responses. It allows to change a number of parameters to receive new results. The latter is important for not only modeling or analysis existing devices, but also designing new ones. Some applications of pyroelectric detectors are pointed. The simulator is free and can be used in labs at the Universities, or anywhere in the world. Identification of differences between the movement of a person and, for example, the movement of ascending heated air currents or cold drafts in motion sensors occurs precisely in the transient response of the detector output voltage, decomposition of which into Fourier series, in this case, is unacceptable. Thus, for a number of applications of pyroelectric detectors, the problem of research and transient characteristics is relevant. Identification of differences between the movement of a person and, for example, the movement of ascending heated air currents or cold drafts in motion sensors occurs precisely in the transient response of the detector output voltage, decomposition of which into Fourier series, in this case, is unacceptable. Thus, for a number of applications of pyroelectric detectors, the problem of research and transient characteristics is relevant.

Keywords: pyroelectric detector, transient response, heat flow, pyroelectric current, pyroelectric output voltage, simulator of a pyroelectric detector

Введение. Классическая теория пьезоэлектрического детектора, представленная в 1962 году Джоном Купером [1], содержала ряд динамических моделей, на основе которых построена теплоэлектрическая модель преобразования входного теплового потока в выходной электрический сигнал идеального детектора. Впоследствии получили развитие как статические, так и динамические модели пьезоэлектрического детектора [2–4]. Как известно, передаточные функции (динамические модели) действительны лишь для гармонических сигналов [5]. Синусоидальные функции обязательно двуполярны, тогда как измеряемые тепловые потоки принято считать однополярными, причем их форма рассматривается как близкая к прямоугольной. С целью упрощения расчетов и обеспечения энергетической эквивалентности однополярных входных тепловых потоков прямоугольной формы и двуполярных синусоидальных входных сигналов, первые принято разлагать в ряд Фурье с обязательным

выделением несущей гармоники [6]. Для отслеживания переходных процессов используется режим регистрации данных. Регистрация данных позволяет отобразить изменение формы сигнала во времени, а если сигнал непрерывный и периодический, то, при необходимости, разложить его в энергетически эквивалентный ряд Фурье и выделить несущую гармонику. Однако, в целом ряде случаев интерес представляет не спектр сигнала, а реальное изменение формы сигнала во времени. Это важно, например, при разработке датчиков движения, рабочие частоты которых лежат в диапазоне, верхняя граница которого не превышает 1–2 Гц. При проектировании устройств контроля/анализа дыхания человека, длительность вдоха/выдоха которого в спокойном состоянии составляет около 2 с. Кроме того, идентификация различий между движением, собственно, человека и, например, перемещением восходящих нагретых потоков воздуха или холодных сквозняков в датчиках движения происходит именно по переходной

характеристике выходного напряжения детектора, разложение которой в ряд Фурье, ввиду неудовлетворения условиям Дирихле, в этом случае, недопустимо.

Таким образом для целого ряда применений пироэлектрических детекторов задача исследования их переходных характеристик является **актуальной**. В связи с этим целью настоящей статьи, является получение моделей пироэлектрических детекторов, включающих переходные характеристики. Символы, используемые в настоящей работе, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначения и единицы измерения физических величин

Символ	Ед. изм	Описание
t	[с]	Время
C_T	[Дж/К]	Тепловая емкость
Ψ_{SE}	[К/с]	Скорость изменения температуры
P_{SE}	[(А с)/(м ² К)]	Пироэлектрический коэффициент
τ_T	[с]	Тепловая постоянная времени
C_E	[Ф]	Электрическая емкость
U_{SE}	[В]	Выходное электрическое напряжение
Φ_{SE}	[Вт]	Тепловой поток
T_{amb}	[К]	Температура окружающей среды
G_T	[Вт/К]	Тепловые потери
I_{SE}	[А]	Пироэлектрический ток
A_{pyro}	[м ²]	Площадь детектора
τ_E	[с]	Электрическая постоянная времени
R_E	[Ом]	Электрическое сопротивление
k_B	[Дж/К]	Постоянная Больцмана
\bar{i}	[А ²]	Ток шума
\bar{u}	[В ²]	Напряжение шума
i_g	[А]	Ток затвора
e	[Кл]	Элементарный заряд
g_{fs}	[См]	Проводимость канала

Математическое описание. Дифференциальное уравнение изменения температуры чувствительного элемента имеет вид [6]:

$$\tau_T \frac{d\Delta T_{SE}(t)}{dt} + \Delta T_{SE}(t) = \pm \frac{\alpha}{G_T} \Delta \Phi_{SE}(t), \quad (1)$$

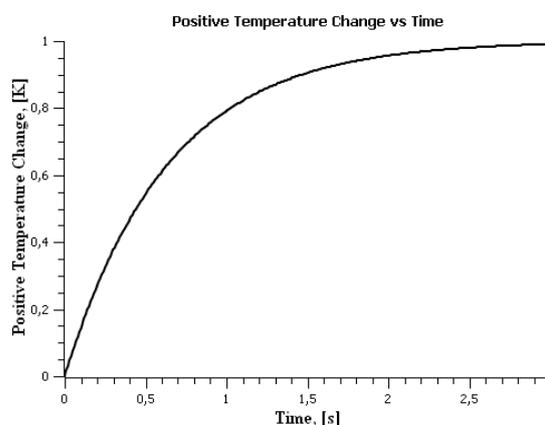
Для случая, когда температура источника излучения выше температуры детектора, переходный процесс последнего описывается уравнением

$$\Delta T_{SE,positive}(t) = \frac{\alpha}{G_T} \Delta \Phi_{SE}(t) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right). \quad (2)$$

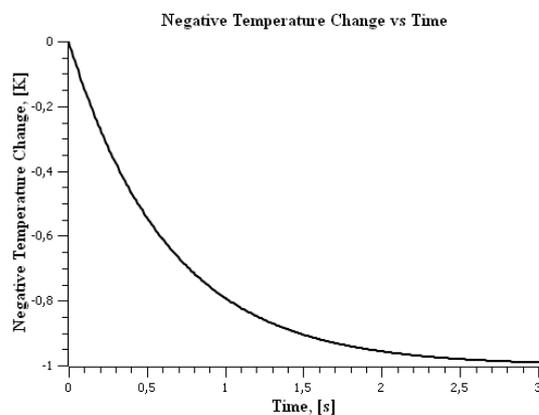
Когда температура объекта измерения ниже температуры чувствительного элемента, то охлаждение происходит по закону

$$\Delta T_{SE,negative}(t) = -\frac{\alpha}{G_T} \Delta \Phi_{SE}(t) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right). \quad (3)$$

На рис. 1 (а, б) представлены нормированные графики прироста и спада температуры чувствительного элемента в зависимости от разности температур источника излучения и детектора.



а



б

Рис.1 – Расчетные нормированные значения изменения температуры как отклик на тепловые потоки: а – детектор нагревается и б – детектор охлаждается. Параметр: тепловая постоянная времени $\tau_T = 0.637$ (серия моделей 400, 404, 406, 408; производитель Eltec Instruments/Silverlight, США/Швейцария)

Другим важным параметром, который широко не рассматривается в литературе, но упоминается в [7], является скорость изменения температуры. Этот параметр является важным, поскольку, пироэлектрический детектор откликается не на само изменение температуры чувствительного элемента, а именно на скорость ее изменения. Однако, несмотря на

это, скорость изменения температуры чувствительного элемента должна быть, по возможности, несущественной, т.к. большие значения этого параметра могут привести к повреждению детектора [7]. Дифференциальное уравнение скорости изменения температуры может быть записано в виде

$$\tau_T \frac{d\Delta\Psi_{SE}(t)}{dt} + \Delta\Psi_{SE}(t) = \frac{\alpha}{G_T} \frac{d\Delta\Phi_{SE}(t)}{dt}, \quad (4)$$

его решение дает переходную характеристику

$$\Delta\Psi_{SE}(t) = \left| \frac{\alpha}{C_T} \Delta\Phi_{SE}(t) e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right|. \quad (5)$$

Очевидно, что скорость изменения температуры чувствительного элемента является первой производной изменения его температуры по времени, поэтому эта величина не имеет знака и берется по модулю.

Следующим важным параметром является генерация пироэлектрического тока, который прямо пропорционален скорости изменения температуры чувствительного элемента, дифференциальное уравнение которого представлено ниже

$$\tau_T \frac{d\Delta I_{SE}(t)}{dt} + \Delta I_{SE}(t) = \pm p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha}{G_T} \frac{d\Delta\Phi_{SE}(t)}{dt}, \quad (6)$$

где при положительном тепловом потоке пироэлектрический ток в переходном процессе описывается функцией вида

$$\Delta I_{SE,positive}(t) = p_{SE} A_{SE} \Delta\Psi_{SE}(t) = p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha}{C_T} \Delta\Phi_{SE}(t) e^{-\frac{t}{\tau_T}}, \quad (7)$$

а при отрицательном

$$\Delta I_{SE,negative}(t) = -p_{SE} A_{SE} \Delta\Psi_{SE}(t) = -p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha}{C_T} \Delta\Phi_{SE}(t) e^{-\frac{t}{\tau_T}}. \quad (8)$$

Нормированные временные зависимости пироэлектрического тока от разности температур источника излучения и детектора представлены на рис. 2.

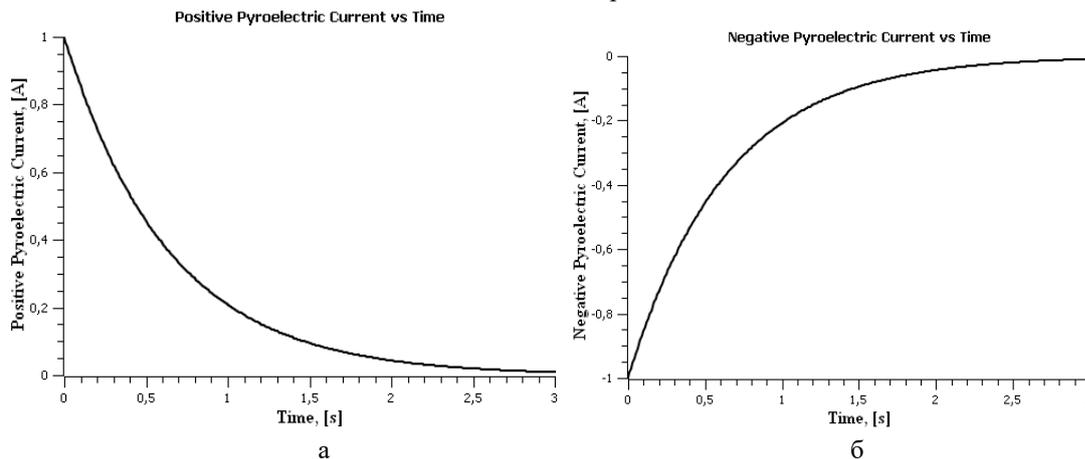


Рис. 2 – Расчетные нормированные значения пироэлектрического тока как отклик на тепловые потоки: а – положительный и б – отрицательный. Параметр: тепловая постоянная времени $\tau_T = 0.637$ (серия моделей 400, 404, 406, 408; производитель Eltec Instruments/Silverlight, США/Швейцария)

Чувствительный элемент, как правило, подключается либо к высокоимпедансному преобразователю сопротивления, выполненному на полевом транзисторе, либо к преобразователю ток-напряжение на операционном усилителе. В обоих случаях выходным сигналом детектора является напряжение, дифференциальное уравнение которого имеет вид

$$\tau_T \tau_E \frac{d^2 \Delta U_{SE}(t)}{dt^2} + (\tau_T + \tau_E) \frac{d\Delta U_{SE}(t)}{dt} + \Delta U_{SE}(t) = \pm \frac{p_{SE} A_{SE} R_E}{G_T} \frac{d\Delta\Phi_{SE}(t)}{dt}. \quad (9)$$

Принимая во внимание два режима работы детектора и два знака теплового потока, для выходного напряжения существует четыре различных случая, каждый из которых описывается следующим уравнением:

– режим работы по напряжению, тепловой поток положительный

$$\Delta U_{SE,VM,positive}(t) = p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha \Delta\Phi_{SE}(t)}{G_T} \times \left(\frac{1}{\tau_T - \tau_{E,VM}} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{E,VM}}} - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right) \right); \quad (10)$$

– режим работы по напряжению, тепловой поток отрицательный

$$\Delta U_{SE,VM,negative}(t) = -p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha \Delta\Phi_{SE}(t)}{G_T} \times \quad (11)$$

$$R_{E,Bias} \frac{1}{\tau_T - \tau_{EVM}} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{EVM}}} - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right);$$

– режим работы по току, тепловой поток положительный

$$\Delta U_{SE,CM,positive}(t) = p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha \Delta \Phi_{SE}(t)}{G_T} \times R_{E,Fb} \frac{1}{\tau_T - \tau_{E,CM}} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{E,CM}}} - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right); \quad (12)$$

– режим работы по току, тепловой поток отрицательный

$$\Delta U_{SE,CM,negative}(t) = -p_{SE} A_{SE} \frac{\alpha \Delta \Phi_{SE}(t)}{G_T} \times R_{E,Fb} \frac{1}{\tau_T - \tau_{E,CM}} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{E,CM}}} - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right). \quad (13)$$

Все четыре случая представлены на графиках рисунка 3 в нормированном виде.

Хотя математически все четыре уравнения (10 – 13) похожи, переходные характеристики, которые они представляют, как видно из приведенных графиков, различны. Это различие поясняется тем, что электрическая постоянная времени детектора в режиме работы по напряжению приблизительно на два порядка больше электрической постоянной времени в режиме работы по току

$$\tau_{E,VM} \gg \tau_{E,CM}, \quad (14)$$

поэтому наблюдается различие не только в полярности сигнала, но и по времени, при котором выходное напряжение достигает своего экстремума.

Важным параметром пьезоэлектрических детекторов является отношение изменения выходного сигнала детектора к изменению входного, т.е. чувствительность. Поскольку выходным сигналом детектора может служить либо ток, либо напряжение, то, следовательно, различают две чувствительности: по току

$$\Delta R_A(t) = p_{SE} A_{SE} \frac{1}{C_T} e^{-\frac{t}{\tau_T}} \quad (15)$$

и по напряжению

$$\Delta R_V(t) = p_{SE} A_{SE} \frac{1}{G_T} \times R_{E,Bias} \frac{1}{\tau_T - \tau_{E,VM}} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{E,VM}}} - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right). \quad (16)$$

Переходная характеристика вольт-ваттной чувствительности детектора нелинейная и в некоторый момент времени имеет ярко выраженный максимум. Максимальная чувствительность пьезоэлектрического детектора достигается в упомянутый момент времени в случае, если тепловой поток описывается ступенчатой функцией Хевисайда.

Таким образом, для пьезоэлектрического детектора определены переходные характеристики всех стадий преобразования теплового сигнала в электрический.

Выводы. В настоящей работе рассмотрены переходные характеристики стандартного однокристалльного пьезоэлектрического детектора. Переходные процессы выходного напряжения легко поддаются измерению. Прямое измерение пьезоэлектрического тока представляет некоторые трудности, связанные, в первую очередь, с резким скачком начального тока кристалла и входной емкостью измерительного прибора. Прямое измерение температуры кристалла невозможно, поэтому оно может быть получено либо моделированием на основе известных процессов, либо путем математических преобразований результатов измерения тепловой постоянной времени по пьезоэлектрическому току.

Применение. На основе полученных математических моделей разработан модуль переходных процессов симулятора режимов работы пьезоэлектрического преобразователя.

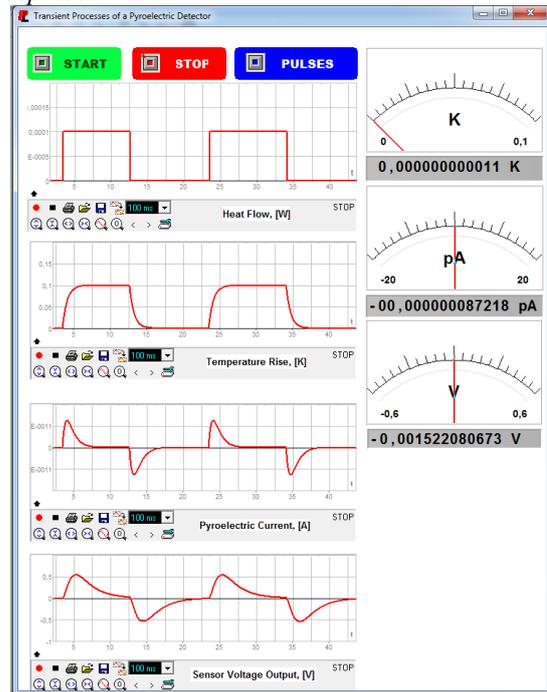


Рис. 3 – Симулятор работы пьезоэлектрического детектора (Profilab Expert ver. 4.0, обладатель лицензии: А. Бондаренко)

Программное обеспечение, используемое в настоящей статье, электронная таблица LibreOffice Calc <https://www.libreoffice.org/> с открытым исходным кодом, средство анализа данных SciDAVis <http://scidavis.sourceforge.net/>, также с открытым исходным кодом. Интерфейс программы, представленный на рис. 3, состоит из четырех графиков, каждый из которых

отображает тепловой поток, прирост температуры чувствительного элемента, пироэлектрический ток и выходное напряжение, соответственно. Все графики промаркированы соответствующими единицами измерения. Этот контроллер симулирует изменение температуры чувствительного элемента. Каждый последующий параметр симулируется собственным контроллером. Последний контроллер – контроллер выходного напряжения, симулирует работу осциллографа (или АЦП). Данный симулятор может быть использован с целью более глубокого понимания переходных процессов, происходящих в пироэлектрическом детекторе. Симулятор выполнен в среде разработки Profilab Expert ver. 4.0.

Список литературы

1. Cooper J. Minimum detectable power of a pyroelectric thermal receiver. – Rev. Sci. Instr. 33. – 1962. – P. 92–95.
2. Бондаренко А. Ю. Построение математических моделей пироэлектрического детектора. Нагревание. Отклик на единичное ступенчатое воздействие. Системы обработки информации, ХУПС, 2016. – Вып. 146. – С. 111–123.
3. Ключник И. И. Пироэлектрические преобразователи энергетических характеристик СВЧ-трактов. / И. И. Ключник, В. С. Жилков. Теория, элементы и узлы антенно-волондных трактов. Труды научно-теоретической школы по СВЧ-электронике, 1990. – Вып. 1. – С. 120–146.

4. Bondarenko A. Mathematical Modeling of a Pyroelectric Detector, Ivanchenko I.S., Kharkiv, 2018. – 139 p.
5. Holbrook J.G. Laplace transforms for Electronic Engineers, Pergamon Press, 1966. – 364 p.
6. Budzier, H., Gerlach, G. Thermische Infrarotsensoren. Wiley-VCH, Weinheim, 2010. – 328 p.
7. <http://wolframalpha.com> (6 ноября 2018).
8. http://silverlight.ch/pdf/eltec_400.pdf (6 ноября 2018).

References (transliterated)

1. Cooper J. Minimum detectable power of a pyroelectric thermal receiver. – Rev. Sci. Instr. 33. – 1962. – P. 92–95.
2. Bondarenko A. Yu. Postroenie matematicheskikh modeley piroelektricheskogo detektora. Nagrevaniye. Otklik na edinichnoye stupenchatoje vozdeystviye. Sistemi obrabotki informatsii, KhUPS, 2016. – No. 146. – P. 111–123.
3. Klyuchnyk I. I., Zhilkov V. S. Piroelektricheskije preobrazovateli energeticheskikh kharakteristik SVCh-traktov. Teorija, elementi I uzli antenno-volnovodnih traktov. Trudi nauchno-teoreticheskoy shkoly po SVCh-elektronike, 1990. – No. 1. – P. 120–146.
4. Bondarenko A. Mathematical Modeling of a Pyroelectric Detector, Ivanchenko I.S., Kharkiv, 2018. – 139 p.
5. J.G. Holbrook Laplace transforms for Electronic Engineers, Pergamon Press, 1966. – 364 p.
6. Budzier, H., Gerlach, G. Thermische Infrarotsensoren. Wiley-VCH, Weinheim, 2010. – 328 p.
7. <http://wolframalpha.com> (November 6, 2018).
8. http://silverlight.ch/pdf/eltec_400.pdf (November 6, 2018).

Поступила (received) 18.11.18

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бондаренко Олександр Юрійович (Бондаренко Александр Юрьевич, Bondarenko Oleksandr Yurievych) – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: pyrodetector@gmail.com

Ключник Ігор Іванович (Ключник Игорь Иванович, Klyuchnyk Igor Ivanovich) – кандидат технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: ihor.kliuchnyk@nure.ua

Бембель Олександр Дмитрович (Бембель Александр Дмитриевич, Bembel Oleksandr Dmytrievych) – студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: zarubovich@gmail.com

УДК 621.923

С. О. ДИТИНЕНКО, А. Г. КРЮК, Ф. В. НОВІКОВ**ОБГРУНТУВАННЯ УМОВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ, ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПРИ АЛМАЗНОМУ ШЛІФУВАННІ**

Розроблено математичні моделі визначення продуктивності обробки, пружних переміщень, що виникають в технологічній системі, та шорсткості поверхні при круглому зовнішньому поздовжньому шліфуванні алмазними кругами на металевих зв'язках твердосплавних виробів. Показано, що домогтися істотного зменшення шорсткості поверхні при шліфуванні можна створенням на алмазному крузі плосковершинних зерен. Це дозволяє виключити з технологічного процесу операцію притирання алмазними пастами і скоротити час обробки. На цій основі розроблено і впроваджено у виробництво ефективну технологію шліфування алмазними кругами на металевих зв'язках з плосковершинними зернами твердосплавних виробів, що забезпечує високі показники продуктивності обробки, точності та шорсткості оброблених поверхонь.

Ключові слова: технологічний процес, операція шліфування, алмазний круг, шорсткість поверхні, продуктивність обробки, пружні переміщення, технологічна собівартість обробки.

С. А. ДИТИНЕНКО, А. Г. КРЮК, Ф. В. НОВИКОВ**ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ, ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ**

Разработаны математические модели определения производительности обработки, упругих перемещений, возникающих в технологической системе, и шероховатости поверхности при круглом наружном продольном шлифовании алмазными кругами на металлических связках твердосплавных изделий. Показано, что добиться существенного уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании можно созданием на алмазном круге плосковершинных зерен. Это позволяет исключить из технологического процесса операцию притирки алмазными пастами и сократить время обработки. На этой основе разработана и внедрена в производство эффективная технология шлифования алмазными кругами на металлических связках с плосковершинными зернами твердосплавных изделий, обеспечивающая высокие показатели производительности обработки, точности и шероховатости обработанных поверхностей.

Ключевые слова: технологический процесс, операция шлифования, алмазный круг, шероховатость поверхности, производительность обработки, упругие перемещения, технологическая себестоимость обработки.

S. A. DITINENKO, A. G. KRYUK, F. V. NOVIKOV**JUSTIFICATION OF CONDITIONS FOR INCREASING PRODUCTIVITY, ACCURACY AND QUALITY OF PROCESSING DURING DIAMOND GRINDING**

Mathematical models have been developed for determining the productivity of processing, the elastic displacements arising in the technological system, and the surface roughness during round external longitudinal grinding with diamond circles on metal sheaves of hard-alloy products. The classification of various grinding patterns by the periphery of the circle was made according to the kinematic feature of the time of formation of the established surface roughness, taking into account the influence of the different height of grains, the probabilistic nature of their participation in cutting and the presence of areas on the tops of the grains. It is shown that a significant reduction in surface roughness during grinding can be achieved by creating flat-topped grains on the diamond wheel. This allows you to exclude the operation of grinding with diamond pastes from the process and reduce processing time. On this basis, an effective technology of grinding with diamond circles on metal bundles with flat-topped grains of carbide products, which provides high rates of processing performance, accuracy and roughness of the processed surfaces, has been developed and introduced into production.

Keywords: технологічний процес, операція шліфування, алмазний коло, шорсткість поверхні, продуктивність обробки, пружні переміщення, технологічна собівартість обробки.

Вступ. Застосування традиційних технологій обробки виробів з твердих сплавів циліндричної форми (вставки, інструменти для обробки матеріалів тиском і різанням та ін.), що включають операції шліфування абразивними кругами і притирання алмазними пастами, характеризується високою трудомісткістю. Особливо це відноситься до операцій притирання. Тому для зниження трудомісткості притирання, а в кращому випадку – виключення її з технологічних процесів обробки необхідно удосконалити операції шліфування. При цьому необхідні показники якості обробки повинні забезпечуватись на операціях шліфування. Перспективним напрямом є застосування технологій шліфування алмазними кругами на металевих зв'язках, що дозволяють підвищити продуктивність і знизити технологічну собівартість обробки. Але, як відомо, ці технології не забезпечують високих показників шорсткості і точності обробки, особливо на операціях

круглого зовнішнього шліфування у зв'язку з відносно низькою жорсткістю технологічної системи. Це вимагає розробки нових більш ефективних технологій шліфування алмазними кругами на металевих зв'язках, у тому числі із застосуванням електроерозійної правки, що дозволяють поряд з підвищенням продуктивності та зниженням технологічної собівартості обробки поліпшити шорсткість і точність оброблених поверхонь до рівня показників притирання вільним абразивом (алмазними пастами).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботах [1; 2] виявлено основний недолік діючих технологічних процесів абразивної обробки, які містять надзвичайно високу за трудомісткістю операцію притирання в зв'язку з високими вимогами до шорсткості і точності обробки. Виходячи з цього зроблено висновок про можливість підвищення ефективності технологічного процесу шляхом удосконалення операції круглого зовнішнього шліфування – поліпшення шорсткості та точності

© С. О. Дитиненко, А. Г. Крюк, Ф. В. Новіков, 2018

обробки до необхідного рівня без зниження показників продуктивності і технологічної собівартості обробки.

Але вирішити дану задачу, використовуючи відомі рекомендації з абразивного та алмазного шліфування, не вдалося [3]. Це вимагає проведення комплексу теоретичних, а також експериментальних досліджень, оптимізації структури і параметрів операції круглого зовнішнього шліфування та вибору оптимального варіанта технологічного процесу фінішної обробки циліндричних поверхонь твердосплавних виробів. Як критерії оптимізації слід прийняти продуктивність і технологічну собівартість обробки, як обмеження – точність та шорсткість оброблюваних поверхонь, а в якості змінних параметрів – параметри операції шліфування алмазним кругом на металевій зв'язці і параметри пружної системи круглошліфувального верстата.

Мета роботи – підвищення ефективності технологічного процесу фінішної обробки циліндричних поверхонь твердосплавних виробів на основі оптимізації структури і параметрів операції круглого зовнішнього поздовжнього шліфування алмазним кругом на металевій зв'язці з плосковершинними зернами.

Основний матеріал. В зв'язку з виникненням у технологічній системі пружного переміщення δ , фактична продуктивність обробки $Q_{\phi} = Q_{\text{ном}} \cdot (1 - \delta / \Pi)$ завжди менша номінальної продуктивності $Q_{\text{ном}}$ на величину δ / Π , де $\delta = \frac{\sigma \cdot Q_{\text{ном}}}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}$; Π – припуск, що знімається, м; c – приведена жорсткість технологічної системи в радіальному напрямку, Н/м; $K_{\text{ш}} = P_z / P_y$ – коефіцієнт шліфування; P_y , P_z – відповідно радіальна і тангенціальна складові сили різання, Н; σ – умовне напруження різання, Н/м²; $V_{\text{кр}}$ – швидкість круга, м/с.

Зменшення δ (визначаючого точність розміру обробки) вимагає зменшення номінальної та фактичної продуктивності обробки. Але це не ефективно, як показує практика, ефективніше операцію круглого зовнішнього шліфування виконати в два переходи: чорнове шліфування і виходжування [4]. Тоді середня фактична продуктивність операції шліфування $Q_{\text{ср}}$ визначиться: $Q_{\text{ср}} = Q_{\text{ном}} / (1 + \tau_2 / \tau_1)$, де τ_1 , τ_2 – тривалість переходів чорнового шліфування і виходжування, с; $\tau_1 = \Pi / S_{\text{ноп}}$; $S_{\text{ноп}}$ – поперечна подача, м/хід.

Тривалість τ_2 визначається з диференціального рівняння інтенсивності знімання матеріалу з урахуванням пружних переміщень у технологічній системі:

$$\frac{dv}{d\tau} + A \cdot v = B, \quad (1)$$

$$\text{де } A = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}}{\sigma \cdot F}; \quad B = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}} \cdot \Pi_1}{\sigma};$$

v – об'єм знятого матеріалу, м³;

Π_1 , Π_2 – припуски, що видаляються на переходах

чорнового шліфування і виходжування, м;

F – площа оброблюваної поверхні, м².

З урахуванням початкової умови $\delta / \tau=0 = \Pi_2$ рішення рівняння (1) має вигляд:

$$Q_{\phi} = Q_{\phi_2} \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}{\sigma \cdot F}}; \quad \delta = \Pi_2 \cdot e^{-\frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}} \cdot \tau}{\sigma \cdot F}};$$

$$Q_{\phi_2} = \frac{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}} \cdot \Pi_2}{\sigma}. \quad (2)$$

Основний час операції шліфування:

$$(\tau_1 + \tau_2) = \frac{F}{c \cdot V_{\text{кр}}} \cdot \left(\frac{\sigma}{K_{\text{ш}}}_1 \right) \cdot \Phi, \quad (3)$$

де $\Phi = \left[\frac{1}{k_2} + z \cdot \ln \left(\frac{k_2}{k_0} \right) \right]$ – безрозмірна функція;

$$z = \left(\frac{\sigma}{K_{\text{ш}}}_2 \right) / \left(\frac{\sigma}{K_{\text{ш}}}_1 \right) \text{ – безрозмірний коефіцієнт,}$$

$z \geq 1$; індекси 1 і 2 відповідають переходам чорнового шліфування і виходжування;

$$k_2 = \Pi_2 / \Pi; \quad k_0 = \delta_0 / \Pi;$$

δ_0 – точність розміру обробки, м.

Випадок 1 ($z = 1$). З рис. 1,а видно, що найменше значення безрозмірної функції Φ (яка визначає основний час операції шліфування) досягається за умови $\tau_1 = 0$, тобто оптимальна за структурою операція шліфування включає лише перехід виходжування (і звичайно, нетривалий перехід створення початкового натягу в технологічній системі).

Випадок 2 ($z > 1$). За умови $z > 1$ безрозмірна функція Φ зі збільшенням коефіцієнта k_2 змінюється за екстремальною залежністю, проходячи точку мінімуму (рис. 1,а). Зі збільшенням z екстремальні значення функції Φ збільшуються і зміщуються в область менших значень k_2 . Це вказує на значний вплив коефіцієнта z (визначаючого ріжучу здатність круга) на структуру операції шліфування. Чим вище ріжуча здатність круга, тим ефективніше більшу частину припуску знімати на переході виходжування. При шліфуванні кругом з відносно низькою ріжучою здатністю, практично весь припуск необхідно знімати на переході чорнового шліфування і лише незначну його частину – на переході виходжування. Теоретичні результати підтверджуються експериментально (рис. 1,б). При шліфуванні алмазним кругом на металевій зв'язці М1-10 після його електроерозійної правки (крива 1) час $(\tau_1 + \tau_2)$ зі збільшенням припуску

Π_2 безупинно зменшується, що відповідає кривій $z = 1$ на рис. 1,а. При шліфуванні приробленим алмазним кругом залежність $(\tau_1 + \tau_2) - \Pi_2$ трансформується в екстремальну, що відповідає кривим для $z > 1$ на рис. 1,а. При шліфуванні алмазним кругом після його електроерозійної правки і створення площадок на вершинах зерен (шляхом шліфування алмазним кругом алмазного правлячого олівця) залежність $(\tau_1 + \tau_2) - \Pi_2$ реалізується лише для невеликих

значень Π_2 . У результаті основна частина припуску видаляється на переході чорнового шліфування

На цій основі розроблено нові інженерні методики розрахунку оптимальних параметрів операції круглого зовнішнього поздовжнього алмазного шліфування: тривалості операції і її переходів; величин припусків, що видаляються на кожному переході в залежності від вимог по точності обробки (обумовлені величиною пружного переміщення в технологічній системі) і ріжучою здатністю алмазного круга.

Обґрунтовано основні умови зменшення тривалості оптимальної за структурою операції шліфування, що включає лише перехід виходжування:

$$\tau = \frac{F}{c \cdot V_{кр}} \cdot \frac{\sigma}{K_{ш}} \cdot \ln \frac{\Pi}{\delta_0}, \quad (4)$$

$$\text{де } \frac{\sigma}{K_{ш}} = \frac{\pi \cdot tg \gamma \cdot HV}{2 \cdot (1 - \eta)};$$

$$\eta = \frac{x}{(x + H_{max})};$$

HV – твердість оброблюваного матеріалу (за Віккерсом), Н/м²;

γ – половина кута при вершині зерна, робоча

частина якого представлена у формі усіченого конуса;

η – безрозмірний коефіцієнт, що враховує ступінь

затушення зерен, змінюється в межах 0...1;

x – умовна величина лінійного зносу зерна, м;

H_{max} – максимальна товщина зрізу, м.

На основі розробленої аналітичної моделі шорсткості циліндричної поверхні при круглому зовнішньому поздовжньому шліфуванні обґрунтовано умови істотного зменшення параметра шорсткості

R_{max} :

$$\left[\left(R_{max} + \frac{3 \cdot x}{4} \right)^2 - \frac{x^2}{16} \right] \sqrt{R_{max}} = \frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{6 \cdot tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \sqrt{\frac{1}{D_{кр}} + \frac{1}{D_{дет}}} \quad (5)$$

$$R_{max}^{1.5} \cdot (R_{max} + x) = \frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{6 \cdot tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{1}{D_{кр}} + \frac{1}{D_{дет}}} \quad (6)$$

де \bar{X} – зернистість круга, м;

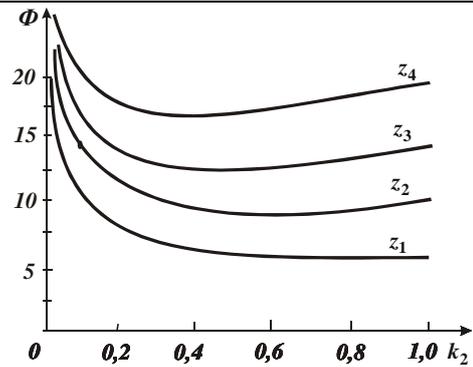
m – об'ємна концентрація зерен круга;

$V_{дет}$ – швидкість деталі, м/с;

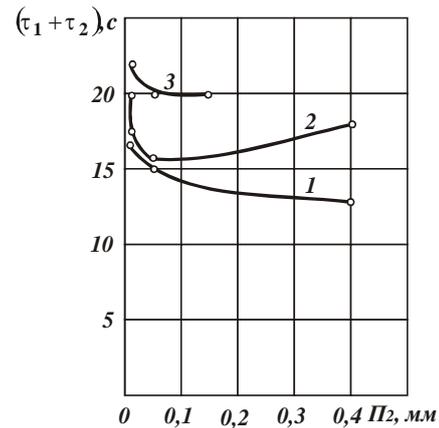
$D_{кр}, D_{дет}$ – відповідно діаметри круга і деталі, м.

Рівняння (5) отримано з урахуванням, а рівняння (6) – без урахування утворення площадок зносу на вершинах зерен алмазного круга. За умови $x=0$ рівняння (5) і (6) приймають вигляд залежності:

$$R_{max} = \bar{R}_{max} = \left(\frac{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет}}{6 \cdot tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \cdot \sqrt{\frac{1}{D_{кр}} + \frac{1}{D_{дет}}} \right)^{0.4} \quad (7)$$



а



б

Рис. 1 – Залежність Φ від k_2 : а – ($z_1=1; z_2=2; z_3=3; z_4=4$); б – залежність основного часу операції шліфування $\tau_1 + \tau_2$ від припуску Π_2 при обробці: 1 – алмазним кругом (1А1 300х25х5 АС6 125/100 М1-10 4) після його електроерозійної правки; 2 – природним алмазним кругом (після 10 хв роботи); 3 – алмазним кругом із плосковершинними зернами

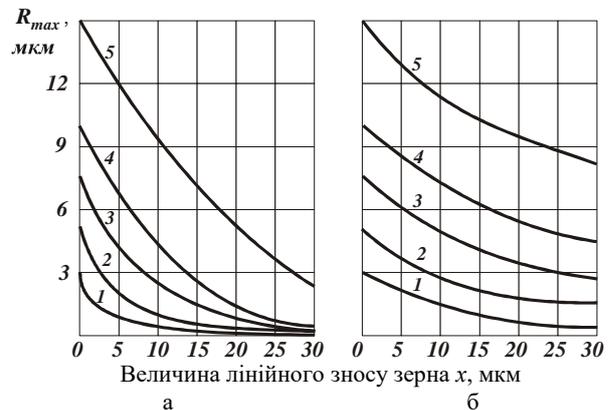


Рис. 2 – Залежності R_{max} від x , отримані на основі: а – рівняння (7); б – рівняння (8); 1 – $\bar{R}_{max} = 3$ мкм; 2 – $\bar{R}_{max} = 5$ мкм; 3 – $\bar{R}_{max} = 7,5$ мкм; 4 – $\bar{R}_{max} = 10$ мкм; 5 – $\bar{R}_{max} = 15$ мкм

Встановлено, що з усіх параметрів, які входять у рівняння (5) і (6), найбільше впливає на R_{max} величина x , особливо у випадку утворення на зернах площадок зносу (рівняння (5), рис. 2,а), тобто при різанні плосковершинними зернами. Зі збільшенням величини

x можна істотно зменшити параметр R_{max} . Виконані експериментальні дослідження підтвердили теоретичні результати.

Встановлено, що при шліфуванні алмазним кругом на металевій зв'язці 1A1 300x20x5 AC6 125/100 M1-10 4 із плосковершинними зернами параметр шорсткості R_a ($R_a \approx 0,2 \cdot R_{max}$) зменшився з 2,2 до 0,1 мкм (крива 2, рис. 3). При цьому зміна режимів шліфування, а також обробка кругом, який працював уже деякий час після електроерозійної правки (крива 1, рис. 3), не привели до істотного зменшення шорсткості обробки.

Для створення плосковершинних зерен застосовувалися способи шліфування алмазним кругом полікристалічного синтетичного надтвердого матеріалу і алмазного правлячого олівця.

Експериментально встановлено, що при шліфуванні алмазним кругом на металевій зв'язці з плосковершинними зернами з часом спостерігається деяке збільшення параметра шорсткості R_a (крива 2, рис. 3) внаслідок підключення в різання нових більш гострих зерен. Особливо це виявляється при шліфуванні алмазним кругом на металевій зв'язці M1 – 01. Застосування більш зносостійкого алмазного круга на металевій зв'язці M1-10 дозволило усунути даний недолік – шорсткість обробки практично стабілізувалася в часі на рівні $R_a = 0,1-0,2$ мкм при зміні глибини шліфування в межах 0,01 – 0,025 мм.

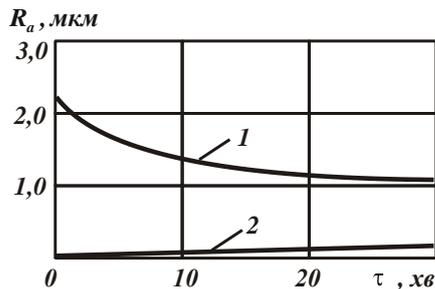


Рис. 3 – Залежність параметра шорсткості обробки R_a від часу шліфування τ : 1 – після електроерозійної правки круга; 2 – після створення площадок на вершинах зерен круга

Зроблено оцінку вірогідності розрахунку шорсткості циліндричних поверхонь при шліфуванні алмазним кругом з гостровершинними і плосковершинними зернами. Для цього спочатку була отримана спрощена аналітична залежність (7) для визначення параметра R_{max} , що враховує умовне одновисотне виступання зерен, потім – уточнені залежності, що враховують різновисотне виступання зерен над рівнем зв'язки та ймовірнісний характер участі зерен у різанні [5]. Встановлено, що у всіх трьох випадках приходимо до однієї і тієї ж залежності (7), відмінність полягає лише в числових коефіцієнтах. Так, розраховане за залежністю (7) значення $R_a = 0,2 \cdot R_{max}$ для вихідних даних: $tg \gamma = 1$; $\bar{X} = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м; $m = 100$; $V_{sp} = 30$ м/с; $V_{det} = 15$ м/хв; $D_{sp} = 0,3$ м; $D_{det} = 0,014$ м дорівнює $R_a = 0,86$ мкм,

розраховане з урахуванням різновисотного виступання зерен над рівнем зв'язки дорівнює $R_a = 1,5$ мкм і розраховане з урахуванням імовірносної участі зерен у різанні дорівнює $R_a = 2,43$ мкм. Як видно, розрахунок за уточненими залежностями веде до збільшення значень R_a . У порівнянні з експериментальним значенням $R_a = 1,9$ мкм (отриманим після електроерозійної правки алмазного круга), урахування різновисотного виступання зерен над рівнем зв'язки дає занижене (у межах 20%), а урахування імовірносного характеру участі зерен у різанні дає завищене (у межах 27%) значення R_a (стосовно експериментальним даних отриманим при шліфуванні алмазним кругом після його електроерозійної правки). Установлена також збіжність у межах 10 % розрахункових і експериментальних значень шорсткості при шліфуванні алмазним кругом із плосковершинними зернами. Дані результати дозволили вперше кількісно оцінити вплив зазначених вище трьох факторів на умови формування шорсткості циліндричних поверхонь при шліфуванні і наблизити розрахункову схему до реальної.

Виконано класифікацію кінематичних схем шліфування периферією круга за ознакою часу формування сталої шорсткості поверхні. Теоретично показано існування трьох принципових схем, обумовлених кінематикою руху оброблюваної поверхні стосовно робочої поверхні круга (у радіальному, тангенціальному і поздовжньому, з боку торцевої поверхні круга, напрямках), які істотно відрізняються часом формування сталої шорсткості поверхні (рис. 4).

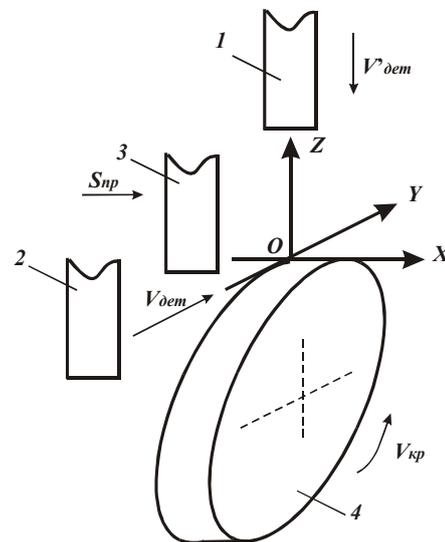


Рис. 4 – Три принципові схеми формування шорсткості поверхні при шліфуванні: 1, 2, 3 – оброблюваного зразка в радіальному, тангенціальному і поздовжньому напрямках; 4 – шліфувальний круг

Встановлено, що найбільшим часом формування шорсткості поверхні при шліфуванні характеризується третя схема, а найменшим – перша. Тому найменша шорсткість поверхні досягається при шліфуванні по третій схемі, а найбільша – при шліфуванні по першій. Друга схема (включає плоске, кругле зовнішнє і

внутрішнє шліфування) займає проміжне положення.

У роботі обґрунтовано вибір оптимального варіанта технологічного процесу фінішної обробки циліндричних поверхонь твердосплавних виробів за критеріями найбільшої продуктивності і найменшої технологічної собівартості обробки з урахуванням обмежень за точністю та шорсткістю оброблюваних поверхонь [6]. Показано, що необхідні значення точності розміру (менше 10 мкм) і шорсткості обробки ($R_a = 0,1$ мкм) досягаються при значенні безрозмірного коефіцієнта $\eta = 0,91$. Таке велике значення безрозмірного коефіцієнта η , що наближається до граничного ($\eta = 1$), обумовлено утворенням на вершинах зерен значних площадок – довжиною 30 мкм і більше. Шліфування алмазним кругом після електроерозійної правки забезпечує невеликі значення коефіцієнта ($\eta \rightarrow 0$) у зв'язку з високою гостротою ріжучих зерен круга.

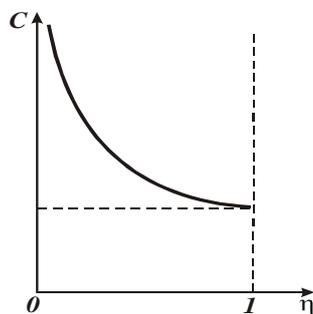
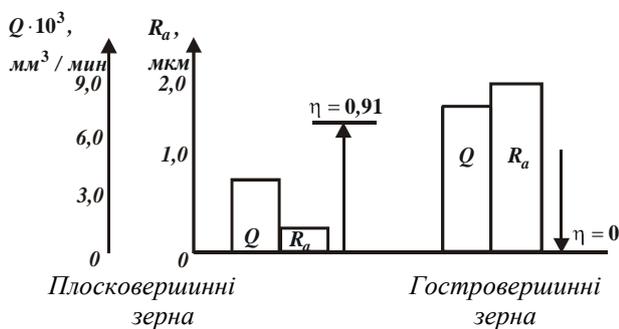


Рис. 5 – Значення продуктивності Q та шорсткості обробки $a - R_a$ при шліфуванні алмазним кругом на металевій зв'язці (із плосковершинними та гостро-вершинними зернами після електроерозійної правки); б – залежність технологічної собівартості C від безрозмірного коефіцієнта η

Установлено, що збільшення коефіцієнта η від 0 до 0,91 у результаті утворення площадок на вершинах зерен відповідає зменшенню середньої продуктивності операції круглого зовнішнього шліфування тільки в 2 рази (рис. 5, а). При цьому потужність шліфування зростає незначно – усього в 2 рази, тобто алмазний круг на металевій зв'язці з плосковершинними зернами має досить високу ріжучу здатність, дозволяє одночасно забезпечити високопродуктивне знімання оброблюваного матеріалу і зменшити шорсткість R_a

обробки з 2,0 мкм до значень 0,1–0,2 мкм.

Виконано аналіз технологічної собівартості обробки на операції шліфування на основі отриманої аналітичної залежності, що враховує дві статті витрат які змінюються, зв'язані з заробітною платою робітника і витратою алмазних кругів. Теоретично встановлено, що зі збільшенням безрозмірного коефіцієнта $\eta \rightarrow 1$ технологічна собівартість обробки C безупинно зменшується (рис. 5, б). Це свідчить про можливість реалізації для встановлених умов шліфування ($\eta = 0,91$) практично мінімального значення C .

Порівняння трьох варіантів технологічного процесу фінішної обробки циліндричної поверхні спеціального твердосплавного інструменту (двох запропонованих і базового варіанту, наведених у таблиці) показало, що за критерієм найбільшої продуктивності обробки ефективно застосування першого варіанту. Вилучення з технологічного процесу операції притирання алмазною пастою дозволяє також істотно знизити технологічну собівартість обробки. Для реалізації даних умов шліфування розроблено спеціальну технологію підготовки алмазного круга до роботи, що включає балансування круга, його електроерозійну правку для остаточного усунення биття (у межах 10 мкм) і якісного розкриття алмазоносного шару, а потім утворення на вершинах зерен площадок. На цій основі розроблено та впроваджено у виробництво ефективну технологію фінішної обробки циліндричних поверхонь твердосплавних виробів.

Таблиця. Варіанти технологічного процесу обробки циліндричної поверхні твердосплавної розвертки (діаметр – 20 мм, довжина – 30 мм, припуск – 1 мм)

№	Операція шліфування	Операція притирання	Час, хв.
1	Алмазний круг 1А1 300х20х5 АС6 125/100 М1–10 4 із плосковершинними зернами; $R_a = 0,1$ мкм; $\tau = 2$ хв.	Немає	2
2	Алмазний круг 1А1 300х20х5 АС6 125/100 М1–10 4 після електроерозійної правки; $R_a = 1,0$ мкм; $\tau = 1$ хв.	Припуск – 0,02 мм; $R_a = 0,1$ мкм; $\tau = 4$ хв.	5
3	Алмазний круг 1А1 300х20х5 АС4 100/80 В2–01 4; $R_a = 0,4$ мкм; $\tau = 3$ хв.	Припуск – 0,02 мм; $R_a = 0,1$ мкм; $\tau = 4$ хв.	7

Висновки. Розроблено аналітичні моделі продуктивності та основного часу операції круглого зовнішнього поздовжнього алмазного шліфування, що включає переходи чорнового шліфування і виходжування, а також розроблено аналітичну модель пружного переміщення, що утворюється на кожному переході операції шліфування. На цій основі

проведено оптимізацію структури і параметрів операції шліфування.

Виконано класифікацію різних схем шліфування периферією круга за кінематичною ознакою часу формування сталого шорсткості поверхні. Розроблено аналітичну модель формування шорсткості поверхні при шліфуванні. Показано можливість істотного зменшення шорсткості за рахунок застосування штучно створених на вершинах зерен алмазного круга на металевій зв'язці значних площадок. Встановлено, що за критеріями найбільшої продуктивності й найменшої технологічної собівартості обробки більш ефективним є варіант технологічного процесу, який включає лише операцію круглого зовнішнього шліфування алмазним кругом на металевій зв'язці з плосковершинними зернами, що забезпечує виконання високих вимог за шорсткістю та точністю обробки.

Список литературы

1. Рыжов Э.В., Сагарда А.А., Ильицкий В.Б., Чеповецкий И.Х. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке. К.: Наук. думка, 1979. 244 с.
2. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Саратов, 1979. 232 с.
3. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования. Москва: Машиностроение, 1975. 175 с.
4. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. Ленинград: Машиностроение, 1984. 103 с.

5. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки : монография. Днепр : ЛИРА, 2018. 400 с.
6. Дитиненко С.А. Оптимизация круглого наружного продольного шлифования. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, 2005. Вип. 33. С. 225-230.

References (transliterated)

1. Ryzhov E. V., Sagarda A. A., Il'itskiy V. B., Chepovetskiy I.KH. Kachestvo poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke [Surface quality in diamond abrasive machining] Kiyev, Nauk. dumka Publ., 1979. 244 p.
2. Novoselov YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke [Dynamics of shaping surfaces on abrasive machining]. Saratov, 1979. 232 p.
3. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya [Optimization of the grinding process]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975. 175 p.
4. Lur'ye G. B. Progressivnyye metody kruglogo naruzhnogo shlifovaniya [Progressive methods for external round grinding]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 103 p.
5. Novikov F. V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki : monografiya [Fundamentals of Mathematical Modeling of Technological Processes of Mechanical Processing: A Monograph]. Dnepr, LIRA Publ., 2018. 400 p.
6. Ditinenko S. A. Optimizatsiya kruglogo naruzhnogo prodol'nogo shlifovaniya [Optimization of the round outer longitudinal grinding]. Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva [Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture], 2005, issue. 33. P. 225–230.

Надійшла (received) 27.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Крюк Анатолій Григорьевич (Крюк Анатолій Григорович, Kryuk Anatoly Grykorievich) – кандидат технічних наук, професор кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету, г. Харків. тел.: +38-0665936393; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedor Vasiliviyth) – доктор технічних наук, професор кафедри «Природоохоронні технології, екологія та безпека життєдіяльності» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

В. В. ДМИТРИК, А. В. ГЛУШКО, М. И. ТУРЕНКО, А. Г. КАНТЕР, В. Ю. СКУЛЬСКИЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРОЧНОГО НАГРЕВА ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ресурс эксплуатации сварных соединений энергетического оборудования в значительной мере зависит от их структурного состояния. Целесообразно, для получения исходной структуры сварных соединений с улучшенными качественными характеристиками, производить моделирование сварочного нагрева при их изготовлении. Затем, на основе данных моделирования путем подбора параметров режима выполнять сам процесс сварки, позволяющий получать качественную исходную структуру сварных соединений с возможно меньшей структурной неоднородностью.

Ключевые слова: сварные соединения, сварочный нагрев, моделирование, структурная неоднородность, фаза.

В. В. ДМИТРИК, А. В. ГЛУШКО, М. І. ТУРЕНКО, О. Г. КАНТЕР, В. Ю. СКУЛЬСЬКИЙ

МОДЕЛЮВАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО НАГРІВУ ВИГОТОВЛЯЄМИХ З'ЄДНАНЬ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Ресурс експлуатації зварних з'єднань енергетичного обладнання в значній мірі залежить від їх структурного стану. Доцільно, для отримання вихідної структури зварних з'єднань з поліпшеними якісними характеристиками, робити моделювання зварювального нагріву при їх виготовленні. Потім, на основі даних моделювання шляхом підбору параметрів режиму виконувати сам процес зварювання, що дозволяє отримувати якісну вихідну структуру зварних з'єднань з можливо меншою структурною неоднорідністю.

Ключові слова: зварні з'єднання, зварювальний нагрів, моделювання, структурна неоднорідність, фаза.

V. V. DMYTRYK, A. V. GLUSHKO, M. I. TYRENKO, A. G. KANTER, V. Yu. SKULSKIY

MODELING OF WELDED HEATING OF MANUFACTURED COMPOUNDS OF ENERGY EQUIPMENT

The service life of welded joints of power equipment largely depends on their structural condition. It is advisable, to obtain the original structure of welded joints with improved quality characteristics, to simulate the welding heat during their manufacture. Then, on the basis of modeling data by selecting the mode parameters, perform the welding process itself, which allows to obtain a high-quality initial structure of welded joints with the least possible structural heterogeneity. It should be noted that welded joints with the obtained improved quality characteristics have a crucial function during the operation of the whole complex of power equipment. It is found that modeling the welding process is an important part in the manufacture of welded joints of power equipment. Simulation of welding heating allows to obtain the structure of welded joints with improved quality characteristics. When determining the required design temperature in welded joints, it is possible to determine the conditions for the formation of their optimal initial structure with improved quality characteristics. The development of this model for modeling the welding temperature heating of the compounds being made is applied in the manufacture of especially important and important structures of power equipment, which is very necessary and relevant.

Keywords: welded joints, welding heating, modeling, structural inhomogeneity, phase.

Введение. Важной проблемой, стоящей перед энергетикой Украины, является модернизация оборудования энергоблоков АЭС и ГЭС, выработавшего свой парковый ресурс. В первую очередь подлежат замене паропроводы и сварные соединения паропроводных систем, лимитирующие ресурс эксплуатации самих паропроводов. Сварные соединения характеризуются наличием определенной структурной, химической и механической неоднородности, предотвратить которую в полной мере не представляется возможным.

Однако, уменьшить общий уровень неоднородности можно, что достигается путем использования процесса сварки на оптимизированных параметрах режима. Подбор параметров на основе моделирования сварного нагрева изготавливаемых соединений. Именно моделирование и последующий процесс механизированной сварки позволяет получать исходную структуру сварных соединений с улучшенными качественными характеристиками. Такая структура в большей мере является стабильной в условиях знакопеременных динамических напряжений (при остановке энергетического оборудования).

Длительность эксплуатации сварных соединений энергетического оборудования зависит от структурного состояния структуры. Разработке данной проблемы уделяется пристальное внимание [1–3], т. к. ресурс эксплуатации сварных соединений находится в прямой зависимости от получения их исходной структуры.

Результаты исследования. Рассмотрим объем расплава ванны, рис. 1, с учетом данных работ [1–3], представленный в цилиндрической системе координат. Предположим, что имеет место квазистационарный процесс теплообмена и кристаллизации:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} \right) = F_r - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\square v - \frac{v}{r^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \square u \\ \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial r} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_k + \frac{j^2}{\sigma} \end{cases} \quad (1)$$

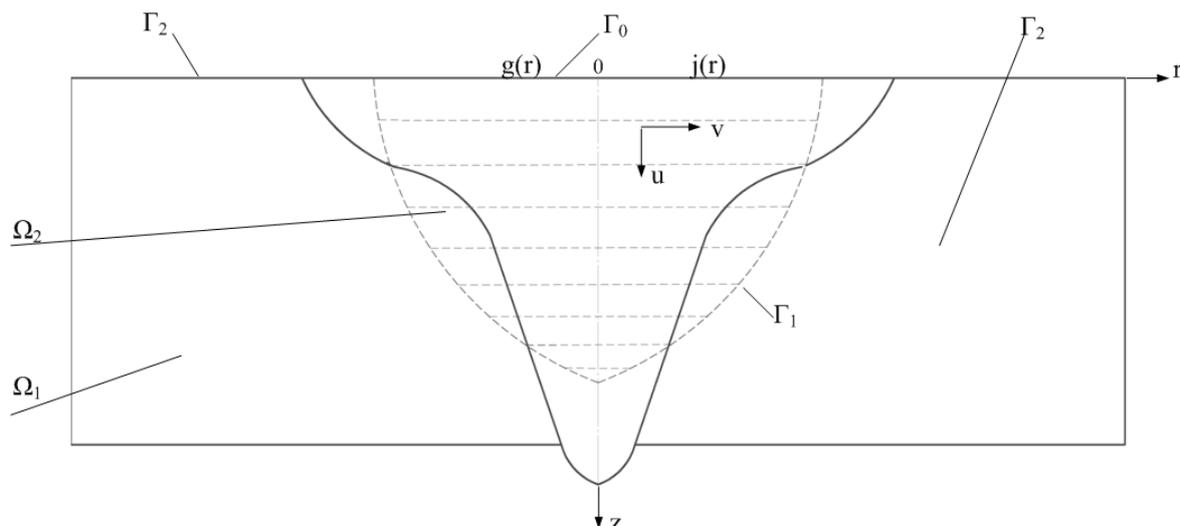


Рис. 1 – Схема аппроксимации границы фазового перехода двухпараметрическими параболоидами вращения:
 Ω_2 – область основного металла; Ω_1 – область расплава ванны

Струйный мелкокапельный перенос электродного металла обеспечивает дополнительный нагрев расплава ванны:

$$Q_k = H_d - H_v \quad (2)$$

В системе (1) удобнее перейти к новым переменным. Введем функцию тока расплава металла ψ и вихрь ξ . Связь с физическими переменными будет следующая:

$$\xi = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r}; u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}; v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (3)$$

После выполнения соответствующих преобразований получим систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} \right) = F_r - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\square v - \frac{v}{r^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \square u \\ \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial r} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_k + \frac{j^2}{\sigma} \end{array} \right. \quad (4)$$

Свободную поверхность Γ_0 области расплава ванны Ω_1 , рис. 1, будем считать плоской. Значение Γ_0 запишем в виде:

$$\omega_0 = 0; \quad (5)$$

где ω_0 – интенсивность вихря

Заметим, что:

$$\omega_0 > 0; \quad \text{в } \Omega_1 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \omega_0}{\partial \vec{v}} = 1 \quad \Gamma_0 = \partial \Omega_1$$

Здесь $\frac{\partial}{\partial \vec{v}}$ – дифференцирование по направлению внутренней нормали, определяемой единичным вектором нормали \vec{v} к границе $\partial \Omega_1$.

На свободной поверхности задан тепловой поток q :

$$q = k \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{3Q}{\pi \sigma_q^2} e^{\left(-\frac{3r^2}{\sigma_q^2} \right)} \quad (7)$$

$$r \leq \sigma_q^2$$

Зададим потенциал тока на поверхности Γ_0

$$\psi = const = 0 \quad (8)$$

А так как вертикальная составляющая вектора скорости $u = 0$, то дополнительно имеем:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0 \quad \text{на } \Gamma_0, \quad (9)$$

что означает отсутствие движения расплава со свободной поверхности в отрицательном направлении оси Oz. В плоскости $z = 0$ составляющая $v \neq 0$ (наличие вихря).

Условие на Γ_0 для вихря ξ учитывает влияние сил поверхностного натяжения

$$\mu \xi = \frac{\partial T}{\partial r} \left(-\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) \quad \text{на } \Gamma_0, \quad (10)$$

где $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ – температурный коэффициент поверхностного натяжения.

Рассмотрим краевые условия на участке границы $\partial \Omega_1 = \Gamma_1$ объема, это поверхность ликвидуса.

$$\begin{array}{l} T = T_1 \\ \left\langle \lambda \frac{\partial T}{\partial \vec{v}} \right\rangle = \alpha V_n \end{array} \quad (11)$$

Компоненты u и v вектора скорости \vec{V} равны нулю.

$$u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0, v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

Кроме того, $\partial\Omega_1$ – линия равного потенциала, то есть

$$\psi = 0 \text{ на } \partial\Omega_1 = \Gamma_1 \quad (13)$$

Условия для вихря не определяются, иначе возникает задача повышения порядка системы Навье-Стокса (4), которая в этом случае будет сформулирована в терминах функции тока, либо она будет переопределена.

Пусть мы располагаем функцией $\omega_1 = \omega_1(r, z)$ со свойствами:

$$\begin{cases} \omega_1 > 0 \text{ в } \Omega_1 \\ \omega_1 = 0 \text{ на } \Gamma_1 \end{cases} \quad (14)$$

Легко убедиться, что в качестве такой функции можно принять:

$$\omega_1 = -br^2 - a^2z + a^2b \quad (15)$$

Общий вид решения для температуры T , удовлетворяющей всем условиям(7), (11) на границе, можно представить в виде:

$$T = \frac{1}{\omega_0 + \omega_1} \left\{ \omega_0^2 (T_1 + \omega_1 \Phi_0) + \omega_1 (\Phi_0 - \omega_0 D_1^0 \Phi_0 - \omega_0 \frac{q}{k}) \right\}, \quad (16)$$

где Φ_0 – произвольная функция.

Продолжим рассмотрение задачи в области Ω_2 . Этот объем заполнен металлом, находящимся в твердой фазе, поэтому мы решаем только уравнение теплопроводности:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + Q_k \quad (17)$$

По условию на участке границы Γ_1 поддерживается температура солидуса (T_s)

$$T = T_s \text{ на } \Gamma_1 \quad (18)$$

На Γ_2 пренебрегая потерями на излучение по закону Стефана–Больцмана, принимаем условия теплообмена с окружающей средой по закону Ньютона (условия 3-го рода).

$$-k_s \frac{\partial T}{\partial v} = h(T - T_{cp.}) \quad (19)$$

где $T_{cp.}$ – температура окружающей среды.

При разработке решения наиболее сложной задачей является определение движения границы раздела твердой и жидкой фаз. После изучения различных возможностей наиболее эффективным и удобным оказалось предположить существование небольшого временного запаздывания между подводом тепла к границе раздела и ее движением. В частности, для малого временного интервала можно решить задачу о течении жидкости и теплоотдаче в область жидкости, в предположении, что граница является стационарной. Затем количество тепла, переданное к границе раздела в течение этого интервала, можно использовать для расчета малого конечного смещения, связанного с плавлением. Для новой области жидкости, которая соответствует смещенной границе раздела, находится решение для следующего временного интервала, как указано выше.

Граница раздела определяется для каждого временного интервала, поэтому можно найти решение для течения жидкого металла и теплопередачи в жидкой области, а также для теплопроводности твердого тела.

Запишем уравнение (4) в виде:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + Aw = f \quad (20)$$

а граничные условия $Bw = 0$ дополним начальными условиями

$$w|_{t=0} = 0, \quad (21)$$

где под w подразумевается вектор, компонентами которого (в зависимости от контекста) являются (u, v, P, T) или (ψ, ξ, T) , правая часть f означает наличие внешних воздействий (тепловой поток, электромагнитные силы, массовые силы и т.д.). Таким образом, мы решаем нестационарную (эволюционную) задачу (20) – (21), где операторы A, B и правая часть f есть функция времени t .

На первом шаге имеем условия, что дифференциальный оператор A и первая часть уравнения f не зависят от времени. Предположили, что нам известна система линейно-независимых функций, удовлетворяющих условию(20) и такая, что решение можно аппроксимировать линейной комбинацией:

$$w = c_1\varphi_1 + \dots + c_n\varphi_n \quad (22)$$

где $c_1 \dots c_n$ – константы, подлежащие определению. Их находили, проецируя уравнение (20) на n -мерное подпространство (22), добиваясь наименьшей невязки.

Имеем систему:

$$\begin{cases} \langle A(c_1\varphi_1 + \dots c_n\varphi_n), \varphi_1 \rangle = \langle f, \varphi_1 \rangle \\ \dots \\ \langle A(c_1\varphi_1 + \dots c_n\varphi_n), \varphi_n \rangle = \langle f, \varphi_n \rangle \end{cases} \quad (23)$$

Это нелинейная система алгебраических уравнений относительно неизвестных $c_1 \dots c_n$.

Под символом $\langle \rangle$ подразумевается скалярное произведение

$$\langle u, v \rangle = \int_{\Omega} uvd\Omega = \int_V uvdV \quad (24)$$

где V – элементарный объем или область Ω в принятых нами обозначениях,

dV – элемент объема.

В нашем случае $dV = dx\theta dydz = d\Omega = r dr d\theta dz$,

где (r, θ, z) – цилиндрические координаты.

Проинтегрируем уравнения системы (4) по объему, занимаемому жидкой фазой и умножим каждое из них на базисную функцию φ_k , имеющую вид:

$$\varphi_k = \omega_0 \omega_1 P_k(r, z), \quad (25)$$

где ω_0, ω_1 – функции, заданные условиями (6) и (14) соответственно.

$P_k(r, z)$ – полином Чебышева от двух переменных.

Получим следующую систему:

$$\begin{cases} 2\pi \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \xi}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \xi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\xi}{r} \right] \varphi_k r dr dz = \\ = 2\pi \int_{\Omega} \left[v \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \xi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} - \frac{\xi^2}{r} \right) + g \beta (T - T_{\infty}) + \pi (\vec{j} \times \vec{B}) \right] \varphi_k r dr dz \\ 2\pi \int_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \xi \right] \varphi_k r dr dz = 0 \\ 2\pi \int_{\Omega} \left[\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial z} \right] \varphi_k r dr dz = \\ = \frac{2\pi}{\rho C_p} \int_{\Omega} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_k \right] \varphi_k r dr dz, (k = 1, \dots, n) \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \xi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \xi}{\partial r} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\xi}{r} \right] \varphi_k dr dz + \\ + v \int_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial \xi}{\partial r} \varphi_k + r \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} + \xi \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} + \frac{\partial \xi}{\partial z} \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} r \right) \right] \varphi_k dr dz + \\ + g \beta \int_{\Omega} T \left(\varphi_k + r \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} \right) \varphi_k dr dz = \int_{\Omega} \pi (\vec{j} \times \vec{B}) \varphi_k dr dz \\ \int_{\Omega} \left[\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \varphi_k}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} \left(\varphi_k + r \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} \right) + \xi \varphi_k r \right] \varphi_k dr dz = 0 \\ \int_{\Omega} \left[\varphi_k \left(-\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{kr}{\rho C_p} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial \varphi_k}{\partial z} \right) \right] \varphi_k dr dz = \int_{\Omega} Q_k \varphi_k dr dz, (k = 1, \dots, n) \end{cases} \quad (27)$$

Интегралы по поверхности обращаются в нуль из-за равенства нулю координатных функций φ_k на поверхности $d\Omega$.

Проинтегрировав интегралы из системы (26) по частям и разделив равенства на 2π получим:

Интегралы по области Ω_1 вычисляются по квадратурным формулам Гаусса.

Выпишем разложения для температуры, вихря и скорости потока в следующем виде:

$$\begin{cases} T = \frac{1}{\omega_0^2 + \omega_1} \left\{ \omega_0^2 (T_L + \omega_1 \Phi_0) + \omega_1 (\Phi_0 - \omega_0 D_1^0 \Phi_0 - \omega_0 \frac{q}{k}) \right\} = \\ = \frac{\omega_0^2 T_L - \omega_0 \omega_1 \frac{q}{k} + \omega_0^2 \omega_1 + \omega_1 \Phi_0 - \frac{\omega_0 \omega_1}{\omega_0^2 + \omega_1} D_1^0 \Phi_0 = \\ = f_0 + f_1 \Phi_1 + f_2 D_1^0 \Phi_0 \\ \psi = \omega_0 \omega_1^2 \Phi_1 = f_3 \Phi_1 \\ \xi = \frac{\omega_1}{\omega_0 + \omega_1} \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial T}{\partial r} \left(-\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) + \omega_0 \Phi_2 \right] = \frac{\omega_1}{\omega_0 + \omega_1} \frac{1}{\mu} \left(-\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\omega_1}{\omega_0 + \omega_1} \omega_0 \Phi_2 = \\ = f_4 \frac{\partial T}{\partial r} + f_5 \Phi_2 \end{cases} \quad (28)$$

Взяв производные функций температуры, вихря и скорости потока, решаем полученные нелинейные алгебраические системы относительно коэффициентов (a_j , b_j , c_j), входящих в разложения функций T , ψ и ξ используя для этого решения метод Гаусса. При этом для решения относительно коэффициентов разложения a_j температуры T решается одна система линейных алгебраических уравнений (полученная из уравнения теплопроводности), для вихря ξ – две (полученные из уравнения движения и неразрывности), для функции тока ψ потоков жидкого металла – три (полученные из уравнений теплопроводности, движения и неразрывности).

Таким образом, в качестве первого приближения для температуры примем функцию $T = T'$, где T' получена после решения соответствующей системы линейных алгебраических уравнений. В качестве ξ' возьмем:

$$\xi' = \frac{1}{2} (\xi'_1 + \xi'_2),$$

где ξ'_1 – решение системы уравнений, полученной из уравнения непрерывности, ξ'_2 – решение системы уравнений, полученной из уравнения движения. Теперь имеем представления для T и ξ , находим

$$\psi' = \frac{1}{3}(\psi'_1 + \psi'_2 + \psi'_3).$$

где, ψ'_1 – решение уравнения непрерывности, ψ'_2 – решение уравнения движения, ψ'_3 – решение уравнения теплопроводности. Затем снова ищем приближение для температуры T^2 , и так до тех пор, пока не будут выполнены следующие условия:

$$\begin{aligned} \max j |T^{(k+1)} - T^{(k)}| < \varepsilon \\ \max j |\psi^{(k+1)} - \psi^{(k)}| < \varepsilon \\ \max j |\xi^{(k+1)} - \xi^{(k)}| < \varepsilon \end{aligned} \quad (29)$$

где $T^{(k+1)}$, $T^{(k)}$, $\psi^{(k+1)}$, $\psi^{(k)}$, $\xi^{(k+1)}$, $\xi^{(k)}$ – значение соответствующих функций в j -х точках сетки интегрирования,

ε – заданная точность вычислений.

Далее, делая шаг по времени, находили из условий (12), (13) для поверхности новые координаты дуги, расплавы ванны и ЗТВ, а затем решали приведенную выше стационарную задачу на новом временном промежутке.

На основе расчетных данных определения температурного режима в сварных соединениях представляется возможным определять условия для формирования их оптимальной исходной структуры. Аппроксимация расчетных температурных полей по сечению сварных соединений показала их достаточную (погрешность $\leq 10\%$) сходимость с экспериментальными данными, рис. 2, 3.

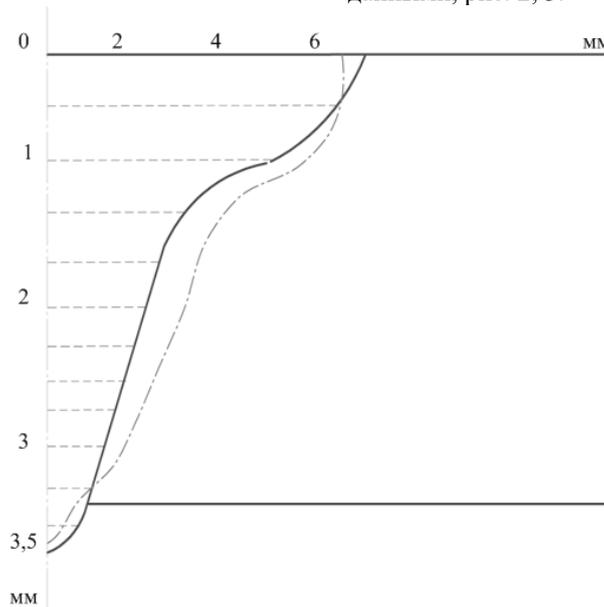


Рис. 2 – Схематическое представление изотерм, ограничивающих жидкую фазу (расплавы ванны) от твердой фазы (основной металл): – экспериментальные данные; --- расчетные данные

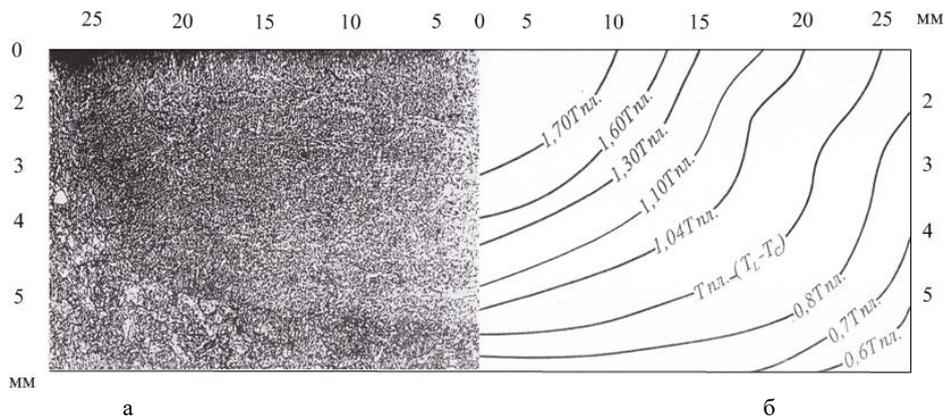


Рис. 3 – Фрагмент структур: а – изотермы; б – в металле шва (x100) и в ЗТВ сварного соединения из стали 15X1M1Ф

Выводы:

1. Моделирование магнитогидродинамических процессов при дуговой сварке плавящимся электродом позволило с достаточной точностью определять температурный режим в сварных соединениях, что актуально для получения их исходной структуры с улучшенными качественными

характеристиками.

2. Реализация разработанной модели представляется целесообразной применительно к изготовлению особо ответственных сварных соединений конструкций АЭС.

Список литературы

1. Sakuma Atsutsi, Inone Tatsuo. Nihon kikaigakkaironbushu // Trans. Jap. Soc. Mech. End. – 1996. Vol. 62, No 596 – P. 1032–1037
2. Masuyama Fujimitsu. Life assessment and extension of welded structures for high temperature components // Weld world. – 1993. Vol. 32, No 3. P. 51–64.
3. Дмитрик В.В. Метод определения температурного режима в расплаве сварочной ванны // Сварочное производство, 1998. №8. С. 19–21

References (transliterated)

1. Sakuma Atsutsi, Inone Tatsuo. Nihon kikaigakkaironbushu // Trans. Jap. Soc. Mech. End. – 1996. Vol. 62, No 596 – P. 1032–1037
2. Masuyama Fujimitsu. Life assessment and extension of welded structures for high temperature components // Weld world. – 1993. Vol. 32, No 3. P. 51–64.
3. Dmitrik V.V. Metod opredeleniya temperaturnogo rezhima v rasplave svarochnoy vannyi // Svarochnoe proizvodstvo, 1998. No 8. P. 19–21.

Поступила (received) 25.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дмитрик Виталий Владимирович (Дмитрик Віталій Володимирович, Dmytryk Vitaliy) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сварки, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина; svarka126@ukr.net

Глушко Алена Валериевна (Глушко Альона Валеріївна, Glushko Alyona) – старший преподаватель кафедры сварки, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина; <https://orcid.org/0000-0002-6245-9971>; alyonaglushko@gmail.com

Туренко Мария Ивановна (Туренко Марія Іванівна, Turenko Maria) – магистрант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра сварки, Харьков, Украина, svarka126@ukr.net

Кантер Александр Геннадиевич (Кантер Олександр Геннадійович, Kanter Alexandr) – зав. лабораторией сварки, ПАТ Турбоатом, Харьков, Украина, svarka126@ukr.net

Скульский Валентин Юрьевич (Скульський Валентин Юрійович, Skulskiy Valentin) – ведущий научный сотрудник ИЭЗ ім. Є.О. Патона, Киев, Украина, svarka126@ukr.net

Т. М. МИРОНОВА, А. В. АШКЕЛЯНЕЦЬ, В. Л. ЧУХЛІБ, А. А. ПЕТРУША

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРІВ ЧАВУННИХ ЗАГОТОВОК ТА РЕЖИМІВ ДЕФОРМУВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ В ПРОЦЕСІ КУВАННЯ

Підвищення рівня механічних властивостей сучасних зносостійких чавунів є важливою і актуальною задачею сьогодення. В структурі цих сплавів утворюються складні карбідні евтектики у вигляді суцільної сітки навколо дендритів первинного аустеніту. Застосування обробки тиском сприяє подрібненню карбідної складової та перетворює білий чавун в матеріал з унікальним комплексом властивостей, що поєднує високу стійкість до абразивного зносу з високою стійкістю до ударних навантажень. Обмеження впровадження обробки тиском в промисловості пояснюються їх низькою пластичністю у литому стані. На кафедрі матеріалознавства ім. Тарана Ю.Н. НметАУ розроблено новий клас білих (дактильованих) чавунів з підвищеною пластичністю завдяки карбідним перетворенням в легованому цементиті.

Для прогнозування формозміни в чавунних заготовках застосовано комп'ютерне моделювання у програмному продукті QForm, за допомогою якого визначено, особливості впливу вихідного співвідношення розмірів зразків (h/d), ступеня та швидкості деформації (ϵ) на розподіл температури та інтенсивності деформацій при стисканні на різному обладнанні. Для порівняння результатів комп'ютерного моделювання операції осадження із формозміною в заготовках з чавуну, що містить 2,4%С; 3,2%V; 1,78%Cr, проводили гаряче стискання на молоті та на гідравлічному пресі. Отримані результати показують, що по вертикальному перетину зразків деформація відбувається нерівномірно. При збільшенні висоти заготовки структурні складові деформуються в більшій мірі. При куванні на молоті утворюється більш однорідна структура. Правомірність результатів математичного моделювання співпадає з даними експериментальних досліджень, що підтверджує доцільність використання моделювання для прогнозування формозміни при куванні дактильованого чавуну.

Вивчено структурні перетворення в чавунних заготовках, що підлягали куванню в промислових умовах. Найбільш суттєвому подрібненню евтектичного цементиту та структурній однорідності поковок сприяє кування при 1000...1100°C із декількома виносками, застосування проміжного відпалу та деформування при температурах нижчих за температуру рекристалізації цементиту 850... 950 °C.

Ключові слова: білий чавун, зносостійкість, пластичність, заготовка, математичне моделювання, осадження, структурні зміни.

Т. М. МИРОНОВА, А. В. АШКЕЛЯНЕЦЬ, В. Л. ЧУХЛЕБ, А. А. ПЕТРУША

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧУГУННЫХ ЗАГОТОВОК И РЕЖИМОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССЕ КОВКИ

Повышение уровня механических свойств современных износостойких чугунов является важной и актуальной задачей современности. В структуре этих сплавов образуются сложные карбидные евтектики в виде сплошной сетки вокруг дендритов первичного аустенита. Применение обработки давлением способствует измельчению карбидной составляющей и превращает белый чугун в материал с уникальным комплексом свойств, сочетающий высокую стойкость к абразивному износу с высокой ударостойкостью. Трудность внедрения обработки давлением в промышленности объясняется их низкой пластичностью в литом состоянии. На кафедре материаловедения им. Тарана Ю.Н. НметАУ разработан новый класс белых чугунов с повышенной пластичностью благодаря карбидным превращениям в легированных цементите.

Для прогнозирования формоизменения в чугунных заготовках применено компьютерное моделирование в программном продукте QForm, с помощью которого определены особенности влияния исходного соотношения размеров образцов (h/d), степени и скорости деформации (ϵ) на распределение температуры и интенсивности деформаций при осадке на разном оборудовании. Для сравнения результатов компьютерного моделированияковки с формоизменения в заготовках из чугуна, содержащего 2,4% С; 3,2% V; 1,78% Cr, проводили горячую осадку на молоте и на гидравлическом прессе. Полученные результаты показывают, что по высоте образцов деформация происходит неравномерно. При увеличении высоты заготовки структура изменяется в большей степени. При ковке на молоте образуется более однородная структура. Правомерность результатов математического моделирования совпадает с данными экспериментальных исследований, что подтверждает целесообразность использования моделирования для прогнозирования формоизменения при ковке дактильованого чугуна.

Изучены структурные изменения в чугунных заготовках, которые ковали в промышленных условиях. Наиболее существенному измельчению евтектического цементита и структурной однородности поковок способствует ковка при 1000...1100°C с несколькими выносками, применение промежуточного отжига и окончательной деформации при температурах ниже температуры рекристаллизации цементита 850 ... 950°C.

Ключевые слова: белый чугун, износостойкость, пластичность, заготовка, математическое моделирование, осадка, структурные изменения.

Т. М. MYRONOVA, A. V. ASHKELIANETS, V. L. CHUHLIB, A. A. PETRUSHA

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CAST IRON WORKPIECE SIZE FACTORS AND DEFORMATION MODES AT FORM CHANGES IN THE FORGING PROCESS

Today the important task is to increase the level of mechanical properties of modern wear-resistant castings. In the structure of these alloys, there are complex carbide eutectics as a continuous grid around dendrites of the primary austenite. Eutectic carbides divide into particles in the process of pressure treatment, the mechanical properties of white cast iron become better, abrasive resistance and impact strength increase as well. The influence of carbide transformations on ductility, hardening and softening processes during deformation when applying different straining methods, as well as the influence of annealing following chipless shaping was determined. The deformation of white cast iron is almost never used in industry, because it has low ductility after casting. New compositions of white low-alloyed cast irons with increased plasticity developed at the Department of Materials Science of the National Metallurgical Academy of Ukraine. It is shown that implementation of phase transitions in metastable carbides could lead to hard deforming materials plasticity increasing in several times as well as to provide their successful pressure treatment under industrial conditions. The QForm program is used for computer simulation of cast iron processes of forging. The ratio of the sample sizes (h/d), the degree and the deformation rate (ϵ) affect the distribution of temperature and intensity of deformations when compressed on different equipment. The results of computer simulation coincide with the results of the experiment that was carried out. Cast iron contained 2.4% C; 3.2% V; 1.78% Cr, hot compression was carried out on a hammer and on a hydraulic press.

The results of the experiment indicate that the deformation is uneven in the vertical section of the samples. The structure deforms to a greater extent if the height of the workpiece is greater. A homogeneous structure is formed when forging on a hammer on a vertical cross section of a sample, although the structure changes in the central section of forging more.

Production technologies and deformable cast iron forgings were developed. The microstructural analysis of cast iron blanks, which were subject to forging in industrial conditions, showed that eutectic cementite is crushed by forging in two stages. The first stage is the deformation $\epsilon = 5 \dots 15\%$ at 1000 ... 1100 °C, after which it is heated and departed, and the second stage (final) at a temperature less than the recrystallization temperature of cementite 850 ... 950 °C.

Keywords: white iron, wear resistance, plasticity, workpiece, mathematical modeling, upsetting, structural changes.

Вступ. Білі чавуни широко використовуються в сучасних металургії та машинобудуванні як зносостійкі матеріали. Механічні властивості цих гетерофазних сплавів залежать від великого числа факторів. Традиційно їх використовують в якості ливарних сплавів, але давно відомо, що обробка тиском не тільки цілком можлива а й дозволяє суттєво поліпшити механічні властивості таких сплавів. В результаті пластичної деформації їх міцність збільшується в 2-4 рази, ударна в'язкість зростає в 3-6 разів, втомна міцність в 2-2,5 рази. При цьому зберігаються високі показники твердості і зносостійкості [1-3]. В той же час широке застосування деформаційної обробки білих чавунів гальмується низькою пластичністю в литому стані, що обумовлено наявністю крихких евтектичних карбідів. Вченими НМЕТАУ розроблено новий клас білих чавунів, що мають підвищену пластичність за рахунок фазових перетворень в евтектичній складовій. Ці низьколеговані ледебуритні чавуни успішно підлягають обробці тиском та називають дактильованими [1-3]. В зв'язку з цим важливою і актуальною задачею для впровадження виготовлення якісних поковок із білих чавунів є дослідження їх поведінки при різних режимах гарячого осадження.

Аналіз стану питання. Сучасні зносостійкі чавуни – це складно леговані багатокомпонентні сплави, при твердінні яких формуються складні карбідні евтектики. Наявність суцільної евтектичної сітки навколо дендритів первинного аустеніту зменшує стійкість деталей при абразивному зношуванні, бо відбувається викришування твердих карбідів під час тертя. Розташування твердих карбідних часток згідно «правила Шарпі», а саме рівномірно розгалужене у металеві матриці, сприяє суттєвому підвищенню зносостійкості виробів. Один з найбільш відомих підходів отримання такої структури, що значно збільшує вартість виробів, є застосування високого легування елементами, які сприяють утворенню різних типів інвертованої евтектики на базі спеціальних карбідів [4, 5]. Більш економічним є застосування пластичного, що перетворює білий чавун в матеріал з унікальним комплексом властивостей, який поєднує високу стійкість до абразивного зносу з високою стійкістю до ударних навантажень. Розробка складів дактильованих чавунів дозволяє деформувати ці сплави на лабораторному і промисловому обладнанні [1]. В основі цього методу лежить використання фазових перетворень, які відбуваються в процесі попередньої теплової обробки в пересиченому евтектичному цементиті. При легуванні білого чавуну елементами такими, як Cr, Mo, W, V, Ti, відбувається їх розчинення в карбіді заліза M_3C , збільшується рівень його метастабільності, і в цементиті виділяються більш стабільні карбіди. При цьому частина цементиту знеуглецьовується і перетворюється в аустеніт. Найбільш ефективним виявляється вплив ванадію спостерігається фазове перетворення: $(Fe,V)_3C \rightarrow VC + \text{аустеніт} + Fe_3C$. Це сприяє порушенню монолітності цементиту в колоніях ледебуриту за рахунок утворення міжфазних меж. Крім того, відбувається структурування цементиту, виникають нові площини ковзання, його

пластичність суттєво підвищується. Здатність карбиду заліза до формозміни без руйнування залежить від температури, напруженого стану, швидкості деформування та інших чинників обробки тиском, що в кінцевому стані визначає структуру та властивості заготовки.

Метою даної роботи є дослідження впливу вихідних параметрів та режимів кування на формування структури чавунних поковок, а саме визначення впливу співвідношення розмірів заготовок (висота/діаметр) на структурну неоднорідність та поведінку чавуну при гарячому куванні з різною швидкістю деформування, а також розробити режими деформування чавунних виливків і заготовок для виробництва поковок в промислових умовах

Результати роботи. В якості основної ковальської операції для проведення експерименту була вибрана операція «осаджування». Швидкість деформації варіювалась в залежності від вибору обладнання. Використовували пневматичний кувальний молот з МПЧ 50 кг, та гідравлічний кувальний прес з номінальною силою 160тон. Швидкість деформації на молоті досягала 6000 мм/хв., а на пресі – 40 мм/хв.

Науковий інтерес викликає можливість застосування комп'ютерного моделювання для прогнозування формозміни в чавунних заготовках при варіюванні різних параметрів деформування, а саме співвідношення висоти до діаметра зразка (h/d), ступеня та швидкості деформації (ϵ), обладнання та інструменту. З цією метою було виконане комп'ютерне моделювання у ліцензійному програмному продукті QForm [6], що поставляється з великою базою даних для матеріалів, що деформуються, а також обладнання та мастил. В якості модельного в програмі було обрано залізвуглецевий сплав з вмістом вуглецю 1,9%, що по своїй структурі й наявності карбідної фази при досліджуваних температурах є гетерофазним сплавом й наближається до експериментальних чавунів, хоча й не містить евтектичного цементиту. Співвідношення висоти до діаметра зразка (h/d) дорівнювало 0,25; 0,5; 1,0; 2,0, а ступінь деформації ϵ моделювалась 10%, 20% і 30%.

Результати математичного моделювання щодо розподілу температури показали, що у порівнянні з пресом на молоті при всіх ступенях деформації відбувається деформаційний розігрів заготовки під час деформації через велику швидкість деформації, що у свою чергу вказує на більшу інтенсивність деформації на молоті. Під час осадження на пресі відбувається охолодження заготовки в приконтактних зонах з поверхнею інструмента, що пов'язано з постійним контактом поверхні інструменту та поверхні заготовки. Стосовно розмірного фактору зразків, то природно, що зменшення маси зразка призводить до скорішого вистигання.

При моделюванні впливу швидкості деформації та розмірного співвідношення встановлено, що при всіх вибраних ступенях осадження більш рівномірний розподіл пластичних деформацій відбувається для зразків з $h/d > 1$, а при $h/d = 2$ спостерігається суттєва неоднорідність, особливо при деформуванні на пресі, а саме: в центральній частині відносно контактних

поверхонь зразків пластичне деформування найбільш інтенсивне (рис.1а). При куванні на молоті більш помітні ділянки інтенсивного деформування біля контактних поверхонь (рис.1б).

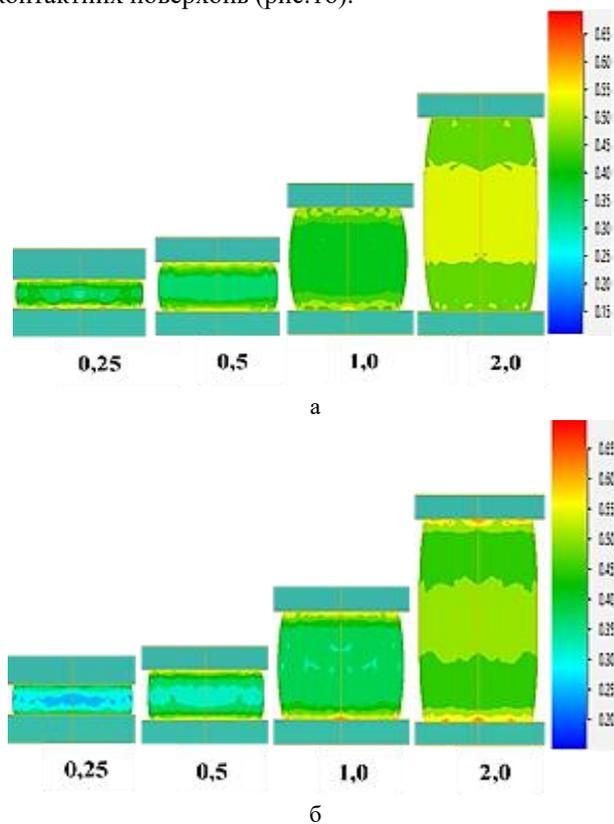


Рис.1 – Розподіл пластичних деформацій при $\epsilon = 30\%$: а – на пресі; б – на молоті

У процесі операції осаджування спостерігається «діжкоподібність» заготовки, котра в більшій мірі проявляється на пресі (рис.2). Це пов'язано з тим, що на контактах поверхонь метал переохолоджується, відбувається прилипання, коефіцієнт тертя менший ніж на молоті і тому плин металу по поверхні інструмента ускладнений.

Для порівняння результатів комп'ютерного моделювання операції осадження високо вуглецевого сплаву (1,9%С) із формозміною в заготовках з дактильованого чавуну, що містить 2,4%С; 3,2%V; 1,78%Cr, проводили наступний експеримент: із литих стрижнів діаметром 38мм виготовили заготовки різної висоти: $h=38...40$ мм та $76...80$ мм. Перед гарячим деформуванням зразки підлягали дворазовому відпалу ($860^{\circ}\text{C}-3\text{год.}+680^{\circ}\text{C}-4\text{год.}$) з метою ініціювання карбідного перетворення в цементиті для підвищення пластичності.

Після термічної обробки зразки нагрівали в печі до $T=1060^{\circ}\text{C}$, витримували 30хв., а потім деформували на молоті та на пресі. Кування на молоті проводили з двома виносками для додаткового підігріву зразка після деформування на $\sim 37\%$. Сумарний ступінь деформування склав 55% на обох зразках, незалежно від попереднього розміру.

Інші два зразки деформували на пресі із ступенем деформування 50%. Загальний вигляд зразків після деформування на молоті та пресі показаний на рис.2. Після деформування було проведено мікроструктурний аналіз по вертикальному перетину зразків.



Рис.2 – Зразки експериментального чавуну після гарячого деформування

У вихідному стані структура експериментального чавуну складається із дендритів аустеніту та евтектичної складової: ледебуриту та розгалуженої евтектики на базі карбиду ванадію, тобто з «карбідних зерен» – перетин гілок дендритів аустеніту, оточений евтектичною складовою. Під час пластичного деформування ці зерна витягаються в напрямку дії розтягуючої напруги. Структура нагадує строкатість, а по ширині витягнутих зерен можна судити про розподілення ступеню деформування по перерізу зразків

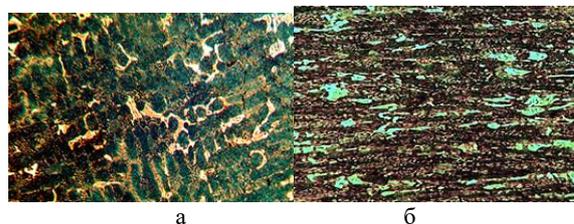


Рис.3– Мікроструктура експериментального чавуну, 100 \times ; а – у вихідному стані; б – після осадження

Мікроструктурний кількісний аналіз виконували наступним чином: ширину (висоту) карбідного зерна визначали за методом січних, причому спочатку визначали вісь вздовж якої були орієнтовані зерна і перпендикулярно проводили січні, крім того визначали кут цієї осі з лінією паралельною поверхні зразка (рис.4). Для визначення ступеню формозмін структури зразків було сфотографовано мікроструктуру при збільшенні 125 \times разів через кожні 2мм (для зразків 38/38) та через кожні 4мм (для зразків 80/40) по вертикальному перетину зразків.

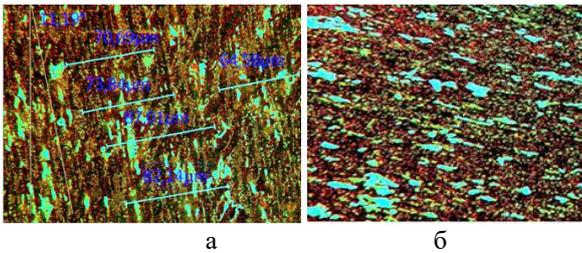
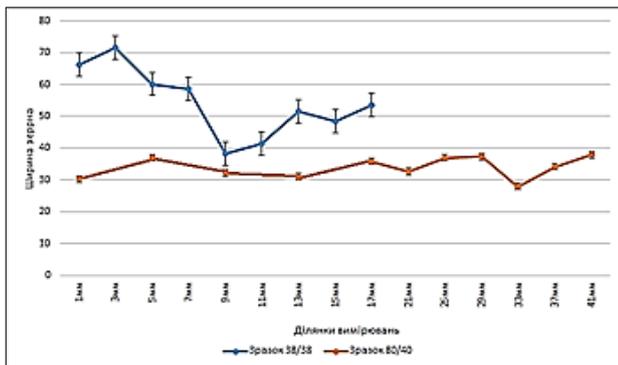
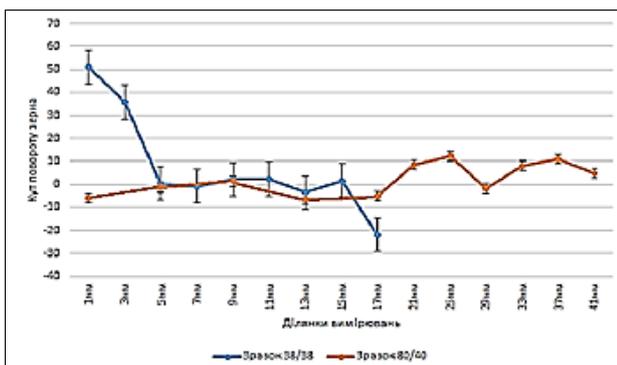


Рис.4 – Визначення розміру ширини карбідних зерен та кута їх орієнтування після стискання: а– на молоті, 125^x, б – на пресі, 400^x

Результати кількісного мікроструктурного аналізу графічно показані на рисунку 5. Отримані результати показують, що деформація відбувається по вертикальному перетину зразків нерівномірно. Співвідношення висота/діаметр мають суттєвий вплив на ступінь структурних змін в чавунних зразках при однаковому загальному ступеню деформації. При збільшенні висоти зразка гілки аустеніту деформуються в більшій мірі, особливо при осадженні на молоті (рис. 5).



а



б

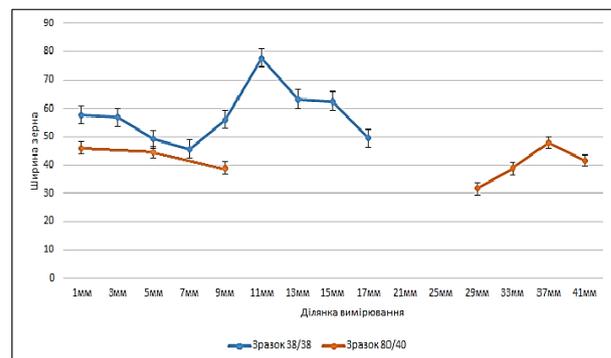
Рис.5 – Результати кількісного мікроструктурного аналізу чавунних зразків, що підлягали куванню на молоті: а – зміна розмірів «карбідного зерна»; б – зміна кута орієнтування зерен

При деформуванні на молоті формується більш однорідна структура, хоча є тенденція до подрібнення структури в центральних ділянках поковок. На цих ділянках зерна витягнуті майже паралельно поверхні

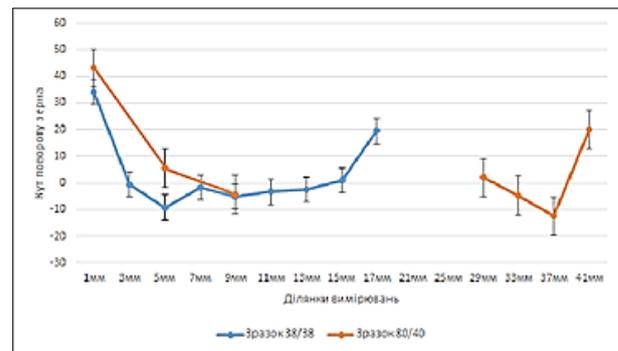
зразка, тобто направленні перпендикулярно діючим зусиллям стискання (рис.3б).

Особливо структурна неоднорідність виявляється при деформуванні на пресі в зразку з висотою в 2 рази більшою за діаметр. В його центральній ділянці евтектичні колонії не тільки витягаються, а й подрібнюються таким чином, що евтектична сітка повністю руйнується (рис.4 б). В зв'язку з цим визначити розмір та орієнтування «карбідних зерен» не можливо. Це показано на графіку розривом лінії (рис. 6).

Таким чином, при куванні на молоті, яке відбувається в декілька етапів заготовки мають більш однорідну структуру по висоті зразка. При збільшенні відношення h/d відбувається більш інтенсивне подрібнення структури.



а



б

Рис.6 – Результати кількісного мікроструктурного аналізу чавунних зразків, що підлягали деформуванню на пресі: а – зміна розмірів «карбідного зерна»; б – зміна кута орієнтування зерен

Для вивчення можливості виробництва поковок з розроблених складів ледобуритних чавунів на ковальсько-пресовому обладнанні в промислових умовах ЗАТ ФЕРИТ (раніше КПУ № 4 заводу ДЗМО) проводили кування на молоті 25 кг і 30 кг виливків на заготовки наступних розмірів: Ø25мм, Ø45мм, Ø30мм і смугу 30×100мм. В умовах заводу «Дніпроспецсталь» проводили гарячу деформацію 200кг виливків, що були виплавлені на Краматорському металургійному заводі. Отримано поковки квадратного перетину 100, а також коло Ø 90 і Ø 50.

Перед деформуванням виливки нагрівали в камерній печі до температури 1100 °С протягом 40...50хв. Температурний інтервал кування 1050 ... 850 °С з проміжним підігрівом (0,5 год).

Для підвищення технологічної пластичності доцільним є проводити кування в два етапи. На першому етапі деформацію здійснюють в інтервалі 5...15%. Після чого необхідно провести проміжний відпал при температурі 1000...1080°C 3 годин. Попередня деформація в значній мірі стимулює і прискорює процес розпаду цементиту на аустеніт і карбіди ванадію в процесі високотемпературної витримки [1]. Як показали дослідження, попередня деформація менш 5% не ефективна, помітних структурних змін в порівнянні з початковим станом чавуну після відпалу не відбувається. Зі збільшенням ступеню деформації збільшується дефектність цементиту і процес його розпаду при наступному нагріванні і витримці активізується. Збільшення ступеня попередньої деформації більше 15% для литої заготовки досить небезпечно, оскільки можуть утворитися поверхневі тріщини, обумовлені також охолодженням чавуну. Після такої обробки проводять остаточну деформацію.

Запропонована схема дозволяє, зберігаючи високу твердість і зносостійкість поковки, значно підвищити пластичність дактильованого чавуну. Слід зазначити, що остаточне кування при температурах, нижчих за температуру рекристалізації цементиту, а саме при 850...950 °C призводить до подрібнення цементиту по утворених висококутових межах на більш дрібні частинки (рис. 7). При цьому вони стають більш рівноосними.

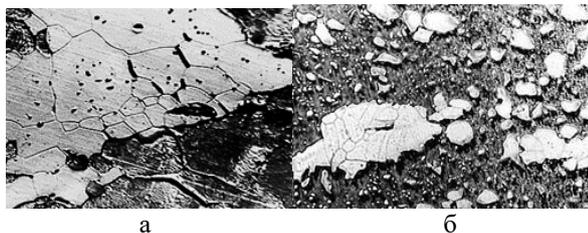


Рис. 7 – Утворення цементиту: а – після рекристалізації; б – отримання більш дрібних частинок цементиту

Якщо в початковому стані розмір евтектичних колоній становив у середньому $9,07 \times 7,48$ мкм, то після кування – $6,88 \times 5,33$ мкм відповідно, що на 25% менше.

Висновки. Досліджено вплив вихідних параметрів та режимів стискання на формування структури чавунних поковок, а саме визначення впливу співвідношення розмірів заготовок (висота/діаметр) на структурну неоднорідність та поведінку чавуну при гарячому куванні на молоті та гідравлічному пресі.

Результати математичного моделювання співпадають з даними експериментальних досліджень, що підтверджує правомірність і доцільність його використання для прогнозування формозміни при куванні дактильованого чавуну.

Отримані результати показують, що по вертикальному перетину зразків деформація

відбувається нерівномірно. При збільшенні висоти заготовки структурні складові деформуються в більшій мірі. При куванні на молоті утворюється більш однорідна структура по вертикальному перетину зразка, хоча є тенденція до більшого подрібнення структури в центральній ділянці поковки.

При деформуванні на пресі в зразку з висотою в 2 рази більшою за діаметр виявляється суттєва структурна неоднорідність. Причому ступінь подрібнення структури збільшується від краю до центру, а в центральній ділянці евтектична сітка повністю руйнується.

Вивчено структурні перетворення в чавунних заготовках, що підлягали куванню в промислових умовах. Найбільш суттєвому подрібненню евтектичного цементиту та структурній однорідності поковок сприяє кування із декількома виносками, застосування проміжного відпалу та остаточне деформування при температурах нижчих за температуру рекристалізації цементиту.

Список літератури

1. Миронова Т.М. Управление формированием структуры в белых ледебуритных чугунах на различных этапах деформационного периода / Т.М. Миронова, М. М. Рябчий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – №4. – С. 79–81.
2. Миронова, Т. М. О механизмах влияния фазовых переходов на поведение евтектических карбидов при деформировании / Т. М. Миронова, Т. Р. Донская, А. Ю. Сидорова // *Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. : Фізика, Радіоелектроніка*. – Д., 2012. – Т. 20, № 2. – С. 97–104.
3. Миронова, Т. М. Структура и свойства деформируемых чугунов / Т. М. Миронова, В. З. Куцова. – Д. : Дриант, 2009. – 190 с.
4. Таран-Жовнир Ю.Н. Строение эвтектик и создание новых сплавов эвтектического типа. / Ю.Н. Таран-Жовнир // *Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя* – Київ, 1998 р. – С. 176–197.
5. Сильман Г.И. Белые легированные чугуны с композиционной структурой. / Г.И.Сильман // *МіТОМ*: М.-2005. – №7.– С.94–100.
6. <http://www.qform3d.ru/products/qform>

References (transliterated)

1. Mironova T.M., Ryabchij M. M Upravlenie formirovaniem struktury v belyh ledeburitnyh chugunah na razlichnyh etapah deformacionnogo perioda [Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost']. – 2008. – No 4. – pp. 79–81.
2. Myronova T.M., Donskaya T.R., Sidorova A.Yu. O mekhanizmax vliyaniya fazovykh perekhodov na povedeniye evtekticheskikh karbidov pri deformirovanii [On the influence mechanisms of the phase transitions to the behavior of eutectic carbides during deformation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriya: Fizyka, Radioelektronika* [Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series: Physics, Electronics], 2012, vol. 20, No. 2, pp. 970–104.
3. Myronova T.M., Kutsova V.Z. Struktura i svoystva deformiruyemykh chugunov [Structure and properties of the deformed cast irons]. Dnipropetrovsk, Driant Publ., 2009. – 190 p.
4. Taran-Zhovnir YU.N. Stroenie ehvtektik i sozdanie novykh splyav ehvtekticheskogo tipa. [Suchasne materialoznavstvo HKNI storichchya] – Kiev, 1998. – pp. 176–197.
5. Sil'man G.I. Belye legirovannye chuguny s kompozicionnoy strukturoj. [MіТОМ]: Moscow. -2005. – No 7.– pp.94–100.
6. . <http://www.qform3d.ru/products/qform>

Миронова Тетяна Михайлівна (МироноваТатьяна Михайловна, MyronovaTetiana M.) – доктор технічних наук, професор кафедри матеріалознавства ім. акад. Ю.М.Тарана-Жовніра, Національна металургійна академія України, e-mail: t.myronova.myh@gmail.com .

Ашкелянець Антон Володимирович (Ашкелянец Антон Владимирович, Ashkelianets Anton V.) – кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О. П. Чекмарьова, e-mail: ashkelyanets@metal-forming.org.

Чухліб Віталій Леонідович (Чухлеб Виталий Леонидович, Chuhlib Vitaliy L.) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри обробки металів тиском, e-mail: chuhleb@metal-forming.org.

Петруша Анастасія Андріївна (Петруша Анастасия Андреевна, Petruscha Anastasiya A) – аспірант кафедри матеріалознавства ім. акад. Ю.Н.Тарана-Жовнира, e-mail: petruscha1994@gmail.com .

УДК 621.97

В. Д. ОБДУЛ, В. В. ШИРОКОБОКОВ, А. Ю. МАТЮХІН**ДИФЕРЕНЦІЙОВАНЕ ПРИТИСКУВАННЯ ФЛАНЦЮ ЗАГОТОВКИ ПІД ЧАС ВИТЯГУВАННЯ**

В роботі розглядається питання удосконалення способу листового штампування, а саме операції витягування, при здійсненні якої можна плавно, в процесі витягування регулювати зусилля притискування фланцю плоскої заготовки в залежності від поточного значення ходу витяжного повзуна, а також для врахування впливу величини наклепу, який завжди має місце в процесі деформування. Під час глибокого витягування виробів з тонколистових металів питоме зусилля притискування фланцю заготовки не залишається постійною, воно збільшується зі зменшення площі фланця. Таким чином це може призвести до обриву фланцю або дна під час застосування механічних пресів. Запропоновано конструкцію механічного преса для штампування, в якому з'єднання притискувального та витяжного повзунів здійснюється за допомогою гідравлічних циліндрів. Така конструкція дозволяє плавно регулювати питоме зусилля притискування фланцю заготовки в оптимальних межах для отримання високоякісної продукції.

Ключові слова: притискування фланцю, глибоке витягування, механічний прес, питоме зусилля.

В. Д. ОБДУЛ, В. В. ШИРОКОБОКОВ, А. Ю. МАТЮХІН**ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ ПРИЖИМ ФЛАНЦА ЗАГОТОВКИ ВО ВРЕМЯ ВЫТЯЖКИ**

В работе рассматривается вопрос усовершенствования способа листовой штамповки, а именно операции вытяжки, при осуществлении которой можно плавно, в процессе вытяжки регулировать усилие прижима фланца плоской заготовки в зависимости от текущего значения хода вытяжного ползуна, а также для учета влияния величины наклепа, который всегда имеет место в процессе деформирования. Во время глубокой вытяжки изделий из тонколистовых металлов удельное усилие прижима фланца заготовки не остается постоянной, оно увеличивается с уменьшением площади фланца. Таким образом это может привести к обрыву фланца или дна при применении механических прессов. Предложена конструкция механического преса для штамповки, в котором соединение прижимного и вытяжного ползунів осуществляется с помощью гидравлических цилиндров. Такая конструкция позволяет плавно регулировать удельное усилие прижима фланца заготовки в оптимальных пределах для получения высококачественной продукции.

Ключевые слова: прижим фланца, глубокая вытяжка, механический прес, удельное усилие.

V. D. OBDUL, V. V. SHIROKOVOKOV, A. U. MATIUKHIN**DIFFERENTIATED COMPRESSION FLANGE CLAMP DURING EXTRACTION**

The issue of improving the method of sheet stamping, in particular, the stretching operations, in which it is possible to smoothly, in the process of pulling, is to regulate the forces of pressing the flange of the flat billet depending on the current value of the stroke of the exhaust slide to take into account the influence of the magnitude of defamation, which always takes place in the process of deformation. During the deep drawing of sheet metal products, the specific effort of pressing the workpiece flange does not remain constant, it increases with the decrease of the area of the flange. This way, it can lead to a breakage of the flange or bottom when applying mechanical presses. The design of the mechanical press for stamping, in which the connection of the compression and exhaust slide is carried out with the help of hydraulic cylinders, is proposed. Such a design allows smooth adjustment of the specific effort of squeezing the workpiece flange in the optimal range for the production of high-quality products.

Key words: compression of the flange, deep drawing, mechanical press, specific pressure.

Вступ. В більшості випадків для витягування використовуються як механічні так і гідравлічні преси з притискуванням заготовки. При штампуванні деталей з листових заготовок спостерігаються такі дефекти як гофри, випучування і місцеве потоншення стінок напівфабрикатів. Для запобігання вказаних дефектів треба правильно встановлювати необхідне зусилля притискування фланцю заготовки.

Основна частина. Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що при витягуванні виробів з тонкого листа зусилля притискування, необхідне для усунення складкоутворення, не залишається постійними, а мінімальна сила притискування, попереджуюча утворення складок на різних стадіях процесу витягування являється змінною величиною і зростає зі збільшенням ходу пуансона.

На кривошипних пресах при витягуванні, наприклад круглих в плані виробів, площа фланцю який контактує з матрицею і притискувачем зменшується, а зусилля притискування залишається постійним його величина визначається [1]:

$$Q_{пр} = 0,25\pi[D^2 - (d_1 + 2r_m)^2]q$$

де: D – діаметр заготовки;

d_1 – діаметр напівфабриката;

r_m – радіус закруглення матриці;

q – питомий тиск притискувала (задається постійним [1]).

Напруження від зусилля притискування (при коефіцієнтах витяжки близьких до граничних) може бути визначено згідно з [2] залежністю:

$$\sigma_{Pmax} = \sigma_s \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi R S \sigma_s} + \frac{S}{2r_m + S} \right) e^{\mu \frac{\pi}{2}}$$

де σ_s – межа міцності;

R – радіус заготовки;

r – радіус закруглення пуансона;

μ – коефіцієнт тертя;

S – товщина заготовки;

r_m – радіус закруглення матриці.

Таким чином, зусилля притискування визначається виходячи з початкових розмірів заготовки і в процесі витягування залишається незмінним, що призводить до зростання питомого зусилля притискування за рахунок зменшення площі фланцю. Очевидно, що регулювання зусилля притискування дозволить знизити напруження в

небезпечному перетині і розширити можливості процесу витягування.

Відомий спосіб витягування виробів з листових заготовок, який включає притискування заготовки за допомогою спеціального повзуна з механічними приводом і витягування внутрішнім повзуном [2].

Недоліком цього способу витягування є відсутність регулювання зусилля притискування в процесі витягування, крім того механічний привод зовнішнього повзуна не дає можливості дотримання постійного зусилля притискування (повзун не вистояє, а здійснює коливання з амплітудою в межах пружності приводу цього повзуна). Зусилля притискування може бути встановлене один раз в процесі налагодження.

Іншим способом витягування виробів з листових заготовок є спосіб витягування на гідравлічних пресах, на яких є можливість регулювання зусилля притискування за рахунок встановлення тієї чи іншої величини тиску рідини в приводних циліндрах зовнішнього повзуна [3].

Недоліком цього способу є відсутність можливості плавного регулювання зусилля притискування в залежності від величини ходу витяжного повзуна (глибини витягування).

Ще один спосіб листового штампування, це витягування плоскої заготовки зі змінним притискуванням фланця [4]. Недоліком цього способу є відсутність можливості плавного регулювання зусилля притискування, що не дає можливості враховувати вплив величини наклепу для усунення гофрів, випуклостей та місцевого зменшення товщини стінки.

Введення операції регулювання зусилля притискування фланця в процесі витягування дозволяє підвищити ефективність самого процесу листового штампування, стійкість процесу, зменшити на 10-12% коефіцієнт витягування, збільшити максимально можливу глибину витягування та в кінцевому результаті, на 25% зменшити кількість браку при витяжних операціях листового штампування за рахунок зменшення гофрів, випуклостей, місцевих зменшень товщини стінки. Це також дозволить підвищити здатність штампуєміст тонколистових низьколегованих сталей підвищеної міцності і отримувати напівфабрикати з мінімальною різнотовщинністю.

Якщо розглядати процес витягування круглого в плані виробу (рис. 1), то можна виділити етап появи циліндричної частини виробу, на якому поточна площа фланцю, що знаходиться під притискувачем буде визначались наступним чином:

$$F_{\text{пот}} = F_0 - F_2 - F_3 - F_4 - F_5 \quad (1)$$

де F_0 – площа заготовки;

F_2 – площа перехідної частини на матриці;

F_3 – площа циліндричної частини виробу;

F_4 – площа перехідної частини на пуансоні;

F_5 – площа донної частини.

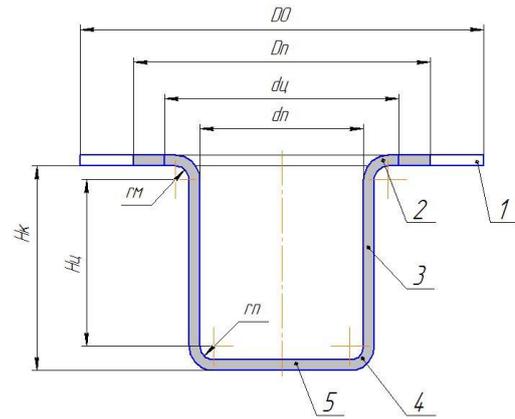


Рис. 1 – Розподіл циліндричного виробу на розрахункові елементи

Згідно з [1] площа цих елементів обчислюється наступним чином:

$$F_2 = \frac{\pi}{4} (2\pi d_{\text{ц}} \cdot r_{\text{м}} - 8r_{\text{м}}^2); F_3 = \pi d_{\text{п}} H_{\text{ц}}$$

$$F_4 = \frac{\pi}{4} [2\pi (d_{\text{п}} - 2r_{\text{п}}) \cdot r_{\text{п}} + 8r_{\text{п}}^2];$$

$$F_5 = \frac{\pi}{4} (d_{\text{п}} - 2r_{\text{п}})^2.$$

Після проведення відповідних перетворень будемо мати наступну залежність для визначення площі $F_{\text{пот}}$:

$$F_{\text{пот}} = A - B \cdot H_{\text{ц}}, \quad (2)$$

де A і B постійні величини, які відповідно, дорівнюють:

$$A = F_0 - F_2 - F_4 - F_5$$

$$B = \pi d_{\text{п}}$$

Аналізуючи вищезазначене можна зробити висновок про необхідність регулювання зусилля притискування в функції ходу повзуна преса.

На механічних пресах без конструктивних змін кінематичного зв'язку витяжного повзуна з притискувальним реалізація регулювання зусилля притискування не можлива, на гідравлічних пресах для цього необхідно в гідросистему циліндрів приводу притискувального повзуна вмонтувати регулятори тиску з реалізацією певної математичної залежності [5].

На механічних пресах реалізація цієї залежності вимагає зв'язку витягуювального і притискувального повзунів за допомогою, наприклад, гідравлічних циліндрів, тиск в яких в процесі витягування міг би змінюватись за необхідним законом.

Диференційоване притискування фланцю заготовки при здійсненні операції витягування реалізується наступним чином (Рис.2, 3).

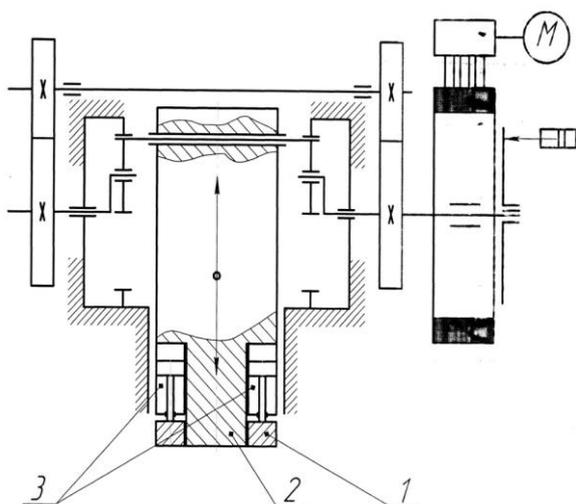


Рис. 2 – Кінематична схема пресу

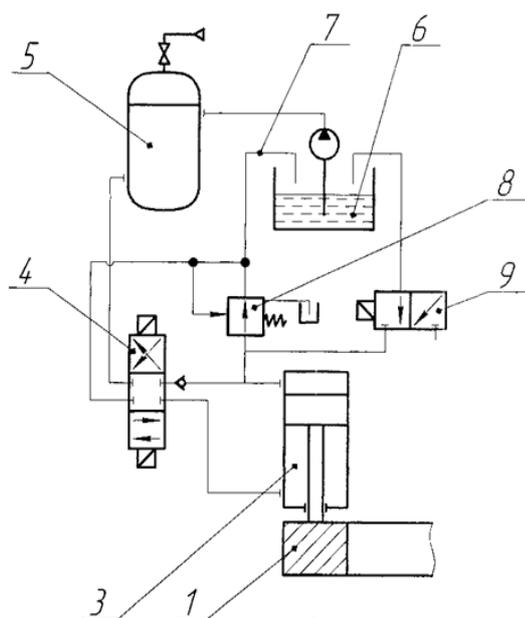


Рис. 3 – Гідравлічна схема управління зусиллям притискування

Витяжний повзун 2 приводиться в дію приводом (на рис. 2 не показано). Заготовка після змашування подається на нижню частину штампа (на рис. 1 і 2 не показано). Включають привод преса (наприклад механічний). Повзуни 1 і 2 починають одночасно холостий рух вниз. Після контакту з заготовкою і змикання штампу притискувальний повзун 1 зупиняється, а витяжний повзун продовжує рухатись вниз, при цьому об'єм поршневих порожнин гідравлічних циліндрів 3 зменшується і робоча рідина стискується, тиск збільшується до величини, встановленої клапаном 8. За допомогою цього клапана 8 тиск притискування фланця плоскої заготовки може плавно регулюватись під час ходу повзуна 2 за рахунок кінематичного зв'язку регулювального елемента клапана 8 з повзуном 2, або з кривошипним валом привода цього повзуна.

Золотник 4, генератор рідини підвищеного тиску 5, наповнюючий бак 6, трубопроводи 4 та клапан 9 забезпечують функціонування системи регулювання зусилля притискування.

В якості регулятора тиску в циліндрах може бути використаний регулятор тиску, або регульований дросель, пропускна здатність якого залежить від величини ходу повзуна.

Для отримання значного ходу повзуна можна рекомендувати використати привод, у якого повний хід повзуна дорівнює чотирьом радіусам кривошипа [4, 5].

Питоме зусилля притискування, з використанням цього способу, може бути функцією не тільки ходу витяжного повзуна. З'являється можливість корегувати питомий тиск в поршневих порожнинах, а отже і силу притискування в залежності від інших факторів, які впливають на процес витягування. В першу чергу це наклеп, який приводить до збільшення міцності і твердості металу, який витягується; температури і ін. Це вимагає встановлення на основі статистичної інформації залежності наклепу від ходу витяжного повзуна у вигляді табличних даних або аналогової залежності.

Використання мікроконтролерів у схемі управління процесом не ускладнить управління пресом і не збільшить його вартість, проте з'явиться можливість оперативного реагування на сам процес витягування. Це дозволить практично повністю використовувати можливості металу і в ряді випадків відмовитись від додаткових технологічних операцій пов'язаних з проміжним відпалюванням.

Висновки. У випадку реалізації можливості регулювання тиску в поршневих порожнинах циліндрів приводу притискувального повзуна можна підбирати оптимальний режим витягування, що дає можливість суттєво зменшити потоншення стінки і коефіцієнт витягування при одночасному підвищенні стійкості процесу витягування.

Список літератури

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. 6^е изд., перераб. и доп., Л.: Машиностроение. 1979. – 520 с. ил.
2. Кузнецко – штамповочное оборудование / А.Н. Банкетов, Ю.А. Бочаров, Н.Е. Добринский и др. Под ред Банкетова А.Н., Ланского Е.Н. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 576 с., ил. С. 158–162
3. Добрянский Н.С. Гидравлический привод прессов. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с. С. 192–199.
4. Пат. 69298 Україна, МПК (2017) B26F 1/00, B21D 22/00. Спосіб листової штамповки [Текст] / Мороз М.М., Мосьян Д.В., Драгобецький В.В., Пузир Р.Г., Троцько О.В. (Україна); заявник і патентовласник Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського. – №201111830; заявл. 07.10.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. №8. – 4 с.
5. Shirokobokov, V. V., Abdul, D. V., Obdul, V. D. & Shirokobokova, N. V. (2015). Necessity of specific holddown pressure adjustment when drawing operation. *Metallurgical and Mining Industry*, 7(11), 41–45.

References (transliterated)

1. Romanovskij V.P. Spravochnik po holodnoj shtampovke. 6e izd., pererab. i dop., Leningrad: Mashinostroenie. 1979. – 520 p. il.
2. Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie / A.N. Banketov, YU.A. Bocharov, N.E. Dobrinskij i dr. Pod red Banketova A.N.,

- Lanskogo E.N. – 2-e izd., pererab. i dop. – Moscow: Mashinostroenie, 1982. – 576 p., il. Pp. 158–162.
3. Dobryanskij N.S. Gidravlicheskiy privod pressov.– Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 222 p. Pp. 192–199.
 4. Pat. 69298 Ukraïna, MPK (2017) B26F 1/00, B21D 22/00. Sposib listovoi shtampovki [Tekst] / Moroz M.M., Mos'pan D.V., Dragobec'kij V.V., Puzir R.G., Troc'ko O.V. (Ukraïna); zayavnik i patentovlasnik Kremenchuc'kij nacional'nij universitet im. Mihajla Ostrograds'kogo.– No u201111830; zayavl. 07.10.2011; opubl. 25.04.2012, Byul. No 8.-4 p.
 5. Shirokobokov, V. V., Abdul, D. V., Abdul, V. D., & Shirokobokova, N. V. (2015). Necessity of spesific holddown pressure adjustment when drawing operation. *Metallurgical and Mining Industry*, 7(11), P/ 41–45.

Надійшло (received) 23.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Обдул Василь Дмитрович (Обдул Василий Дмитрович, Obdul Vasyl Dmytrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри «Обробка металів тиском»; м. Запоріжжя, Україна

Широкобоків Віталій Володимирович (Широкобоків Виталий Владимирович, Shirokobokov Vitalii Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри «Обробка металів тиском»; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: shirokobokov@gmail.com

Матюхін Антон Юрійович (Матюхин Антон Юрьевич, Matiukhin Anton Yuriiovych) – кандидат технічних наук, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри «Обробка металів тиском»; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2261-0577>; e-mail: mco2005@i.ua

Д. Г. ПАЛАМАРЬ, С. А. ВОРОБЕЙ, В. Г. РАЗДОБРЕЕВ, И. Ю. ПРИХОДЬКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРАБОТКИ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ЗОН СЕЧЕНИЯ РАСКАТА

Применение непрерывнолитых заготовок для производства сортовых профилей является одним из важнейших направлений современной металлургии. При переводе действующих сортопрокатных станов на использование непрерывнолитой заготовки вместо исходной катаной не обеспечивается получение качественного готового проката. Поэтому разработка деформационно-температурных параметров прокатки и калибровки валков, которые позволят обеспечить повышенную деформацию осевой зоны раската для необходимой проработки литой структуры является актуальной задачей. Решение этой задачи позволит перевести действующие непрерывные мелкосортные и проволочные станы на непрерывнолитую заготовку с минимальным увеличением ее сечения по отношению к сечению используемой на этих станах катаной заготовки и, следовательно, с минимальными объемами реконструкционных мероприятий. Выполнены аналитические исследования проработки центральных зон раската с использованием разработанного в ИЧМ НАНУ упрощенного метода оценки напряжений. Показано, что с увеличением сечения исходной непрерывнолитой заготовки степень проработки центральных зон раската уменьшается, что вполне логично и не противоречит устоявшимся в теории прокатки представлениям. Подтверждены известные данные о том, что с увеличением диаметра валков, повышением температуры нагрева исходных заготовок, использование чугунных валков взамен стальных, при прочих равных условиях, глубина проникновения деформации увеличивается. Определено, что наибольшую степень деформации центральных зон раскатов обеспечивают овальные калибры (по сравнению с ящичными калибрами и прокаткой в валках с гладкой бочкой). В результате аналитических исследований установлено, что повышение содержания углерода в стали в пределах, допустимых стандартами, приводит к увеличению степени проработки центральных зон сечения раската. Полученные результаты могут быть использованы при определении технологических режимов производства проката, которые обеспечивают повышенную степень деформационной проработки центральных зон сечения раската.

Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, тип калибра, диаметр валка, чугунные и стальные валки, температура нагрева исходной заготовки, напряженно-деформированное состояние центральной зоны раската

Д. Г. ПАЛАМАР, С. О. ВОРОБЕЙ, В. Г. РАЗДОБРЕЕВ, І. Ю. ПРИХОДЬКО

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ПРОКАТКИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОПРАЦЮВАННЯ ЦЕНТРАЛЬНИХ ЗОН ПЕРЕРІЗУ РОЗКАТУ

Застосування безперервнолитих заготовок для виробництва сортових профілів є одним з найважливіших напрямків сучасної металургії. При перекладі діючих сортопрокатних станів на використання безперервнолітої заготовки замість вихідної катаної не забезпечується отримання якісного готового прокату. Тому розробка деформаційно-температурних параметрів прокатки і калібрування валків, які дозволять забезпечити підвищену деформацію осової зони гуркоти для необхідної опрацювання литої структури є актуальним завданням. Вирішення цієї задачі дозволить перевести діючі безперервні дрібносортні і дровові стани на безперервноліту заготовку з мінімальним збільшенням її перетину по відношенню до перетину використовуваної на цих станах катаної заготовки і, отже, з мінімальними обсягами реконструкційних заходів. Виконано аналітичні дослідження опрацювання центральних зон розкату з використанням розробленого в ІЧМ НАНУ спрощеного методу оцінки напружень. Показано, що зі збільшенням перетину вихідної безперервнолітої заготовки ступінь опрацювання центральних зон розкату зменшується, що цілком логічно і не суперечить усталеним в теорії прокатки уявленням. Підтверджено відомі дані про те, що зі збільшенням діаметру валків, підвищенням температури нагріву вихідних заготовок, використанням чавунних валків замість сталевих, при інших рівних умовах, глибина проникнення деформації збільшується. Визначено, що найбільший ступінь деформації центральних зон розкату забезпечують овальні калібри (в порівнянні з ящичковим калібрами і прокаткою в валках з гладкою бочкою). В результаті аналітичних досліджень встановлено, що підвищення вмісту вуглецю в сталі в межах, допустимих стандартів, призводить до збільшення ступеня опрацювання центральних зон перетину розкату. Отримані результати можуть бути використані при визначенні технологічних режимів виробництва прокату, які забезпечують підвищений ступінь деформаційного опрацювання центральних зон перетину розкату.

Ключові слова: безперервноліта заготовка, тип калібру, діаметр валка, чавунні і сталеві валки, температура нагріву вихідної заготовки, напружено-деформований стан центральної зони розкату

D. G. PALAMAR, S. A. VOROBI, V. G. RAZDOBREEV, I. Y. PRIKHODKO

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ROLLING MODES ON THE EFFICIENCY OF PROCESSING CENTRAL ZONES CUTTING ZONES

The use of continuously cast billets for the production of varietal profiles is one of the most important areas of modern metallurgy. When translating existing rolling mills to the use of continuously cast billets instead of the original rolled does not provide high-quality finished rolled products. Therefore, the development of deformation-temperature parameters of rolling and calibration of the rolls, which will ensure increased deformation of the axial zone of the roll for the necessary study of the cast structure is an important task. The solution of this problem will allow the transfer of existing continuous small-section and wire mills to continuously cast billets with a minimum increase in its cross section relative to the cross section of the rolled billet used in these mills and, therefore, with the minimum amounts of reconstruction activities. Analytical studies have been carried out to study the central zones of rollout using the simplified stress estimation method developed in the ISI of NASU. It is shown that with an increase in the cross-section of the original continuous-cast billet, the degree of development of the central zones of the roll decreases, which is quite logical and does not contradict the ideas established in the rolling theory. The well-known data confirmed that with an increase in the diameter of the rolls, an increase in the heating temperature of the original blanks, the use of cast iron rolls instead of steel, with other things being equal, the depth of penetration of the deformation increases. It was determined that the greatest degree of deformation of the central zones of rolls is provided by oval gauges (as compared to box gauges and rolling in rolls with a smooth barrel). As a result of analytical studies, it has been established that an increase in the carbon content in steel within the limits allowed by the standards leads to an increase in the degree of study of the central zones of the section of the roll. The results can be used to determine the technological modes of production of rolled products, which provide an increased degree of deformation study of the central zones of the section of the roll.

Keywords: continuously cast billet, caliber type, roll diameter, cast iron and steel rolls, heating temperature of the original billet, stress-strain state of the central zone of roll.

Введение. Важнейшим направлением развития черной металлургии является переход на технологию непрерывной разливки стали, что позволяет уменьшить расход металла и энергозатраты на единицу выпускаемой продукции. При строительстве новых крупно-, средне-, мелкосортных и проволочных станов наиболее экономичным является объединение машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с прокатным станом в единый комплекс. В зависимости от типа стана и сортамента продукции размеры сечения непрерывнолитых заготовок составляют от 150×150 до 280×280 мм, а в некоторых случаях и больше. Иная картина наблюдается при переводе действующих сортопрокатных станов на применение непрерывнолитых заготовок (НЛЗ). Размер исходных катаных заготовок на большинстве этих станов составляет от 80×80 до 125×125 мм. Вследствие того, что катаные заготовки имеют высокую степень деформационной проработки центральной зоны за счет прокатки на обжимных и заготовочных станах, указанные размеры поперечного сечения заготовок обеспечивают получение качественного готового проката. Непрерывнолитые заготовки характеризуются, как правило, худшими показателями макроструктуры (более высокими баллами центральной пористости, осевой ликвации, общей пористости). Поэтому, применение непрерывнолитых заготовок такого же сечения, как катаных, не обеспечивает получение высокого качества готового проката.

Увеличение сечения НЛЗ требует дорогостоящей реконструкции действующих прокатных станов. В частности, необходимо заменить существующие нагревательные печи и установить дополнительно в голову стана четыре – шесть рабочих клетей. При неизменной конечной скорости прокатки на непрерывном стане это приведет к уменьшению скорости в первых клетях ниже допустимой по условиям работы прокатных валков и большому перепаду температуры металла по длине раската, что ухудшает качество готовой продукции. В связи с этим необходима замена и другого оборудования, ограничивающего увеличение скоростей прокатки (приводов клетей, устройств охлаждения проката и др.).

Для решения данной проблемы в последнее десятилетие ведутся поиски альтернативных путей использования непрерывнолитых заготовок на таких станах. Одним из путей является разработка деформационно-температурных параметров прокатки и калибровка валков, которые обеспечивают повышенную деформацию осевой зоны раскатов.

Цель работы – установление закономерностей влияния параметров деформации и типов калибров, которые применяются на сортопрокатных станах, на напряженно-деформированное состояние центральной зоны металла, что позволит разрабатывать рациональные конструктивные и технологические решения для перехода действующих станов на применение непрерывнолитой заготовки.

Изложение основных материалов исследований. Данные исследования выполнены с

использованием разработанного в ИЧМ НАНУ упрощенного метода оценки напряжений в сечении раскатов [1].

Исследовали влияние следующих параметров:

- размеров поперечного сечения заготовок в интервале от 80×80 до 200×200 мм;
- типа калибра (гладкая бочка, ящичный калибр, овальный калибр);
- степени деформации по вершине калибра в интервале от 10 до 30 %;
- температуры раската в интервале 900-1200 °С;
- марки стали (Ст3, 70);
- материала валков (сталь, чугун);
- диаметра валков в интервале 200-800 мм.

В соответствии с разработанным методом, влияние температуры проката, марки стали и материала валков проявляется через изменение коэффициента внешнего трения при прокатке.

Расчет коэффициента трения выполняли в соответствии с рекомендациями А. П. Грудева [2] по выражению:

$$f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (0,55 - 0,00024 \cdot t)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий материал и состояние поверхности валков;

k_2 – коэффициент, учитывающий влияние скорости прокатки;

k_3 – коэффициент, учитывающий влияние химического состава стали.

Значения коэффициента k_1 : для чугунных закаленных шлифованных валков 0,9; для чугунных валков 1,0; для стальных валков 1,2; для стальных валков с насечкой 1,5.

Скорость прокатки в первых клетях непрерывного сортового стана, как правило, не превышает 1,0 м/с. В этом случае $k_2 = 1,0$.

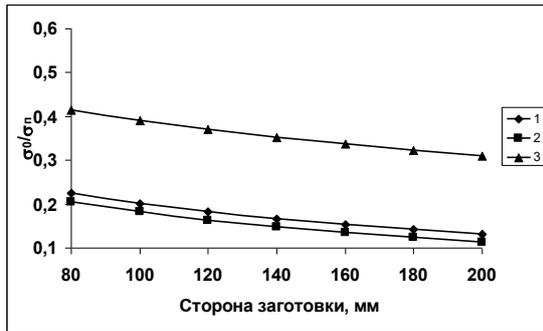
Для учета влияния химического состава стали (содержание углерода) использовали рекомендации работы [3] (табл. 1).

Таблица 1 – Значения поправочного коэффициента k_3 [3]

C, %	0,05–0,2	0,2–0,3	0,3–0,5	0,5–0,8	0,8–1,2
k_3	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9

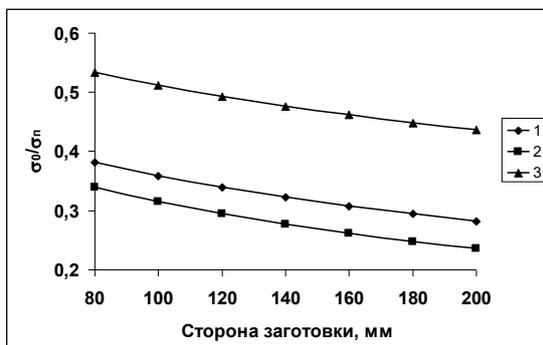
Результаты расчетов влияния размеров сечения заготовок на отношение напряжений в центральной части раската (σ_0) и на его поверхности (σ_{Π}) представлены на рис. 1 – 3. Эти расчеты выполнены для условий прокатки в валках, диаметром 600 мм, коэффициент трения 0,35.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 1 – 3 показывают, что с увеличением сечения исходной заготовки степень проработки центральных зон раската уменьшается, что вполне логично и не противоречит устоявшимся в теории прокатки представлениям.



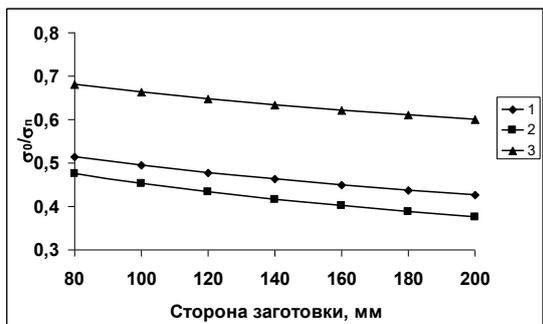
1 – гладкая бочка; 2 – ящичный калибр;
3 – овальный калибр

Рис. 1 – Зависимость отношения напряжений в центральной части раската и на его поверхности от размера исходной заготовки при прокатке в различных калибрах и степени деформации по вершине калибра 10 %



1 – гладкая бочка; 2 – ящичный калибр;
3 – овальный калибр

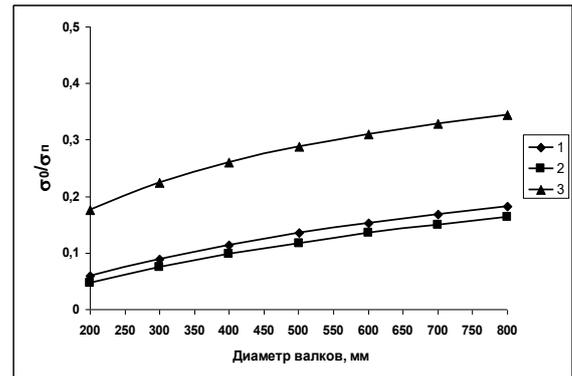
Рис. 2 – Зависимость отношения напряжений в центральной части раската и на его поверхности от размера исходной заготовки при прокатке в различных калибрах и степени деформации по вершине калибра 20 %



1 – гладкая бочка; 2 – ящичный калибр;
3 – овальный калибр

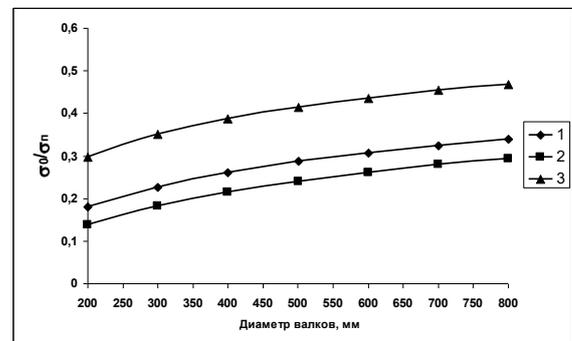
Рис. 3 – Зависимость отношения напряжений в центральной части раската и на его поверхности от размера исходной заготовки при прокатке в различных калибрах и степени деформации по вершине калибра 30 %

Результаты расчетов влияния диаметра рабочих валков (рис. 4 – 6) также подтверждают известные данные о том, что с увеличением диаметра валков, при прочих равных условиях, глубина проникновения деформации увеличивается.



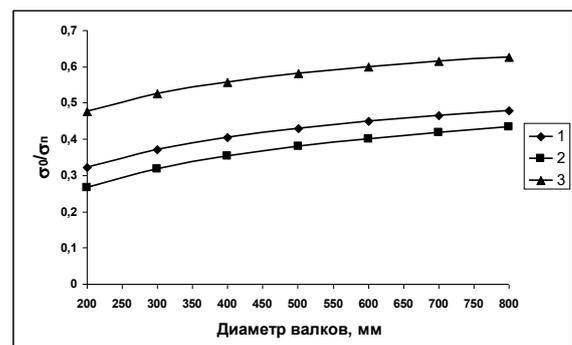
1 – гладкая бочка; 2 – ящичный калибр;
3 – овальный калибр

Рис. 4 – Зависимость отношения напряжений в центральной части раската и на его поверхности от диаметра валков при прокатке в различных калибрах и степени деформации по вершине калибра 10 %



1 – гладкая бочка; 2 – ящичный калибр;
3 – овальный калибр

Рис. 5 – Зависимость отношения напряжений в центральной части раската и на его поверхности от диаметра валков при прокатке в различных калибрах и степени деформации по вершине калибра 20 %



1 – гладкая бочка; 2 – ящичный калибр;
3 – овальный калибр

Рис. 6 – Зависимость отношения напряжений в центральной части раската и на его поверхности от диаметра валков при прокатке в различных калибрах и степени деформации по вершине калибра 30 %

В табл. 2 и 3 обобщены результаты аналитических исследований степени проработки центральных зон раската при различных температурах прокатки, материале рабочих валков и марках стали исходной заготовки. Размеры исходной заготовки – 160×160 мм, диаметр валков – 600 мм.

Таблица 2 – Результаты исследований степени проработки центральных зон сечения раската при различных температурах прокатки, материале рабочих валков (материал заготовки – Ст3)

$\varepsilon, \%$	$t, ^\circ\text{C}$	f , (стальные валки)	f , (чугунные валки)	σ_0/σ_n (стальные валки)			σ_0/σ_n (чугунные валки)		
				Гладкая бочка	Ящичный калибр	Овальный калибр	Гладкая бочка	Ящичный калибр	Овальный калибр
10	900	0,434919	0,326189	0,09713	0,08285	0,258417	0,173987	0,154436	0,362542
	1000	0,39615	0,297112	0,11957	0,103449	0,29158	0,203338	0,182419	0,396886
	1100	0,359202	0,269401	0,145764	0,12783	0,327132	0,235906	0,213794	0,432636
	1200	0,324256	0,243192	0,1758	0,156155	0,36473	0,271496	0,248418	0,4694
20	900	0,434919	0,326189	0,230898	0,188636	0,382242	0,333093	0,28629	0,486339
	1000	0,39615	0,297112	0,263127	0,218894	0,416533	0,367388	0,320072	0,518669
	1100	0,359202	0,269401	0,29802	0,252232	0,452057	0,403353	0,355968	0,551469
	1200	0,324256	0,243192	0,33527	0,28842	0,488424	0,440602	0,393612	0,584387
30	900	0,434919	0,326189	0,369903	0,321461	0,553207	0,474314	0,427085	0,641815
	1000	0,39615	0,297112	0,404193	0,355743	0,583328	0,506923	0,460778	0,667785
	1100	0,359202	0,269401	0,439826	0,391799	0,613532	0,540084	0,49535	0,693495
	1200	0,324256	0,243192	0,476415	0,429246	0,643511	0,573442	0,530423	0,718705

Таблица 3 – Результаты исследований степени проработки центральных зон сечения раската при различных температурах прокатки, материале рабочих валков (материал заготовки – Сталь 70)

$\varepsilon, \%$	$t, ^\circ\text{C}$	f , (стальные валки)	f , (чугунные валки)	σ_0/σ_n (стальные валки)			σ_0/σ_n (чугунные валки)		
				Гладкая бочка	Ящичный калибр	Овальный калибр	Гладкая бочка	Ящичный калибр	Овальный калибр
10	900	0,396374	0,297281	0,119427	0,103317	0,291377	0,203154	0,182243	0,396678
	1000	0,368867	0,276651	0,138404	0,120946	0,317434	0,226913	0,205099	0,422983
	1100	0,341124	0,255843	0,160599	0,141775	0,346072	0,253692	0,231056	0,45128
	1200	0,313122	0,234841	0,186613	0,166437	0,377593	0,283927	0,260587	0,481758
20	900	0,396374	0,297281	0,262929	0,218706	0,416326	0,367179	0,319865	0,518475
	1000	0,368867	0,276651	0,288469	0,24305	0,442483	0,393617	0,346205	0,542693
	1100	0,341124	0,255843	0,316742	0,270347	0,47052	0,422211	0,374969	0,56826
	1200	0,313122	0,234841	0,34809	0,301006	0,500612	0,453179	0,406422	0,595281
30	900	0,396374	0,297281	0,403986	0,355535	0,58315	0,506727	0,460574	0,667631
	1000	0,368867	0,276651	0,430213	0,38203	0,605486	0,531204	0,486062	0,686676
	1100	0,341124	0,255843	0,458389	0,410745	0,628865	0,55709	0,513195	0,706426
	1200	0,313122	0,234841	0,4887	0,441911	0,653361	0,584497	0,542111	0,726926

Следует отметить, что полученные данные соответствуют основным положениям теории прокатки. Вместе с тем, разработанный метод позволяет в первом приближении количественно оценивать влияние технологических параметров деформации и схем калибров на проработку центральной зоны непрерывнолитых заготовок.

Выводы.

1. С применением разработанного упрощенного метода оценки напряжений в сечении раскатов проведены аналитические исследования влияния параметров прокатки и типов калибров на деформационную проработку центральной зоны раскатов.

2. Установлено, что повысить степень проработки центральных зон сечения раската возможно путем увеличения диаметра рабочих валков,

применения чугунных валков вместо стальных, повышением температуры исходной заготовки; применением овальных калибров.

3. Показано, что повышение содержания углерода в стали способствует увеличению степени проработки центральных зон сечения раската.

Список литературы

1. Паламарь Д.Г., Воробей С.А., Лохматов А.П., Ершов С.В. Метод оценки напряженно-деформированного состояния осевой зоны раската при горячей сортовой прокатке. Обработка материалов давлением: сб. научн. тр. ДГМА, Краматорск: из-во ДГМА. – 2013, №2(35). – С. 43-48.
2. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.
3. Жучин В.А., Никитин Г.С., Шварцбарт Я.С. Расчет усилий при непрерывной горячей прокатке. – М.: Металлургия, 1986. – 198 с.

References (transliterated)

1. Palamar DG, Vorobey SA, Lokhmatov AP, Ershov S.V. Method for estimating the stress-strain state of the axial zone of the roll during hot section rolling. Processing of materials by pressure: a collection of scientific papers DGMA. Kramatorsk, DGMA Publ., 2013, no 2 (35), pp. 43–48.
2. Grudev A.P. External friction during rolling. Moscow, Metallurgy Publ., 1973. 288 p.
3. Zhuchin V.A., Nikitin G.S., Shvartsbart Ya.S. Calculation of effort during continuous hot rolling. Moscow, Metallurgy Publ., 1986. 198 p.

Поступила (received) 05.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Паламар Дмитро Григорович (Паламарь Дмитрий Григорьевич, Palamar Dmitry Grigorievich) – Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної Академії Наук України, відділ процесів і машин обробки металів тиском (ВОМТ), молодший науковий співробітник; м. Дніпро; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9503-3248>; e-mail: damjan@i.ua

Воробей Сергій Олександрович (Воробей Сергей Александрович, Vorobeii Sergii Aleksandrovich) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної Академії Наук України, відділ процесів і машин обробки металів тиском (ВОМТ), старший науковий співробітник; м. Дніпро; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0119-3935>; e-mail: vso54@ukr.net

Раздобреєв Валерій Гурійович (Раздобреєв Валерий Гурьевич, Razdobreev Valeriy Gyriyovich) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної Академії Наук України, відділ процесів і машин обробки металів тиском (ВОМТ), старший науковий співробітник; м. Дніпро; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7402-7992>; e-mail: v_razdobreev@ukr.net

Приходько Ігор Юрійович (Приходько Игорь Юрьевич, Prikhodko Igor Yurievich) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної Академії Наук України, відділ процесів і машин обробки металів тиском (ВОМТ), завідувач відділом процесів і машин обробки металів тиском (ВОМТ) м. Дніпро; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5651-8106>; e-mail: isi@ukr.net

УДК 620.179.16: 620.179.17

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**НОВІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТВЕРДОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ
ЗМІЦНЕНИХ МЕТАЛОВИРОБІВ**

Визначено, що значно підвищити експлуатаційні можливості виробів, конструкцій тощо можливо за рахунок зміцнення поверхневих та внутрішніх об'ємів матеріалів. Вказано, що при вимірюваннях твердості класичними методами пошкоджується поверхня виробу, внаслідок чого похибка вимірювання досягає значних величин, оскільки твердість визначається локально. Одним з перспективних методів неруйнівного контролю твердості поверхні виробів може бути електромагнітно-акустичний метод з використанням ультразвукових поверхневих хвиль. Метою роботи встановлено задачу розробки нових методів ультразвукового контролю твердості поверхневих шарів, які забезпечать підвищення точності вимірювань при високій продуктивності контролю. Для вирішення поставленої задачі розроблено метод ультразвукового контролю твердості металовиробів, який передбачає збудження в поверхневому шарі металовиробу та прийому імпульсів ультразвукових поверхневих коливань електромагнітно-акустичним способом за допомогою спеціальних перетворювачів. Структура розробленої системи включає в себе збуджуючий перетворювач, приймаючий перетворювач та блок управління та обробки інформації. Розроблений метод включає в себе: калібрування контрольного приладу перед початком вимірювання, блок управління та обробки інформації формує управляючі сигнали для генератора, який збуджує в індукторі перетворювача імпульси високочастотного струму у вигляді пакету з заданою кількістю періодів заповнення вибраної частоти, через що в поверхневому шарі зразка збуджуються поверхневі коливання, які розповсюджуються в напрямку приймального перетворювача, який приймає імпульси хвиль Релея та після підсилення прийняті імпульси оброблюються в блоці управління та обробки інформації. Розроблено та наведено конструкцію перетворювачів, часові схеми розгортки сигналу та технологію контролю металовиробів. Використання розробленого способу дозволяє підвищити продуктивність контролю при його високій точності і локальності.

Ключові слова: ультразвуковий контроль, електромагнітно-акустичний перетворювач, хвилі Релея, метод, модель, експериментальні дослідження, дефекти металу, металовироби.

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**НОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ
УПРОЧНЕННЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ**

Установлено, что значительно повысит эксплуатационные возможности изделий, конструкций и т.п. возможно за счет укрепления поверхностных и внутренних объемов материалов. Указано, что при измерениях твердости классическими методами повреждается поверхность изделия, вследствие чего погрешность измерения достигает значительных величин, поскольку твердость определяется локально. Одним из перспективных методов неразрушающего контроля твердости поверхности изделий может быть электромагнитно-акустический метод с использованием ультразвуковых поверхностных волн. Целью работы определена задача разработки новых методов ультразвукового контроля твердости поверхностных слоев, которые обеспечат повышение точности измерений при высокой производительности контроля. Для решения поставленной задачи разработан метод ультразвукового контроля твердости металлоизделий, предусматривающий возбуждения в поверхностном слое металлоизделия и приема импульсов ультразвуковых поверхностных колебаний электромагнитно-акустическим способом с помощью специальных преобразователей. Структура разработанной системы включает в себя возбуждающий преобразователь, принимающий преобразователь и блок управления и обработки информации. Разработанный метод включает в себя: калибровка контрольного прибора перед началом измерения, блок управления и обработки информации формирует управляющие сигналы для генератора, возбуждает в индукторе преобразователя импульсы высокочастотного тока в виде пакета с заданным количеством периодов заполнения выбранной частоты, из-за чего в поверхностном слое образца возбуждаются поверхностные колебания, которые распространяются в направлении приемного преобразователя, который принимает импульсы волн Рэлея и после усиления принятые импульсы обрабатываются в блоке управления и обработки информации. Разработан и приведен конструкцию преобразователей, временные схемы развертки сигнала и технологию контроля металлоизделий. Использование разработанного способа позволяет повысить производительность контроля при его высокой точности и локальности.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, электромагнитно-акустический преобразователь, волны Рэлея, метод, модель, экспериментальные исследования, дефекты металла, металлоизделия.

S. Yu. PLESNETSOV**NEW HARDNESS TESTING METHODS FOR SURFACE LAYERS OF STRENGTHENED
METAL PRODUCTS**

It was determined that in order to significantly improve the operational capabilities of products, structures, etc. is possible by strengthening the surface and internal volumes of materials. It is indicated that hardness measurements by classic methods the damage is inflicted to the surface of the product, and as a result the measurement error reaches significant values, since the hardness is determined locally. One of the promising methods of non-destructive testing of the surface hardness of products can be an electromagnetic-acoustic method using ultrasonic surface waves. The aim of the work is the task of developing new methods of ultrasonic testing of the hardness of surface layers, which will ensure an increase in measurement accuracy with high inspection performance. To solve this problem, a method of ultrasonic testing of the hardness of metal products has been developed, which provides for the excitation in the surface layer of a metal product and the reception of ultrasonic surface vibration pulses by an electromagnetic-acoustic method using special transducers. The structure of the developed system includes a stimulating converter, a receiving converter and an information control and processing unit. The developed method includes: calibration of the control device before the start of measurement, the control and information processing unit generates control signals for the generator, excites high frequency current pulses in the converter inductor in the form of a packet with a specified number of filling periods of the selected frequency, which is why in the surface layer of the sample surface oscillations are excited, which propagate in the direction of the receiving transducer, which receives pulses of Rayleigh waves and after amplification, the received and processed pulses are treated in the control unit and information processing. The design of the transducers, temporary signal sweep circuits and the technology of control of metal products were developed and presented. Using the developed method allows to increase the performance of the control with its high accuracy and locality.

Keywords: ultrasonic testing, electromagnetic-acoustic transducer, Rayleigh waves, method, model, experimental studies, metal defects, metal product.

Вступ. Значно підвищити експлуатаційні можливості виробів, конструкцій тощо можливо за рахунок зміцнення поверхневих та внутрішніх об'ємів матеріалів. Найчастіше оцінку зміцнення виробів виконують механічними методами Роквела, Брінеля та іншими [1]. При таких вимірюваннях пошкоджується поверхня виробу. Похибка вимірювання досягає значних величин, оскільки твердість визначається локально.

Покращити ситуацію можливо за рахунок використання неруйнівних методів контролю [2]. Одним з перспективних методів неруйнівного контролю твердості поверхні виробів може бути електромагнітно-акустичний (ЕМА) [3]. Типовий сучасний ЕМА-контрольний прилад наведено на рис. 1.



Рис. 1 – Сучасний ЕМА дефектоскоп

В даній роботі особлива увага приділяється реалізації ЕМА методу з використанням ультразвукових поверхневих хвиль (хвиль Релея).

Мета роботи. Розробити нові методи ультразвукового контролю твердості поверхневих шарів які забезпечать підвищення точності вимірювань при високій продуктивності контролю.

Основна частина. Для вирішення поставленої задачі розроблено метод ультразвукового контролю твердості металовиробу [3], який включає збудження в поверхневому шарі металовиробу імпульсів ультразвукових поверхневих коливань електромагнітно – акустичним способом за допомогою перетворювача, індуктор якого виконаний в формі «змійка» з встановленим кроком, прийом імпульсів ультразвукових поверхневих коливань перетворювачем, індуктор якого також виконаний у формі «змійка» з тим же кроком, калібрування контрольного приладу, сканування поверхні виробу, реєстрацію імпульсів, які пройшли ділянку поверхні виробу та визначення твердості металу виробу за результатами порівняння з калібрувальними даними, при цьому калібрування приладу проводять на зразках з відомою твердістю шляхом регулювання частоти збуджуючих ультразвукових хвиль Релея до отримання максимальної амплітуди прийнятих сигналів, визначають залежність значення твердості з визначеною частотою ультразвукових коливань, сканують металовироби з регулюванням частоти ультразвукових хвиль до отримання максимальної величини прийнятого сигналу, а твердість металовиробу визначають по відповідності виміряної частоти ультразвукових коливань твердості по визначеній калібрувальній залежності для даного матеріалу металовиробу.

На рис. 2 наведено спрощена блок-схема пристрою для реалізації запропонованого методу.

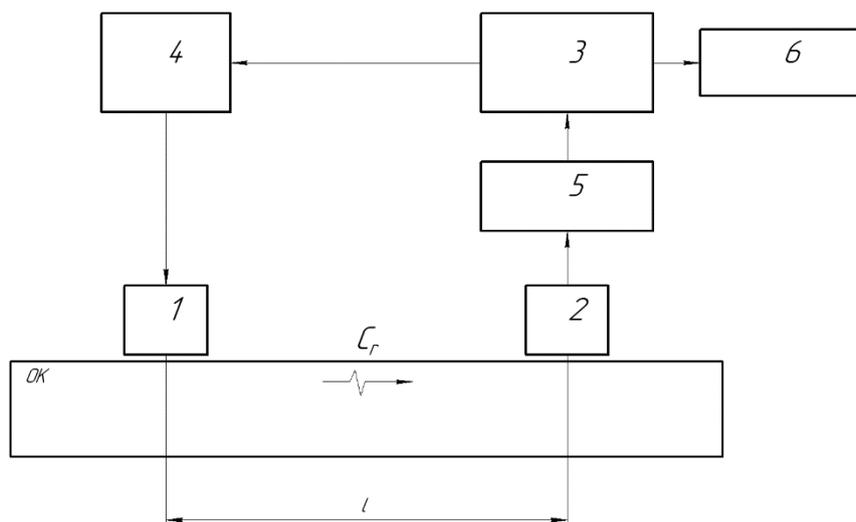


Рис. 2 – Блок-схема пристрою для реалізації розробленого способу ультразвукового контролю твердості металовиробу: 1 – збуджуючий перетворювач; 2 – приймаючий перетворювач; 3 – блок управління та обробки інформації; C_r – хвиля Релея; ОК – об'єкт контролю; l – відстань від збуджуючого до приймаючого перетворювача; 4 – генератор пакетних імпульсів; 5 попередній підсилювач; 6 – блок візуалізації

На рис. 2 позначені: 1 – збуджуючий перетворювач; 2 – приймаючий перетворювач; 3 – блок управління та обробки інформації; C_r – хвиля Релея; ОК – об'єкт контролю; l – відстань від збуджуючого до

приймаючого перетворювача; 4 – генератор пакетних імпульсів; 5 – попередній підсилювач; 6 – блок візуалізації.

На рис. 3 наведено схематичне зображення і розташування індукторів збуджуючого та прийомного перетворювачів над поверхнею ОК

На рис. 3 позначені: 7 – індуктор збуджуючого ЕМА перетворювача; 8 – індуктор приймаючого ЕМА

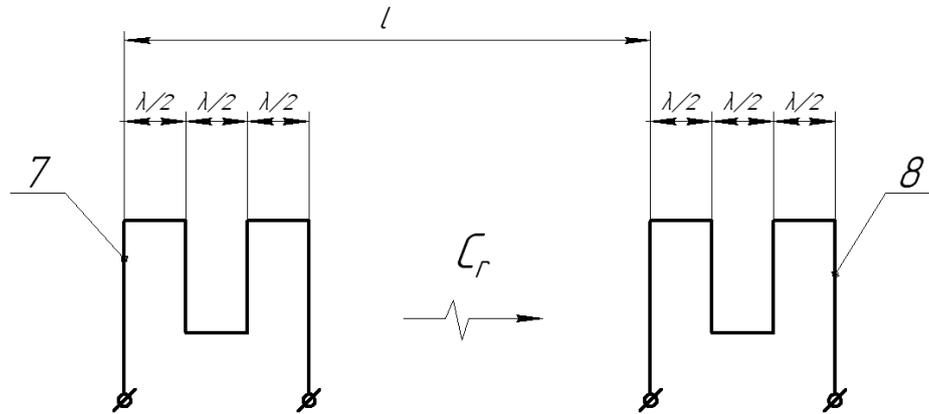


Рис. 3 – Індуктори ЕМА перетворювача при діагностиці твердості поверхні металовиробу:
7 – збуджуюча котушка; 8 – приймальна котушка

Метод реалізується наступним чином. Перед початком вимірювання проводять калібрування контрольного приладу. Для цього на поверхню контрольного зразка з відомою твердістю металу встановлюють на фіксованій відстані l збуджуючий ЕМА перетворювач 1 та приймаючий ЕМА перетворювач 2. Кроки індукторів приймаючого 8 та збуджуючого 7 ЕМА перетворювачів однакові і дорівнюють половині довжини хвилі Релея для вибраної частоти ультразвукових коливань. Блок 3 управління та обробки інформації формує управляючі сигнали для генератора 4. Генератор 4 збуджує в індукторі 7 перетворювача 1 імпульси височастотного струму у вигляді пакету з заданою кількістю періодів заповнення вибраної частоти. В поверхневому шарі зразка збуджуються поверхневі коливання, які розповсюджуються в напрямку перетворювача 2. Перетворювач 2 приймає імпульси хвиль Релея. Після підсилення в блоці 5 прийняті імпульси оброблюються в блоці 3. Блок 3 з допомогою генератора 4 регулює частоту струму живлення індуктора 7 так, щоб на виході приймаючого перетворювача 2 з індуктором 8 амплітуда прийнятого сигналу була максимальною. При встановленій частоті половина довжини хвилі Релея буде відповідати кроку індукторів 1 та 2. Знайдене значення частоти співставляється з твердістю досліджуемого зразка. Процес калібрування повторюється на зразках з іншим значенням твердості контролюемого матеріалу. З результатами калібрування будується відповідна залежність, яка запам'ятовується в блоці 3.

Після калібрування виконується контроль ОК за аналогічною методикою. Знайдене значення частоти при максимальному значенні амплітуди прийнятого сигналу співставляється з залежністю, визначеною при калібруванні. Очевидно, що при такій методиці вимірювання на результати контролю не будуть впливати точність встановлення l та змін температури ОК.

Таким чином використання розробленого способу дозволяє підвищити точність контролю

перетворювача; a – крок перетворювачів (відстань між сусідніми провідниками ЕМА перетворювачів), яка дорівнює встановленій при калібруванні половині довжини хвилі Релея; l – відстань від збуджуючого до приймаючого перетворювача.

твердості поверхневих шарів металовиробів.

Розширити можливості вищенаведеного методу контролю твердості поверхневих шарів виробів можливо шляхом створення вдосконаленого методу ультразвукового контролю твердості поверхневих шарів металу протяжного виробу хвилями Релея, нове виконання якого дозволило б забезпечити підвищення продуктивності при високій точності і локальності контролю.

Для вирішення поставленої задачі методом [4], який включає калібрування контрольного приладу шляхом зондування зразка з відомою твердістю металу ультразвуковими імпульсами хвиль Релея, збудження в поверхневому шарі металу виробу імпульсів ультразвукових поверхневих коливань вздовж поверхні виробу, сканування поверхні виробу, реєстрацію імпульсів, які пройшли ділянку поверхні виробу та визначення твердості металу виробу за результатами аналізу часу розповсюдження ультразвукових імпульсів на ділянці виробу, при цьому збудження ультразвукових імпульсів проводять одним збуджуючим перетворювачем, а приймання імпульсів, які пройшли вздовж поверхні виробу, виконують n приймальними перетворювачами, розташованими послідовно на одній лінії в напрямку розповсюдження ультразвукових імпульсів від збуджуючого перетворювача, що встановлені на відстані l один від одного, при цьому перший, ближчий до збуджуючого перетворювача, приймаючий перетворювач розташовується на відстані l_1 , яка визначається за формулою

$$l_1 = (1, 2, \dots, 1, 5) \cdot C_r \cdot t_1,$$

де C_r – швидкість розповсюдження хвиль Релея, мм/мкс;

t_1 – загальний час дії зондуемого імпульсу та перехідних процесів в збуджуючому перетворювачі та елементах контрольного приладу, мкс,

l – відстань між сусідніми приймаючими перетворювачами встановлюють однаковою, її величина визначається за виразом

$$l > C_r \cdot t,$$

де C_r – швидкість розповсюдження хвиль Релея, мм/мкс;

t – тривалість імпульсу прийнятих хвиль Релея, мкс.

Значення величини l встановлюють при калібруванні контрольного приладу на зразку з відомою твердістю металу шляхом переміщення приймаючих перетворювачів таким чином, щоб різниця часу реєстрації кожного наступного прийнятого імпульсу була однаковою для моменту перетину величини амплітуди прийнятих імпульсів

через нульове значення, встановлюють контрольний прилад на об'єкт контролю і реєструють новий час перетину величини амплітуди прийнятих імпульсів через нульове значення для кожної пари приймаючих перетворювачів, а оцінку твердості металу ділянки виробу виконують по різниці часу, визначеної для кожної пари приймаючих перетворювачів відносно величини, отриманої на зразку з відомою твердістю металу, зміщують контрольний прилад вздовж виробу і повторюють процедуру контролю. Схема реалізації розробленого способу наведена на рис. 4.

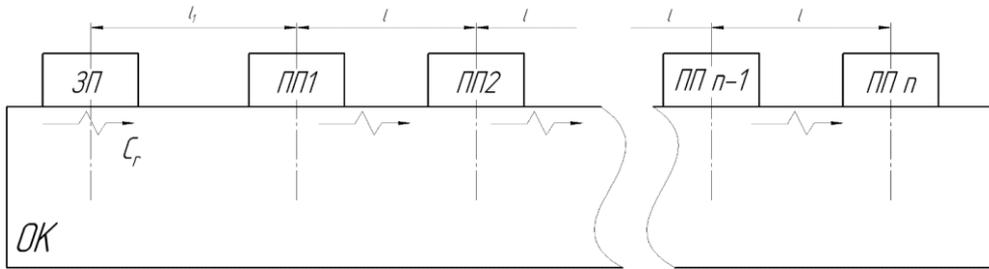


Рис. 4 – Схема розміщення ультразвукових перетворювачів для реалізації способу ультразвукового контролю твердості металу протяжного виробу імпульсами хвиль Релея

На рис. 4 позначені: ЗП – збуджувач перетворювач; ПП1 ... ППn – приймаючі перетворювачі; C_r – хвиля Релея; ОК – об'єкт

контролю; l_1 – відстань від ЗП до ПП1; l – відстань між двома сусідніми приймаючими перетворювачами.

Часові параметри реалізації розробленого методу наведені на рис. 5.

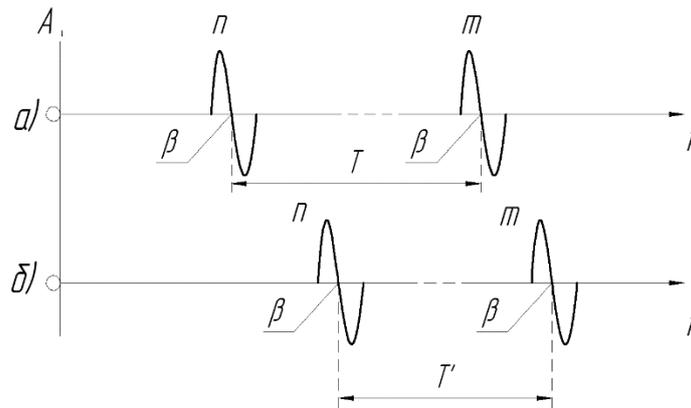


Рис. 5 – Часові розгортки з прийнятими n -тим і m -тим імпульсами хвиль Релея для зразка з відомою твердістю металу та з контрольованої ділянки поверхні виробу: а – для контрольного зразка; б – для контрольованого зразка

На рис. 5 позначені: а – часова розгортка з n -тим і m -тим імпульсами хвиль Релея для зразка з відомою твердістю металу; б – часова розгортка з n -тим і m -тим імпульсами хвиль Релея для металу поверхні контрольованого ОК; A – амплітуда прийнятих імпульсів; T – різниця часу між прийнятими n -тим і m -тим імпульсами для зразка з відомою твердістю металу; T' – різниця часу між прийнятими n -тим і m -тим імпульсами для металу поверхні контрольованого ОК B – точки переходу амплітуд прийнятих імпульсів через нуль.

Даний метод [5] реалізується наступним чином. Перед початком контролю проводять калібрування контрольного приладу. Для цього на поверхню зразка з відомою твердістю металу встановлюють ЗП та ПП1... ППn, які розташовують послідовно на одній лінії в напрямку розповсюдження ультразвукових

імпульсів від ЗП. ПП1 фіксують від ЗП на відстані, що визначена за формулою

$$l_1 = (1,2...1,5) \cdot C_r \cdot t_1,$$

де C_r – швидкість розповсюдження хвиль Релея, мм/мкс;

t_1 – загальний час дії зондуючого імпульсу та перехідних процесів в збуджувачі та елементах контрольного приладу, мкс.

При цьому прийнятий ПП1 імпульс повинен відокремлюватися в часі від зондуючого імпульсу. Далі ПП1 ... ППn розташовують так, щоб між сусідніми приймаючими перетворювачами відстань l була однаковою. Її величина визначається за виразом

$$l > C_r \cdot t,$$

де C_r – швидкість розповсюдження хвиль Релея, мм/мкс;

t – тривалість імпульсу прийнятих хвиль Релея, мкс.

При цьому сусідні імпульси (рис. 3а) n і m повинні відокремлюватися один від одного і різниця часу T , яка визначається за точками B перетину амплітуди A прийнятих імпульсів через нульове значення також повинна бути однаковою для двох сусідніх приймаючих перетворювачів. По завершенню процедури калібрування всі перетворювачі ЗП та ППІ ... ППл фіксуються.

Відкалібрований контрольний пристрій встановлюється на ОК і реєструють новий час T' перетину величини амплітуди прийнятих імпульсів через нульове значення B (рис. 3б) для кожної пари приймаючих перетворювачів ППІ ... ППл. Час перетину T' , для визначення локальної твердості поверхні виробу, визначається для кожного сусіднього приймаючого перетворювача, наприклад між ППЗ і ПП4. Вираховують різницю $T' - T$ за значенням якої визначають локальну твердість. Для визначення інтегральної твердості вираховують різницю часу $T' - T$ прийому імпульсів хвиль Релея для двох довільних перетворювачів, наприклад для ППІ і ППл. Аналогічні операції контролю виконують при скануванні поверхні ОК відкаліброваним приладом контролю твердості.

Висновок. Таким чином використання розробленого способу дозволяє підвищити продуктивність контролю при його високій точності і локальності.

Список літератури

1. Revankar, G. (2003). "Introduction to hardness testing." Mechanical testing and evaluation, ASM Online Vol. 8.
2. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. *Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т.* Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: *Ультразвуковой контроль*. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
3. Плеснецов С.Ю., Сучков Г.М., Корж А.И., Суворова М.Д. *Новые*

теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования. (Обзор). Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. №2. С. 24–31.

4. Плеснецов С.Ю., Сучков Г.М., Корж А.И., Суворова М.Д. *Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования. (Обзор).* Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2018. №2. С. 24-31.
5. Плеснецов С.Ю., Сучков Г.М., Сергієнко Д.Ю. Патент №121134. *Спосіб ультразвукового контролю твердості металовиробу.* Опубл. 27.11.2017, Бюл. №22.
6. Плеснецов С.Ю., Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Юданова Н.М. *Спосіб ультразвукового контролю твердості металу протяжного виробу хвилями Релея.* Патент на корисну модель № 116249, G01N29/04. № u 2016 12507; заяв. 08.12.2016; надрук. 10.05.2017, Бюл. № 9/2017.

References (transliterated)

1. Revankar, G. (2003). "Introduction to hardness testing." Mechanical testing and evaluation, ASM Online Vol. 8.
2. Y.N. Ermolov, Ju.V. Langhe. *Nerazrushajushhyj kontrolj: Spravochnyk: V 7 t.* [Nondestructive testing: Handbok. In 7 volumes] Ed. V.V. Kljuev. T.3: *Ul'trazvukovoj kontrolj* [Volume 3. Ultrasonic testing] /. Moscow: Mashynostroenye, 2004. 864 p.
3. Plesnecov S.Ju., Suchkov Gh.M., Korzh A.Y., Suvorova M.D. *Novye teoreticheskye yssledovanyja y razrabotky v oblasti elektromagnitno-akustyčeskogho preobrazovanyja. (Obzor)* [New theoretical research in the area of electromagnetic-acoustic transduction (Review)]. Tekhnicheskaja dyaghnostyka y nerazrushajushhyj kontrolj. 2018. No 2. P. 24–31.
4. Plesnecov S.Yu., Suchkov H.M., Serhiienko D.Yu. Patent №121134. *Sposib ultrazvukovoho kontroliu tverdosti metalovyrobu* [Method for ultrasonic teting of metal product hardness]. Publ. 27.11.2017, Bull. No 22.
5. Plesnecov S.Yu., Myhushchenko R.P., Suchkov H.M., Yudanova N.M. *Sposib ultrazvukovoho kontroliu tverdosti metalu protiazhnogo vyrobu khvyliamy Releia* [Rayleigh wave extended metal product ultrasonic hardness testing method]. Patent for a useful model No 116249, G01N29/04. № u201612507; request. 08.12.2016; printed. 10.05.2017, Bull. № 9/2017.

Надійшла (received) 25.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плеснецов Сергій Юрійович (Плеснецов Сергей Юрьевич, Plesnetsov Sergey Yurievich) – кандидат технічних наук, докторант каф. КРСКД, НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com

УДК 621.771

*Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ, Г. М. СУЧКОВ***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПОДГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА КАЧЕСТВО ПЕРФОРИРОВАННЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ**

Применение гнутых перфорированных профилей в различных отраслях промышленности позволяет снизить расход металла на 18–20%, ускорить сборку и монтаж конструкций, устранить сварочные работы при монтаже, уменьшить трудоемкость монтажных работ. Результаты проведенных исследований показали, что с увеличением толщины подгибаемых полок величина деформирования отверстий возрастает. Так, при толщине полок 2 мм относительное удлинение отверстий составляло 0,07%, сужение – 0,21%, при толщине металла 5 мм деформирование отверстий составляло 0,8% и 0,63%, соответственно. Искажение формы отверстий увеличивается с возрастанием углов подгибки, толщины металла, уменьшением ширины подгибаемых полок и величины перемычки между отверстиями. Величина отклонения в размерах отверстий по сравнению с исходными составляет 0,07–1,08% у угловых профилей и 0,07–3,20% у швеллерных. В случае необходимости получения в гнутых профилях отверстий с высокой степенью точности их следует делать не в исходных заготовках, а в готовых профилях. Зона заметной деформации зерен распространялась от кромок отверстий на глубину 0,3–0,4 мм на заготовках всех исследуемых толщин. Измерение микротвердости в зоне пробитых отверстий показало, что на заготовках всех исследуемых толщин микротвердость на кромках отверстий значительно выше микротвердости исходного металла. При удалении от кромки отверстий всех перфорированных заготовок микротвердость уменьшается и на расстоянии 0,7–0,9 мм от кромки отверстий достигает значений, соответствующих микротвердости исходного металла.

Ключевые слова: профиль гнутый, перфорированный, отверстия, отклонения размеров, упрочнение металла.

*Ю. О. ПЛЕСНЕЦОВ, Г. М. СУЧКОВ***ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛУ ЕЛЕМЕНТІВ, ЩО ПІДГІНАЮТЬСЯ НА ЯКІСТЬ ПЕРФОРОВАНИХ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ**

Застосування гнутих перфорованих профілів в різних галузях промисловості дозволяє знизити витрати металу на 18–20%, прискорити складання і монтаж конструкцій, усунути зварювальні роботи при монтажі, зменшити трудомісткість монтажних робіт. Результати проведених досліджень показали, що зі збільшенням товщини полиць, що підгинаються, величина деформування отворів зростає. Так, при товщині полиць 2 мм відносне подовження отворів становило 0,07%, звуження – 0,21%, при товщині металу 5 мм деформування отворів становило 0,8% і 0,63%, відповідно. Деформування форми отворів збільшується зі зростанням кутів подгінання, товщини металу, зменшенням ширини полиць, що підгинаються, і величини перемички між отворами. Величина відхилення в розмірах отворів, в порівнянні з вихідними, становить 0,07–1,08% у кутових профілів і 0,07–3,20% у швелерних. У разі необхідності отримання в гнутих профілях отворів з високим ступенем точності їх слід робити не в вихідних заготовках, а в готових профілях. Зона помітної деформації зерен поширюється від крайок отворів на глибину 0,3–0,4 мм на заготовках усіх досліджуваних товщин. Вимірювання микротвердості в зоні пробитих отворів показало, що на заготовках усіх досліджуваних товщин микротвердість на крайках отворів значно вище микротвердості вихідного металу. При віддаленні від кромки отворів всіх перфорованих заготовок микротвердість зменшується і на відстані 0,7–0,9 мм від кромки отворів досягає значень, що відповідають микротвердості вихідного металу.

Ключові слова: профіль гнутий, перфорований, отвори, відхилення розмірів, зміцнення металу.

*YU. A. PLESNETSOV, G. M. SUCHKOV***RESEARCH OF THE EFFECT OF A DEFORMED STATE OF A METAL OF FLEXIBLE ELEMENTS ON THE QUALITY OF PERFORATED BORN PROFILES**

The use of bent perforated profiles in various industries reduces the metal consumption by 18–20%, speeds up the assembly and installation of structures, eliminates welding work during installation, and reduces the labor intensity of installation work. The results of the studies showed that with an increase in the thickness of the bent shelves, the amount of deformation of the holes increases. Thus, with a shelf thickness of 2 mm, the relative elongation of the holes was 0.07%, the narrowing was 0.21%, and with a metal thickness of 5 mm, the deformation of the holes was 0.8% and 0.63%, respectively. The distortion of the shape of the holes increases with increasing bending angles, metal thickness, decreasing the width of the bend shelves and the size of the bridge between the holes. The deviation in the size of the holes compared to the original is 0.07–1.08% for corner profiles and 0.07–3.20% for channel bars. If it is necessary to obtain holes in bent profiles with a high degree of accuracy, they should be made not in the original blanks, but in the finished profiles. The zone of noticeable deformation of the grains spread from the edges of the holes to a depth of 0.3–0.4 mm on blanks of all thickness studied. Measurement of microhardness in the area of punched holes showed that the microhardness on the edges of the holes on the blanks of all investigated thicknesses is much higher than the microhardness of the original metal. With distance from the edge of the holes of all perforated blanks, the microhardness decreases and, at a distance of 0.7–0.9 mm from the edge of the holes, reaches values corresponding to the microhardness of the original metal.

Keywords: bent, perforated profile, holes, dimensional deviations, metal hardening.

Введение. Применение гнутых перфорированных профилей в различных отраслях промышленности позволяет снизить расход металла на 18–20%, ускорить сборку и монтаж конструкций, устранить сварочные работы при монтаже, уменьшить трудоемкость монтажных работ [1–15]. Сборка металлоконструкций из перфорированных профилей – это современная и рациональная система строительства. К гнутым перфорированным профилям относят профили, в которых имеются отверстия различной формы и размеров, нанесенные по всей длине профиля с определенным шагом (модулем) перфорации. Перфорированные профили, в

зависимости от их применения, подразделяются на две большие группы: профили для сборно-разборных конструкций; профили специального назначения. К первой группе относят перфорированные уголки и швеллеры, болтовое соединение которых в различных комбинациях позволяет получать металлоконструкции всевозможных видов и назначений. Важнейшими преимуществами перфорированных профилей этой группы являются их легкость, возможность быстрого монтажа без применения сварки, многократность использования одних и тех же профилей в сборно-разборных конструкциях различного назначения и др. Эти профили, являющиеся универсальным

строительным материалом, называют профилями быстрой сборки. Ко второй группе относят профили специальной формы, которые находят применение только в определенных конструкциях.

Актуальность выполненных исследований определяется отсутствием в Украине промышленного производства гнутых перфорированных профилей, а также значительной потребностью в этом виде металлопродукции различных отраслей экономики (свыше 100 тыс. т).

Цель работы – исследование формоизменения отверстий на элементах гнутых перфорированных профилей при их профилировании.

Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Проанализирована актуальность организации производства перфорированных профилей в Украине.

2. Выполнены исследования по влиянию отверстий на элементах профилей на пружинение полок и радиусы закруглений перфорированных профилей.

3. Выполнен анализ формы и размеров отверстий на перфорированных профилях.

4. Проведены исследования по влиянию на деформирование отверстий, расположенных на стенках профилей, условий расположения кромок отверстий от места изгиба.

5. Проведены исследования по влиянию на деформирование отверстий толщины и ширины подгибаемых полок, углов подгибки и величины перемены между отверстиями.

Основные методы исследования. При перфорации заготовок в результате пластической деформации металла у кромок пробитых отверстий происходит значительный наклеп металла. Для определения глубины наклепанного слоя исследовали микроструктуру металла в зоне пробитых отверстий и измеряли микротвердость металла. Для этого из перфорированных заготовок, а также из готовых профилей (уголков и швеллеров) вырезали образцы. Микроструктуру металла исследовали по сечению образцов (см. рис. 1). Микротвердость измеряли по длине образцов.

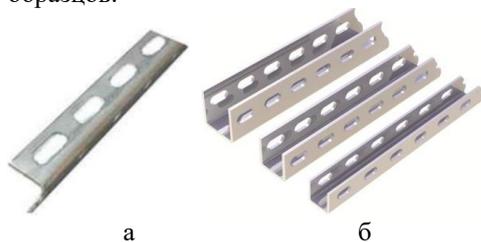


Рис.1 – Перфорированные профили: а – уголки; б – швеллеры

Основные результаты исследований.

Влияния перфорации на механические свойства перфорированных заготовок. Проведенные исследования показали, что для всех толщин заготовок пробивка отверстий вызывает значительный наклеп металла. Степень деформации металла на кромках отверстий значительна, зерна настолько вытянуты вдоль действующей силы, что границы их почти незаметны. По мере удаления от кромки деформация металла уменьшалась, зерна оставались значительно вытянутыми, но их границы уже обозначились. Зона

заметной деформации зерен распространялась от кромок отверстий на глубину 0,3–0,4 мм на заготовках всех исследуемых толщин. Однако степень деформации металла на кромках отверстий различна на заготовках разной толщины – на кромках отверстий заготовки толщиной 4,0 мм зерна деформированы значительно больше, чем на заготовке толщиной 2,5 мм. Измерение микротвердости в зоне пробитых отверстий показало, что на заготовках всех исследуемых толщин микротвердость на кромках отверстий значительно выше микротвердости исходного металла. При удалении от кромки отверстий всех перфорированных заготовок микротвердость уменьшается и на расстоянии 0,7–0,9 мм от кромки отверстий достигает значений, соответствующих микротвердости исходного металла. Причем, максимальное уменьшение микротвердости происходит вблизи кромки на участке, удаленном от отверстия не более чем на 0,3 мм.

Влияния деформаций при пробивке отверстий на механические свойства перфорированных профилей. Для исследования влияния процесса профилирования на наклеп металла, возникающий при перфорации заготовок, изучали микроструктуру и измеряли микротвердость в зоне отверстий перфорированных профилей. В зоне отверстий перфорированных заготовок деформация металла значительна, по мере удаления от кромок отверстий деформация металла уменьшалась. Зона заметной деформации зерен металла распространялась от кромок отверстия на глубину 0,35–0,4 мм. Характер изменения микротвердости при удалении от отверстий на профилях такой же, как и на перфорированных заготовках (при удалении от отверстий микротвердость уменьшалась и достигала микротвердости исходного металла на расстоянии 0,5–0,8 мм). Наибольшая микротвердость наблюдалась на кромках отверстий, причем в профилях толщиной 3–4 мм, так же, как и в заготовках, упрочнение металла несколько больше, чем в профилях толщиной 2 мм. Таким образом, глубина наклепанного слоя на кромках отверстий готовых профилей осталась без изменения по сравнению с перфорированными заготовками.

Влияние толщины исходных заготовок. Известно, что с увеличением толщины профилируемых полос растягивающие деформации на кромках полос также увеличиваются. Это объясняется тем, что при большой толщине поперечная жесткость полосы возрастает, и, для перехода ее кромки из горизонтального положения в наклонное, необходимо прилагать большие усилия. С увеличением деформации продольных кромок претерпевают изменения и прилегающие к ним слои металла. Поэтому можно ожидать, что отверстия, имеющиеся в полках профилей различной толщины, будут деформироваться по-разному. Для исследования влияния толщины заготовки на величину изменения размеров отверстий профилировали уголки 45x45 мм с толщиной стенки 2 мм, 3 мм, 4 мм и 5 мм. Результаты проведенных исследований показали, что с увеличением толщины подгибаемых полок величина деформирования отверстий возрастает. Минимальному деформированию подвергались

отверстия в полках уголков толщиной 2 мм, максимальному – толщиной 5 мм. Так, при толщине полок 2 мм относительное удлинение отверстий составляло 0,07%, сужение – 0,21%. При толщине металла 5 мм деформирование отверстий возросло в несколько раз и составляло 0,8% и 0,63%, соответственно.

Влияние ширины подгибаемых элементов.

Ширина подгибаемых элементов профиля оказывает существенное влияние на величину продольной деформации кромок. Исследованиями установлено, что у швеллеров с различной шириной полок наибольшая продольная деформация наблюдалась на кромках тех швеллеров, которые имеют минимальные ширины. С увеличением ширины подгибаемых полок величина продольной деформации кромок уменьшается. Для определения влияния ширины подгибаемых полок на величину формоизменения отверстий профилировали разнобокие уголки с шириной полок 45 мм, 60 мм и 80 мм. Обработки результатов измерений отверстий до и после профилирования показала, что наибольшему деформированию подвергались отверстия, расположенные на полках шириной 45 мм, наименьшему – на полках уголков с шириной полок 80 мм (рис. 2).

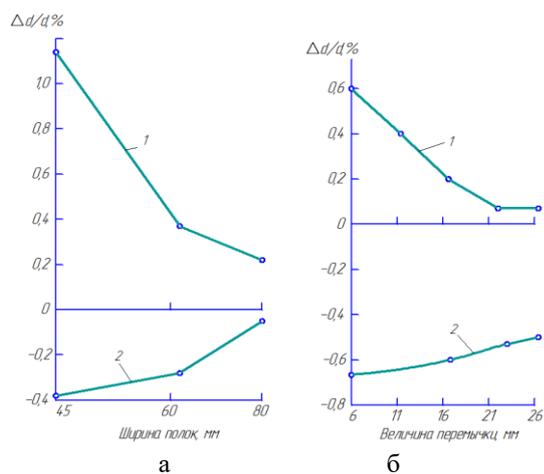


Рис. 2 – Относительное изменение размера отверстий $\frac{\Delta d}{d}$ в процессе профилирования: 1 – растяжение; 2 – сужение; в зависимости от: а – ширины подгибаемых полок; б – величины перемычки между отверстиями

Так, относительное удлинение отверстий на полках шириной 45 мм составляло 1,08%, сужение – 0,38%. На полках шириной 80 мм эти величины составляли 0,22% и 0,05%, соответственно. Увеличение в несколько раз деформирования отверстий на уголках с шириной полок 45 мм по сравнению с деформированием отверстия на полках с уголка с шириной 80 мм является результатом увеличения продольной деформации кромок и прилегающих к ним слоев в процессе профилирования, т.е. наблюдается полное совпадение деформирования

отверстий с общей деформацией металла подгибаемых элементов.

Формоизменение полосы и деформированное состояние металла при профилировании. Ввиду недостаточной изученности процесса профилирования перфорированных полос проведены экспериментальные исследования очага деформации при профилировании. Для определения формы и размеров формуемой полосы (без снятия упругой деформации после ее извлечения из валков) был применен метод слепков. Профилируемую полосу затормаживали в валках стана. Затем определяли и фиксировали положение полосы относительно валков. Замеры слепков полос перфорированного и неперфорированного уголка 45x45x2 мм показали, что плоские подгибаемые элементы профиля (полки) в процессе формоизменения сохраняют прямолинейность в поперечных сечениях. На рис. 3 приведены графики изменения углов подгибки вдоль полосы при профилировании перфорированных и неперфорированных уголков 45x45x2 мм. Полосы затормаживали в момент установившегося процесса формовки в валках (очаг деформации при этом приобретал постоянную форму и граничил с уже отформованными участками полосы). Из анализа положения очагов деформации формуемой полосы относительно валков следует, что их осевые плоскости проходили внутри очагов деформации. Это объясняется влиянием формуемого в валках металла полосы на формоизменение смежных участков профиля. Формоизменению при этом подвергаются, как участок полосы, не вошедший в контакт с валками, так и участок, вышедший из контактной зоны. Как следует из графиков (рис. 3), при профилировании перфорированных и неперфорированных уголков протяженность участков очага деформации при формовке перфорированных и неперфорированных уголков составляла примерно 240 мм, то есть величина очага деформации не менялась. Изменение углов подгибки вдоль очага деформации происходило неравномерно – до осевой плоскости валков более интенсивно, чем после осевой плоскости.

Таким образом, полученные экспериментальные данные подтверждают, что очаг деформации распространяется не на все межклетьеовое расстояние, а имеет длину меньшую, чем межклетьеовое расстояние. Следует при этом отметить, что наличие перфорации в полосах способствует увеличению углов подгибки полок, о чем свидетельствуют графики, приведенные на рис. 3. Исследование деформации металла при профилировании производили с помощью делительных сеток, наносимых на поверхность заготовок. Характер и величину конечного пластического деформирования устанавливали по изменениям размеров деформированной сетки. Измерение расстояний между рисками сетки производили на вырезанных из полосы темплетях шириной 20 мм (рис. 4).

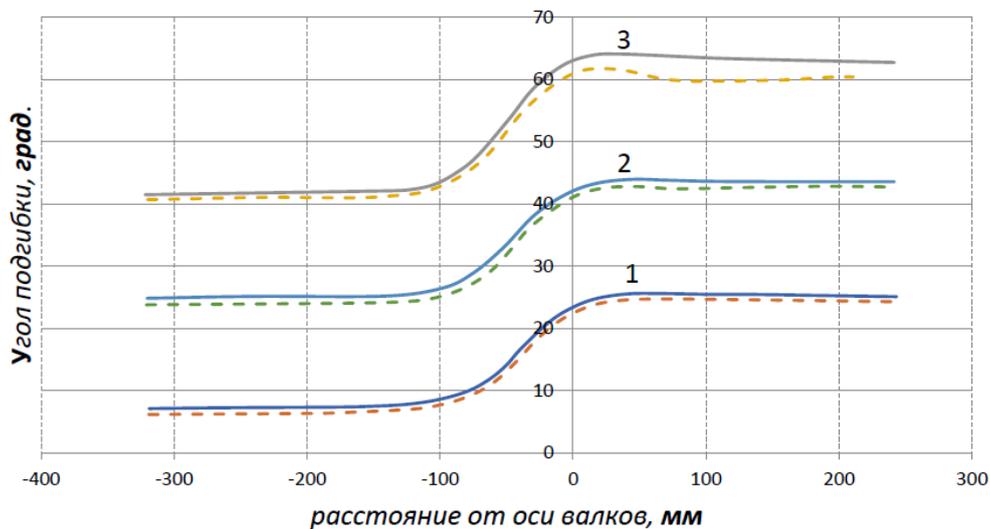


Рис. 3 – Изменение углов подгибки вдоль полосы в очагах деформации при формовке уголков 45x45x2 мм из перфорированной (сплошная линия) и неперфорированной (штриховая) полосы: 1 - в третьей клетке; 2 – в четвертой клетке; 3 – в пятой клетке

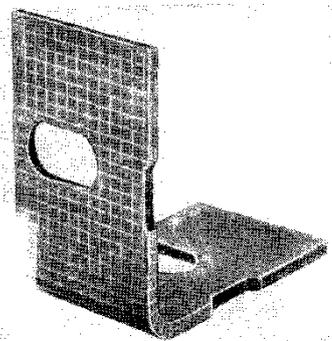


Рис. 4 – Темплет, вырезанный из готового профиля, для определения деформации металла

Относительную деформацию металла определяли по формуле:

$$\delta = \frac{a_1 - a}{a} \cdot 100,$$

где a_1 и a – расстояние между рисками до и после деформации, соответственно, мм.

Относительное утонение ΔS определяли по формуле:

$$\Delta S = \frac{s - s_0}{s} \cdot 100,$$

где S и S_0 – толщины профилированной и исходной полосы, соответственно, мм.

На рис. 5 представлена диаграмма распределения утонения, построенная относительно контура профиля. Как следует из графика, утонение металла происходит в местах изгиба и распространяется на смежные плоские элементы профиля. Толщина полки на большей части остается постоянной. Распределение утонения по ширине участка изгиба неравномерно. Максимальное утонение ($\Delta S_{\max}=6\%$) имеет место на середине участка изгиба и по мере удаления от него уменьшается. Утонение в местах сопряжения полки профиля с участком изгиба составляет примерно 2,5%. Утонение распространяется на 3–5 мм на прямолинейные элементы профиля. На рис. 5 приведен график относительной деформации крайних волокон металла по наружной поверхности уголка. На наружной поверхности профиля металл растянут. Максимальная деформация растяжения волокон (40%) наблюдалась на середине участка изгиба.

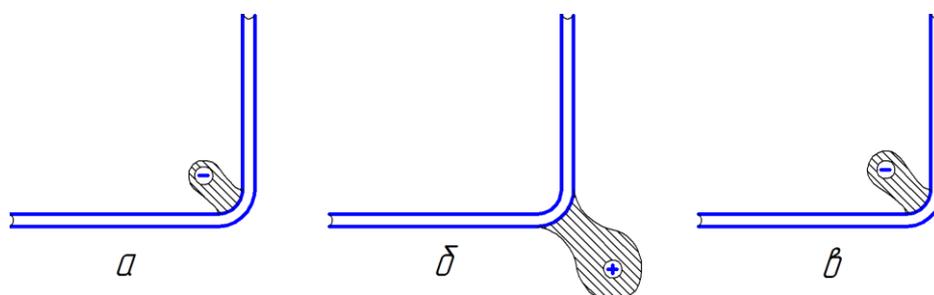


Рис. 5 – Диаграммы распределения: а – относительного утонения полосы; б – деформации в поперечном направлении по наружному контуру сечения готового профиля; в – деформации в поперечном направлении по внутреннему контуру сечения готового профиля

Распределение деформаций по ширине контура неравномерно и по своему характеру аналогично распределению утонения. На большей части ширины, а также в местах перфорации деформация по

(наружному контуру сечения) не наблюдалась. Из анализа характера деформации на внутренней поверхности профиля следует, что в поперечном направлении металл полосы сжат. Максимальная

деформация сжатия (30%) наблюдалась на середине участка изгиба. Распределение деформации по ширине контура по своему характеру аналогично распределению утонения и деформации растяжения волокон на внешней поверхности профиля. На большей части ширины полки деформация по внутреннему контуру сечения не наблюдалась. В местах сопряжения участка изгиба с полкой поперечная деформация сжатия составляла 5–7%. Деформация распространялась на прямолинейные элементы профиля примерно на 3–5 мм по ширине от мест сопряжения. В местах сопряжения участка изгиба с плоскими элементами профиля деформация растяжения составляла 3–5%. Деформация распространялась на прямолинейные элементы профиля примерно на 3–5 мм по ширине от места сопряжения. Следовательно, наиболее деформированными в поперечном направлении участками профиля являются места изгиба. Максимальная величина деформации растяжения на наружной поверхности профиля больше деформации сжатия на внутренней поверхности в 1,3 раза.

Выводы

1. Результаты проведенных исследований показали, что с увеличением толщины подгибаемых полок величина деформирования отверстий возрастает. Так, при толщине полок 2 мм относительное удлинение отверстий составляло 0,07%, сужение – 0,21%, при толщине металла 5 мм деформирование отверстий составляло 0,8% и 0,63%, соответственно.

2. Отклонения в размерах отверстий увеличиваются с возрастанием углов подгибки, толщины металла, уменьшением ширины подгибаемых полок и величины перемычки между отверстиями. Величина отклонения в размерах отверстий по сравнению с исходными составляет 0,07–1,08% у уголкового профиля и 0,07–3,20% у швеллерных.

3. В случае необходимости получения в гнутых профилях отверстий с высокой степенью точности их следует делать не в исходных заготовках, а в готовых профилях.

Список литературы

1. Flos. A. Simulation technologisch bedingter verformungsablaute der Blechumforming auf der Barisder Flietheorie // Mitt. Inst.Mech. Ruhr Univ, Bochum. – 1994. – No 3. – P. 135–138.
2. Raftoyiannis I.G. Deflection of Castellated beams under Transverse Loading / I.G. Raftoyiannis, G.I. Ioannidis // Steel Structures – 2006 – No 6. – P. 31–36.
3. Redwood R. Castellated Beam Web Buckling in Shear / R. Redwood, S. Demirdjian // Journal of Structural Engineering. – 1998. – vol. 124 – No 10. – P. 1202–1207.
4. Tsavdaridis K.D. Experimental and computational study of the vertical shear behaviour of partially encased perforated steel beams / K.D. Tsavdaridis, C. D'Mello, B.Y. Huo // Engineering Structures. – 2013. – No 56. – P. 805–822.
5. Tsavdaridis, K.D. Vierendeel bending study of perforated steel beams with various novel web opening shapes through nonlinear finite-element analyses / K.D. Tsavdaridis, C. D'Mello // Journal of Structural Engineerin. – 2012. – No 138 (10). – P. 1214–1230.
6. Tsavdaridis, K.D. Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel opening shapes / K.D. Tsavdaridis, C. D'Mello // Journal of Constructional Steel Research. – 2011. – No 67 (15). – P. 1605–1620.

7. Гайджуров П.П., Кожиков А.Г. Конечно-элементный расчет стальной регулярно перфорированной двутавровой стойки // Строительная механика и расчет сооружений. – 2006. – № 4. – С. 52–57.
8. Кожиков А.Г. Численные и экспериментальные исследования работы внецентренно сжатых перфорированных стоек. // Вестник Волгоград. гос. архитектурно-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. – 2008 – Вып. 10 (29). – С. 19–24.
9. Кожиков А.Г., Бузало Н.А., Гайджуров П.П. Совершенствование технологии изготовления стальных перфорированных стержней // Проблемы и перспективы развития жилищ-комму. комплекса города: 6-я Междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 1-4 апр. 2008 г. – Москва, 2008. – Т.2. – С. 100–102.
10. Пат. 66763 Рос. Федерация, МПК E04C 3/32. Перфорированная двухветвевая стойка / Кожиков А.Г., Бузало Н.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ЮРГТУ(НПИ). – № 2007111327/22; заявл. 27.03.2007; опубл. 27.09.2007, Бюл. №27.
11. Пат. 68551 Рос. Федерация, МПК E04C 2/00. Перфорированная балка с гофрированными вставками / Кожиков А.Г., Бузало Н.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ЮРГТУ(НПИ). – № 2007130208/22; заявл. 06.08.2007; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33.
12. Пат. 70527 Рос. Федерация, МПК E04C 2/00. Перфорированная двухветвевая стойка со вставками / Кожиков А.Г., Бузало Н.А.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ЮРГТУ(НПИ). – № 2007130232/22; заявл. 06.08.2007; опубл. 27.01.2008, Бюл. № 3.
13. Пат. 70911 Рос. Федерация, МПК E04C 3/08. Перфорированная двухветвевая стойка с гофрированными вставками / Кожиков А.Г., Бузало Н.А., Гайджуров П.П.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ЮРГТУ(НПИ). – № 2007130643/22; заявл. 10.08.2007; опубл. 20.02.2008, Бюл. № 5.
14. Притыкин А.И. Технология изготовления одноявно и многоявно перфорированных балок / А.И. Притыкин // Вестник МГСУ. – 2009. – № 2 – С. 22–26.
15. Рекомендации по проектированию и применению балок с перфорированной стенкой / ЦНИИПроектстальконструкция. – Москва, 1991. – 76 с.

References (transliterated)

1. Flos. A. Simulation technologisch bedingter verformungsablaute der Blechumforming auf der Barisder Flietheorie // Mitt. Inst.Mech. Ruhr Univ, Bochum. – 1994. – No 3. – P. 135–138.
2. Raftoyiannis I.G. Deflection of Castellated beams under Transverse Loading / I.G. Raftoyiannis, G.I. Ioannidis // Steel Structures – 2006 – No 6. – P. 31–36.
3. Redwood R. Castellated Beam Web Buckling in Shear / R. Redwood, S. Demirdjian // Journal of Structural Engineering. – 1998. – Vol. 124 – No 10. – P. 1202–1207.
4. Tsavdaridis K.D. Experimental and computational study of the vertical shear behaviour of partially encased perforated steel beams / K.D. Tsavdaridis, C. D'Mello, B.Y. Huo // Engineering Structures. – 2013. – No 56. – P. 805–822.
5. Tsavdaridis, K.D. Vierendeel bending study of perforated steel beams with various novel web opening shapes through nonlinear finite-element analyses / K.D. Tsavdaridis, C. D'Mello // Journal of Structural Engineerin. – 2012. – No 138 (10). – P. 1214–1230.
6. Tsavdaridis, K.D. Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel opening shapes / K.D. Tsavdaridis, C. D'Mello // Journal of Constructional Steel Research. – 2011. – No 67 (15). – P. 1605–1620.
7. Gaydzurov P.P., Kozhikhov A.G. Konechno-elementnyy raschet stal'noy regul'yarно perforirovannoy dvutavrovoy stoyki // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. – 2006. – No 4. – P. 52–57.
8. Kozhikhov A.G. Chislennyye i eksperimental'nyye issledovaniya raboty vnetsentrenno szhatykh perforirovannykh stoyek. // Vestnik Volgograd. gos. arkhitekturno-stroit. un-ta. Ser.: Stroitel'stvo i arkhitektura. – 2008 – No. 10 (29). – P. 19–24.
9. Kozhikhov A.G., Buzalo N.A., Gaydzurov P.P. Sovershenstvovaniye tekhnologii izgotovleniya stal'nykh perforirovannykh stержney // Problemy i perspektivy razvitiya zhilishch-kommun. kompleksa goroda: 6-ya Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moscow, 1-4 apr. 2008. – Moscow, 2008. – Vol. 2. – P. 100–102.
10. Pat. 66763 Ros. Federatsiya, MPK E04S 3/32. Perforirovannaya dvukhvetevaya stoyka / Kozhikhov A.G., Buzalo N.A.; zayavitel' i patentoobladatel' GOU VPO YURGTU(NPI). – No 2007111327/22; zayavl. 27.03.2007; opubl. 27.09.2007, Byul. No 27.

11. Pat. 68551 Ros. Federatsiya, MPK E04S 2/00. Perforirovannaya balka s gofirovannymi vstavkami / Kozhikhov A.G., Buzalo N.A.; zayavitel' i patentoobladatel' GOU VPO YURGTU(NPI). – No 2007130208/22; zayavl. 06.08.2007; opubl. 27.11.2007, Byul. №33.
12. Pat. 70527 Ros. Federatsiya, MPK E04S 2/00. Perforirovannaya dvukhvetvevaya stoyka so vstavkami / Kozhikhov A.G., Buzalo N.A.; zayavitel' i patentoobladatel' GOU VPO YURGTU(NPI). – No 2007130232/22; zayavl. 06.08.2007; opubl. 27.01.2008, Byul. №3
13. Pat. 70911 Ros. Federatsiya, MPK E04S 3/08. Perforirovannaya dvukhvetvevaya stoyka s gofirovannymi vstavkami / Kozhikhov A.G., Buzalo N.A., Gaydzhurov P.P.; zayavitel' i patentoobladatel' GOU VPO YURGTU(NPI). – No 2007130643/22; zayavl. 10.08.2007; opubl. 20.02.2008, Byul. No 5.
14. Pritykin A.I. Tekhnologiya izgotovleniya odnoryadno i mnogoryadno perforirovannykh balok / A.I. Pritykin // Vestnik MGSU. – 2009. – No 2 – P. 22-26.
15. Rekomendatsii po proyektirovaniyu i primeneniyu balok s perforirovannoy stenкой / TSNIIProyektstal'konstruktsiya. – Moscow, 1991. – 76 p.

Поступила (received) 25.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плеснецов Юрий Александрович (Плеснецов Юрий Александрович, Plesnetsov Yuriy Aleksandrovich) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри «Обробка металів тиском», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: plesnetsov@gmail.com

Сучков Григорій Михайлович (Сучков Григорий Михайлович, Suchkov Hrigoriy Mihailovich) – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: hpi.suchkov@gmail.com

В. М. ПОЛЕЩУК, В. Л. БРОВКИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ СЛИТКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КАНАЛЕ КРИВОЛИНЕЙНОЙ МНЛЗ

Выполнен анализ известных физических моделей процесса деформации слитка. Показано, что отдельные элементы физических моделей, введенные как допущения и упрощения, противоречат принципиальным положениям теории механики сплошных сред. Известные аналитические методы расчета ключевых параметров машины непрерывного литья заготовок недостаточно совершенны, а эмпирические зависимости также не дают желаемого результата, так как они эффективны только в случае тиражирования объекта конструирования. На базе современных представлений о процессе пластической деформации непрерывного слитка на машине непрерывного литья заготовок разработана физическая модель процесса. Сформулированы базовые положения, характеризующие предлагаемую модель процесса разгиба непрерывнолитого слитка. Основным элементом предлагаемой физической модели является температурный интервал хрупкости. Предложен алгоритм расчета оптимальной траектории технологической оси криволинейной машины непрерывного литья заготовок. Алгоритм включает в себя 3 этапа: 1) теплотехнические расчеты для определения положения низкотемпературной и высокотемпературной границ температурного интервала хрупкости; 2) расчеты положения реперных точек траектории разгиба на поверхности слитка; 3) расчеты радиусов кривизны на границах расчетных участков. При конструировании физической модели учитывались следующие положения: а) режим деформации исключает нарушение сплошности слитка; б) параметры режима деформации должны обеспечивать полное использование ресурса пластичности материала слитка в критических зонах. Предложены конечные расчетные выражения для определения радиуса кривизны слитка в процессе разгиба. В результате расчета определяется кривая разгиба слитка и протяженность технологической оси машины непрерывного литья заготовок. Сформулированы выводы по результатам работы: предложена физическая модель процесса разгиба слитка на криволинейных машинах непрерывного литья заготовок, которая позволяет повысить точность и надежность результатов моделирования; разработан алгоритм расчета оптимальной траектории технологической оси криволинейной машины непрерывного литья заготовок.

Ключевые слова: непрерывное литье, МНЛЗ, слиток, разгиб, физическая модель, деформация, температурный интервал хрупкости.

В. М. ПОЛЕЩУК, В. Л. БРОВКИН

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМАЦІЇ ЗЛИТКА В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ КАНАЛІ КРИВОЛІНІЙНОЇ МНЛЗ

Виконано аналіз відомих фізичних моделей процесу деформації злитка. Показано, що окремі елементи фізичних моделей, введені як допущення і спрощення, суперечать принципам положенням теорії механіки суцільних середовищ. Відомі аналітичні методи розрахунку ключових параметрів машини безперервного лиття заготовок недостатньо досконалі, а емпіричні залежності також не дають бажаного результату, так як вони ефективні тільки в разі тиражування об'єкта конструювання. На базі сучасних уявлень про процес пластичної деформації безперервного злитка на машині безперервного лиття заготовок розроблена фізична модель процесу. Сформульовані базові положення, що характеризують запропоновану модель процесу розгинання безперервнолитого злитка. Основним елементом запропонованої фізичної моделі є температурний інтервал крихкості. Запропонований алгоритм розрахунку оптимальної траєкторії технологічної осі криволинійної машини безперервного лиття заготовок. Алгоритм включає в себе 3 етапи: 1) теплотехнічні розрахунки для визначення положення низькотемпературного та високотемпературного кордонів температурного інтервала крихкості; 2) розрахунки положення реперних точок траєкторії розгинання на поверхні злитка; 3) розрахунки радіусів кривизни на кордонах розрахункових ділянок. При конструюванні фізичної моделі враховувалися наступні положення: а) режим деформації виключає порушення суцільності злитка; б) параметри режиму деформації повинні забезпечувати повне використання ресурсу пластичності матеріалу злитка в критичних зонах. Запропоновані кінцеві розрахункові вирази для визначення радіуса кривизни злитка в процесі розгинання. В результаті розрахунку визначається крива розгинання зливка і протяжність технологічної осі машини безперервного лиття заготовок. Сформульовані висновки за підсумками роботи: запропонована фізична модель процесу розгинання зливка на криволинійних машинах безперервного лиття заготовок, яка дозволяє підвищити точність і надійність результатів моделювання; розроблений алгоритм розрахунку оптимальної траєкторії технологічної осі криволинійної машини безперервного лиття заготовок.

Ключові слова: безперервне лиття, МНЛЗ, злиток, розгин, фізична модель, деформация, температурний інтервал крихкості.

V. M. POLYESHCHUK, V. L. BROVKIN

MODELING THE PROCESS OF DEFORMATION OF THE INGOT IN THE TECHNOLOGICAL CHANNEL OF THE CURVILINEAR CCM

The analysis of known physical models of the ingot deformation process is performed. It is shown that individual elements of physical models, introduced as assumptions and simplifications, contradict the fundamental principles of the theory of continuum mechanics. The well-known analytical methods for calculating the key parameters of the continuous casting machine are not perfect enough, and the empirical dependencies also do not give the desired result, since they are effective only in the case of replication of the construction object. On the basis of modern ideas about the process of plastic deformation of a continuous ingot, a physical model of the process has been developed at the continuous casting machine. Basic provisions are formulated that characterize the proposed model of the process of unbending a continuously cast ingot. The main element of the proposed physical model is the temperature range of fragility. An algorithm is proposed for calculating the optimal trajectory of the technological axis of a curvilinear caster. The algorithm includes 3 stages: 1) heat engineering calculations for determining the position of the low-temperature and high-temperature boundaries of the temperature range of fragility; 2) calculations of the position of the reference points of the bend trajectory on the ingot surface; 3) calculations of the radii of curvature at the boundaries of the calculated areas. When constructing a physical model, the following provisions were taken into account: a) the deformation mode eliminates the discontinuity of the ingot; b) the parameters of the deformation mode should ensure the full utilization of the resource of plasticity of the ingot material in critical zones. Finite design expressions are proposed for determining the ingot radius of curvature during the bending process. As a result of the calculation, the ingot bending curve and the length of the technological caster axis are determined. Conclusions based on the results of the work are formulated: a physical model of the ingot bending process on curvilinear continuous casting machine is proposed, which allows improving the accuracy and reliability of the simulation results; an algorithm has been developed for calculating the optimal trajectory of the technological axis of a curvature caster.

Keywords: continuous casting, continuous casting machine, ingot, unbending, physical model, deformation, temperature range of brittleness.

Введение. Успешные машиностроительные фирмы заинтересованы в поддержании на должном уровне темпов технического прогресса, основа которых новые знания и более совершенные модели процесса. Для криволинейных машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с точки зрения качества готовой продукции и эффективности производства критическими являются криволинейные участки технологической линии, где слиток с незакристаллизовавшейся сердцевинкой подвергается деформации изгиба.

За более чем 40 лет исследования процесса деформации непрерывнолитого слитка в двухфазном состоянии наукой и практикой накоплены многочисленные сведения о природе явлений, сопровождающих процессы изгиба слитка в технологической линии МНЛЗ.

На базе этих сведений были предложены различные физические модели процесса деформации слитка, которые, в разной степени приближения, отражали явления, сопровождающие реальный процесс [1–6]. Параллельно совершенствовались знания, касающиеся параметров и механизмов взаимодействия элементов физических моделей процессов загиба и разгиба непрерывнолитого слитка.

Ранее, в работе [1] были подвергнуты детальному анализу некоторые принципиальные допущения и упрощения, которые использованы в наиболее известных моделях процесса разгиба (загиба) непрерывнолитых слитков в криволинейных МНЛЗ. Было показано, что отдельные элементы физических моделей, введенные как допущения и упрощения, противоречат принципиальным положениям теории механики сплошных сред и, в связи с этим, искажают конечные результаты аналитических исследований. В одних случаях (кусочно–точечные модели) не учтено, что показатель относительной деформации в интерпретации Коши не обладает свойством аддитивности. В других случаях (послойно–линейные модели) суммарный показатель за весь процесс изгиба относительной деформации определяется как сумма деформаций различных материальных частиц, расположенных вдоль линии температурного интервала хрупкости (ТИХ) от начала и до конца процесса деформации слитка, в то время как теория механики сплошных сред разрешает суммирование деформации исследуемой материальной частицы только вдоль ее траектории перемещения в пространстве.

Практика работы конструкторских бюро ведущих машиностроительных фирм СНГ подтверждает, что аналитические методы расчета ключевых параметров МНЛЗ недостаточно совершенны, и могут быть использованы только для интерпретации качественных проявлений технологического процесса [2].

Эмпирические зависимости также не дают желаемого результата, так как они эффективны только в случае тиражирования объекта конструирования.

Таким образом актуальность разработки более совершенных физических моделей и расчетных

методик подтверждается практикой работы конструкторских бюро машиностроительных фирм и результатами анализа публикаций по данной теме.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является создание более совершенной физической модели и расчетных методик процесса деформации непрерывнолитого слитка на криволинейных участках технологической оси МНЛЗ.

Предлагаемая ниже физическая модель процесса разгиба (загиба) позволяет более корректно применять положения теории механики сплошных сред при разработке принципов ее функционирования.

Наличие модели, адекватно отражающей процесс деформации слитка на криволинейной МНЛЗ от кристаллизатора до момента порезки позволяет решить многие практические задачи [7–12], начиная от вопросов повышения производительности МНЛЗ и повышения качества слитка до вопросов рационального размещения (выставки) оборудования технологической линии МНЛЗ.

Физические модели процессов загиба и разгиба во многом идентичны и являются разновидностями одного вида деформации – изгиба. В дальнейшем для сокращения объема статьи рассмотрим построение физической модели деформации слитка только в зоне разгиба криволинейной МНЛЗ, как более сложной задачи.

Прежде всего отметим базовые положения, характеризующие предлагаемую модель процесса разгиба непрерывнолитого слитка.

1. При пластической деформации незакристаллизовавшейся части слитка ее сплошность не нарушается при условии непревышения предельно допустимых значений относительной деформации в критических зонах тела слитка.

2. Критической зоной в незакристаллизовавшейся части стального слитка является зона температурного интервала хрупкости (ТИХ), где способность металла пластически деформироваться минимальна.

3. Критическая зона в незакристаллизовавшейся части тела слитка представляет собой слой, заключенный в пределах изотерм верхней и нижней границ ТИХ.

4. Положение критического слоя в теле слитка определяется, главным образом, теплофизическими свойствами металла и режимом охлаждения слитка.

5. В процессе перемещения слитка по траектории технологической оси МНЛЗ он охлаждается, и зона ТИХ перемещается от его поверхностных слоев к осевой линии.

6. Область существования технологии пластической деформации непрерывнолитого слитка с жидкой сердцевиной ограничивается предельными значениями допустимой величины относительной деформации металла слитка в зоне температурного интервала хрупкости (ТИХ).

7. На участках технологической линии МНЛЗ, где осуществляется непрерывная деформация слитка, величина относительной деформации аккумулируется (суммируется).

8. Величина деформации исследуемой материальной частицы в заданном интервале перемещения слитка по технологической оси МНЛЗ функционально связана с изменением ее радиуса кривизны в этом интервале. Положение материальной частицы в теле слитка однозначно характеризуется расстоянием от нейтральной оси слитка.

9. Для деформации изгиба характерна линейная схема напряженного состояния (сжатие–растяжение). В реальных условиях нарушение сплошности металлических тел при растяжении происходит при более низких величинах деформации, чем при сжатии. Поэтому необходимо и достаточно чтобы физическая модель отражала явления происходящие в зоне действия растягивающих напряжений.

10. Условно принимается, что все закономерности напряженно–деформированного состояния твердого тела сохраняются до изотермы солидус.

На рис. 1 представлено схематическое изображение участка разгиба криволинейной МНЛЗ в зоне действия растягивающих напряжений.

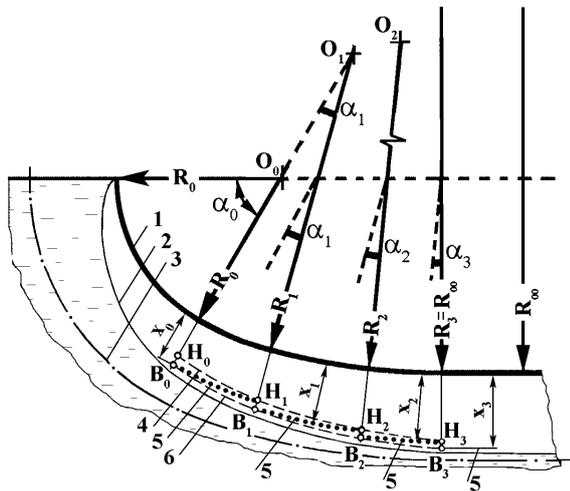


Рис. 1 – Схема участка разгиба криволинейной МНЛЗ: 1 – поверхность слитка; 2 – граница образования твердой корочки; 3 – нейтральная линия; 4 – низкотемпературная изотерма ТИХ (система точек H_i); 5 – линии $x_i = \text{const}$ (между точками B_i и H_{i+1}); 6 – высокотемпературная изотерма ТИХ (система точек B_i); x_i (x_0, x_1, x_2, x_3) – расстояния от поверхности до точек B_i (H_{i+1})

Зона исследуемого процесса разгиба (выпрямления) слитка ограничена слева плоскостью сопряжения радиальной части технологической оси МНЛЗ с криволинейной, а справа плоскостью сопряжения криволинейной траектории с горизонтальной частью слитка.

Основным элементом предлагаемой физической модели является температурный интервал хрупкости (ТИХ). Температурный интервал хрупкости сверху ограничен низкотемпературной изотермой 4, а снизу высокотемпературной изотермой 6. Поверхность слитка (кривая 1) в процессе разгиба изменяет свою кривизну с $\frac{1}{R_0}$ до $\frac{1}{R_i} = 0$.

Положение линии солидус иллюстрирует кривая 2.

Нейтральная линия (кривая 3) расположена в середине высоты слитка и параллельна поверхности слитка.

Введем понятие "расчетный участок". Границами "i"-го участка являются низкотемпературная ($H_{i-1} - H_i$) и высокотемпературная ($B_{i-1} - B_i$) изотермы ТИХ и линии, совпадающие с векторами радиусов реперных точек R_{i-1} и R_i .

Реперная точка физической модели – точка на поверхности непрерывнолитого слитка, лежащая на пересечении линии поверхности слитка и линии радиуса кривизны в конце "i"-го расчетного участка, где исчерпывается ресурс пластичности выбранной материальной частицы.

В пределах первого участка $H_0B_0 - H_1B_1$ все материальные частицы, располагающиеся на входе участка (линия H_0B_0) перемещаются по траекториям, параллельным поверхности слитка, к низкотемпературной границе ТИХ (линия H_0H_1). Из рис. 1 видно что наиболее протяженный путь в пределах зоны ТИХ проходит материальная частица расположенная в точке B_0 . Это означает, что данная частица претерпевает деформацию растяжения по величине большую, чем любая другая частица первого расчетного участка.

Алгоритм решения задачи. Расчетная процедура включает в себя 3 этапа:

- теплотехнические расчеты для определения положения низко– и высокотемпературной границ ТИХ;
- расчеты положения реперных точек траектории разгиба на поверхности слитка;
- расчеты радиусов кривизны на границах расчетных участков.

Основываясь на сформулированных принципах построения физической модели перейдем к последовательным расчетным операциям при определении оптимального режима деформации слитка в процессе его выпрямления.

Ключевым исходным параметром для вычисления протяженности расчетного участка является максимальная продолжительность остывания закристаллизовавшегося металла в пределах слоя ТИХ. Существует несколько методик его расчета, не останавливаясь на которых примем, что эта величина известна $\tau_{\text{охл}}^{\text{ТИХ}}$.

По известным методикам рассчитываем также положение границ слоя ТИХ в плоскости сопряжения радиальной и криволинейной зон МНЛЗ.

Пример инженерного расчета траектории разгиба слитка для условий, проектируемых и существующих криволинейных МНЛЗ, основанный на предложенной методике, будет представлен в последующих публикациях.

В общем случае протяженность исследуемого слоя слитка, изогнутого по технологической оси криволинейной зоны МНЛЗ может быть определена так

$$l = \frac{v_{\text{разл}} \cdot \tau}{1 \pm \varepsilon}, \quad (1)$$

где $v_{\text{разл}}$ – скорость разливки на МНЛЗ, м/с;

τ – длительность исследуемого процесса, с;

ε – относительная деформация накопленная за исследуемый период времени.

Для нейтрального слоя деформируемого слитка, где относительная деформация $\varepsilon = 0$, длина расчетного участка будет

$$l_i^{\text{нейтр}} = v_{\text{разл}} \cdot \tau_{\text{охл},i}^{\text{тих}}. \quad (2)$$

Полагая, что центр кривизны в конце 1-го участка расположен на продолжении линии начального радиуса кривизны R_0 и R_1 угол сектора 1-го участка определится по формуле

$$\alpha_1 = \frac{l_1^{\text{нейтр}}}{R_1 + h}, \quad (3)$$

где h – половина толщина слитка, м.

Указанная привязка центра кривизны в конце первого участка к положению радиуса кривизны в его начале обусловлена необходимостью обеспечить плавное сопряжение кривизны предыдущего и последующего расчетных участков.

С учетом (3) протяженность искомого слоя в закристаллизовавшейся части слитка на расстоянии x_0 от его поверхности будет равна

$$l_1 = \alpha_1 \cdot (R_1 + x_0) = l_1^{\text{нейтр}} \cdot \frac{R_1 + x_0}{R_1 + h}. \quad (4)$$

Следующим этапом расчета является определение радиуса кривизны R_1 в конце первого расчетного участка. На этом этапе ключевым параметром является величина допустимой относительной деформации материальной частицы, имеющей наибольшую протяженность траектории в пределах зоны ТИХ. Ранее было определено, что такой материальной частицей является частица, расположенная на пересечении линии сопряжения радиальной и криволинейной зон с высокотемпературной границей ТИХ.

Конец ее траектории лежит на пересечении вектора радиуса кривизны R_1 и низкотемпературной границы ТИХ. Сразу же отметим важную деталь схемы, а именно, расстояние от поверхности слитка до траектории выделенной материальной частицы есть величина постоянная, т.е. в пределах первого расчетного участка $x_0 = \text{const}$.

Полагаем, что при оценке режима деформации на каждом расчетном участке необходимо и достаточно сравнить величину суммарной деформации, которую претерпевает материальная частица на самом протяженном пути перемещения с предельно допустимой деформацией.

При конструировании физической модели исходим из следующих положений:

– режим деформации исключает нарушение сплошности слитка;

– параметры режима деформации должны обеспечивать полное использование ресурса пластичности материала слитка в критических зонах.

Первое условие гарантировано выполняется если в пределах расчетного участка величина аккумулированной деформации любой материальной частицы не превышает допустимой величины:

$$\sum \varepsilon_{\text{ТИХ}} < [\varepsilon]. \quad (5)$$

Второе условие выполняется при:

$$\sum \varepsilon_{\text{ТИХ}} = [\varepsilon]. \quad (6)$$

Суммируя сказанное запишем условие (6) в параметрах первого расчетного участка

$$[\varepsilon_1] = \frac{h-x_0}{R_0+x_0} - \frac{h-x_0}{R_1+x_0}. \quad (7)$$

Отсюда

$$R_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_0+x_0} - \frac{[\varepsilon_1]}{h-x_0}} - x_0 = \frac{R_0+x_0}{1-[\varepsilon_1] \frac{R_0+x_0}{h-x_0}} - x_0, \quad (8)$$

где x_0 – расстояние от поверхности слитка до высокотемпературной границы ТИХ в начале 1-го расчетного участка;

R_0 – радиус кривизны поверхности слитка в начале 1-го расчетного участка;

$[\varepsilon_1]$ – предельно допустимая величина относительной деформации для слоя ТИХ первого участка.

Второй расчетный участок располагается непосредственно за первым. Поэтому конец первого участка является началом второго. По аналогии с первым участком наибольшая протяженность пути в зоне ТИХ и материальной частицы расположена в точке B_1 . Траектория перемещения этой частицы B_1N_2 . Радиус кривизны поверхности слитка, в конце второго участка, который соответствует условиям (7):

$$R_2 = \frac{R_1+x_1}{1-[\varepsilon_2] \frac{R_1+x_1}{h-x_1}} - x_1, \quad (9)$$

Отметим важное качество предлагаемой физической модели. Модель позволяет решать задачу как в варианте однородной среды, где $[\varepsilon] = \text{const}$ для всех расчетных участков, так и для неоднородной, где $[\varepsilon_i] = \text{const}$ для каждого расчетного участка, но изменяется при переходе от одного расчетного участка к другому $[\varepsilon_1] \neq [\varepsilon_2] \neq \dots [\varepsilon_i]$.

Таким образом, предлагаемая физическая модель процесса деформации непрерывнолитого слитка позволяет корректно с соблюдением основных положений механики сплошных сред рассчитать оптимальную траекторию технологической оси МНЛЗ в криволинейной зоне.

Понятно, что для "i+1" расчетного участка радиус кривизны в конце участка:

$$R_{i+1} = \frac{R_i+x_i}{1-[\varepsilon_{i+1}] \frac{R_i+x_i}{h-x_i}} - x_i. \quad (10)$$

Протяженность последнего расчетного участка (при выходе на горизонтальный участок с радиусом, равным бесконечности) может определяться различным путем, например, из условия сохранения на этом участке радиуса кривизны, полученного на предпоследнем расчетном участке.

Выводы:

1. Предложена усовершенствованная физическая модель процесса разгиба слитка на криволинейных МНЛЗ, которая позволяет более точно отразить взаимодействие элементов физической модели и, тем самым, повысить точность и надежность результатов моделирования.

2. Разработан алгоритм расчета оптимальной траектории технологической оси криволинейной МНЛЗ с использованием усовершенствованной физической модели процесса разгиба слитка на криволинейной МНЛЗ.

Список литературы

1. Полещук В.М., Бровкин В.Л., Мухенков Ю.А. Анализ физических моделей процесса разгиба слитка в криволинейных МНЛЗ. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014, № 1. С. 45–51.
2. Буланов Л.В., Корзунин Л.Г., Парфенов Е.П., Юровский Н.А., Авдонин В.Ю. *Машины непрерывного литья заготовок*. Казань: Марат, 2003. 319 с.
3. Смирнов А.Н., Гридин С.В., Белобров Ю.Н., Цупрун А.Ю., Сись Ю.В., Пильгаев В.М. Расчет параметров загиба и разгиба непрерывнолитой заготовки для МНЛЗ различной конструкции. *Металл и литье Украины*. № 12, 2002. С. 7–10.
4. Бровман М.Я., Сурич Е.В., Грузин В.Г., Целиков А.А., Евтеев Д.П. *Энергосиловые параметры установок непрерывной разливки металлов*. М.: Металлургия. 1969. 280 с.
5. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. *Машины непрерывного литья слывовых заготовок*. М.: Металлургия. 1991. 271 с.
6. Гельфенбейн Е.Ю., Карлинский С.Е., Нисковских В.М., Химич Г.Л. Установка непрерывной разливки металла. *Авторское свидетельство № 349238*. Оpubl. 05.05.74. *Бюллетень № 7*.
7. Полещук В.М., Бровкин В.Л. Деформированное состояние непрерывного слитка с жидкой сердцевинной на криволинейных МНЛЗ. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сборник научных трудов*. Выпуск 30. 2016. С. 216–225.
8. Полещук В.М., Бровкин В.Л., Лазич Л., Варга А., Кизек Я. Разработка компактных машин непрерывного литья заготовок. *New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: A collective monograph*. Series: Monografie, Nr 56. Czestochowa. 2016. S. 112–115.
9. Бровман М.Я. *Совмещенные процессы непрерывного литья и прокатки*. Саарбрюккен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 626 с.
10. Скребцов А.М., Федосов А.В., Пащук Д.В., Качиков А.С. О формировании поперечных трещин на поверхности непрерывнолитых заготовок, отливаемых из перитектических марок сталей. *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. Вып. 21. 2015. С. 59–68.
11. Долматова О.Л., Столяров А.М. Анализ возможностей повышения производительности одноручевой слывовой МНЛЗ криволинейного типа с вертикальным участком. *Теория и технология металлургического производства*. № 2 (19). 2016. С. 18–22.
12. Сотников А.Л., Мироненко Л.П., Руссиян С.А., Ильченко Д.В. Разработка принципов выставки оборудования сортовой МНЛЗ. *Вестник ДонНТУ*. № 1 (11). 2018. С. 3–11.

References (transliterated)

1. Poleshchuk V.M., Brovkin V.L., Mushenkov Yu.A. Analiz fizicheskikh modeley protsessy razgiba slitka v krivolineynykh MNLZ. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2014, No 1. P. 45–51.
2. Bulanov L.V., Korzunin L.G., Parfenov E.P., Yurovskiy N.A., Avdonin V.Yu. *Mashiny nepreryvnogo lit'ya zagotovok*. Kazan': Marat, 2003. 319 p.
3. Smirnov A.N., Gridin S.V., Belobrov Yu.N., Tsuprun A.Yu., Sis' Yu.V., Pil'gaev V.M. Raschet parametrov zagiba i razgiba nepreryvnolitoi zagotovki dlya MNLZ razlichnoy konstruktssii. *Metall i lit'e Ukrainy*. No 12, 2002. P. 7–10.
4. Brovman M.Ya., Surin E.V., Gruzin V.G., Tselikov A.A., Evteev D.P. *Energosilovye parametry ustanovok nepreryvnoy razlivki metallov*. Moscow: Metallurgiya. 1969. 280 p.
5. Niskovskikh V.M., Karlinskiy S.E., Berenov A.D. *Mashiny nepreryvnogo lit'ya slyabovykh zagotovok*. Moscow: Metallurgiya. 1991. 271 p.
6. Gel'fenbeyn E.Yu., Karlinskiy S.E., Niskovskikh V.M., Khimich G.L. *Ustanovka nepreryvnoy razlivki metalla*. Avtorskoe svidetel'stvo No 349238. Opubl. 05.05.74. *Byulleten' No 7*.
7. Poleshchuk V.M., Brovkin V.L. *Deformirovanное состояние nepreryvnogo slitka s zhidkoy serdtsevinoy na krivolineynykh MNLZ*. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii: sbornik nauchnykh trudov*. Vypusk 30. 2016. P. 216–225.
8. Poleshchuk V.M., Brovkin V.L., Lazich L., Varga A., Kizek Ya. *Razrabotka kompaktnykh mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok*. *New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: A collective monograph*. Series: Monografie, Nr 56. Czestochowa. 2016. P. 112–115.
9. Brovman M.Ya. *Sovmeshchennye protsessy nepreryvnogo lit'ya i prokatki*. Saarbrücken (Germany): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 626 p.
10. Skrebtsov A.M., Fedosov A.V., Pashchuk D.V., Kachikov A.S. *O formirovaniі poperechnykh treshchin na poverkhnosti nepreryvnolitykh zagotovok, otlivaemykh iz peritekticheskikh marok staley*. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Seriya: Tekhnicheskie nauki. Vyp. 21. 2015. P. 59–68.
11. Dolmatova O.L., Stolyarov A.M. Analiz vozmozhnostey povysheniya proizvoditel'nosti odnoruch'evoy slyabovoy MNLZ krivolineynogo tipa s vertikal'nym uchastkom. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. No 2 (19). 2016. P. 18–22.
12. Sotnikov A.L., Mironenko L.P., Russiyan S.A., Il'chenko D.V. *Razrabotka printsipov vystavki oborudovaniya sortovoy MNLZ*. *Vestnik DonNTU*. No 1 (11). 2018. P. 3–11.

Поступила (received) 10.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Полещук Валентин Михайлович (Полещук Валентин Михайлович, Polyeshchuk Valentyn Mikhaylovich) – кандидат технічних наук, Асоціація наукових установ гірничо–металургійного комплексу України, виконавчий директор; м. Дніпро, Україна; e-mail: apol46503@gmail.com

Бровкін Володимир Леонідович (Бровкін Владимир Леонидович, Brovkin Volodymyr Leonidovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, механіко–машинобудівний факультет, доцент кафедри екології, теплотехніки і охорони праці; м. Дніпро, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2925-7091>; e-mail: brovkinvolodymyr@gmail.com

УДК 621.793.6:621.785.5

Б. П. СЕРЕДА, И. В. ПАЛЕХОВА, Д. Б. СЕРЕДА**УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПРОКАТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫМИ ТИТАНОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ С ПОМОЩЬЮ ИНОВАЦИОННОЙ СВС-ТЕХНОЛОГИИ**

Рассмотрена СВС-технология получения многокомпонентных титановых покрытий в режиме теплового самовоспламенения на сталях массового назначения. Исследованы закономерности и механизмы их формирования. Экспериментально установлена роль активаторов в процессе диффузионного насыщения, а также зависимость толщины покрытий от технологических параметров процесса (температуры и продолжительности изотермической выдержки). Экспериментально установлено, что максимальная концентрация порошка меди в СВС-шихте не должна превышать 7-8%, так как ее рост приводит к резкому увеличению максимальной температуры воспламенения t_m , что приведет к перегреву металла основы и снижению ее физико-механических свойств, а также к спеканию шихты и, следовательно, уменьшению ее газопроницаемости для составляющих газовой фазы. По результатам рентгеноструктурного и металлографического анализов установлено, что полученные покрытия имеют многофазное строение: на поверхности технически чистого железа и углеродистых сталей образуется слой алюминидов Fe_2Al_5 , твердых растворов $FeAl$, Fe_3Al , легированных титаном и зона твердого раствора Ti и Al в α -Fe. Изучено влияние составов реакционных смесей на свойства полученных покрытий. Показаны результаты исследований структуры и свойств комплексных титановых покрытий, полученных в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в различных составах реакционных шихт. Приведен сравнительный анализ эксплуатационных характеристик СВС-покрытий и диффузионных покрытий, полученных методом химико-термической обработки. Испытания показали, что коррозионная стойкость СВС-покрытий в 1,6–1,7 раза выше, чем покрытий, полученных в результате диффузионного насыщения. Это может быть обусловлено микролегированием зерен покрытия (как границ, так и тела зерна) алюминием и хромом при СВС-процессе.

Ключевые слова: химические газотранспортные реакции, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, покрытие, тепловое самовоспламенение, жаростойкость, диффузия.

Б. П. СЕРЕДА, И. В. ПАЛЕХОВА, Д. Б. СЕРЕДА**ЗМЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ПРОКАТНОГО ОБЛАДНАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИМИ ТИТАНОВИМИ ПОКРИТТЯМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНОВАЦІЙНОЇ СВС-ТЕХНОЛОГІЇ**

Розглянуто СВС-технологія отримання багатоконпонентних титанових покриттів в режимі теплового самозаймання на сталях масового призначення. Досліджено закономірності та механізми їх формування. Експериментально встановлено роль активаторів в процесі дифузійного насичення, а також залежність товщини покриттів від технологічних параметрів процесу (температури і тривалості ізотермічної витримки). Експериментально встановлено, що максимальна концентрація порошку міді в СВС-шихті не повинна перевищувати 7-8%, так як її зростання призводить до різкого збільшення максимальної температури займання t_m , що призведе до перегріву металу основи і зниження її фізико-механічних властивостей, а також до спікання шихти і, отже, зменшення її газопроницності для складових газів фаз. За результатами рентгеноструктурного і металлографічного аналізів встановлено, що отримані покриття мають багатопазні будова: на поверхні технічно чистого заліза і вуглецевих сталей утворюється шар алюмінідів Fe_2Al_5 , твердих розчинів $FeAl$, Fe_3Al , легованих титаном і зона твердого розчину Ti і Al в α -Fe.

Вивчено вплив складів реакційних сумішей на властивості отриманих покриттів. Показані результати досліджень структури і властивостей комплексних титанових покриттів, отриманих в умовах високотемпературного синтезу в різних складах реакційних шихт. Наведено порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик СВС-покриттів і дифузійних покриттів, отриманих методом хіміко-термічної обробки. Випробування показали, що корозійна стійкість СВС-покриттів в 1,6-1,7 рази вище, ніж покриттів, отриманих в результаті дифузійного насичення. Це може бути обумовлено мікролегуванням зерен покриття (як кордонів, так і тіла зерна) алюмінієм і хромом при СВС-процесі.

Ключові слова: хімічні газотранспортні реакції, високотемпературний синтез, покриття, теплове самозаймання, жаро стійкість, дифузія ,

B. P. SEREDA, I. V. PALEKHOVA, D. B. SEREDA**STRENGTHENING OF ROLLING EQUIPMENT ITEMS WITH MULTICOMPONENT TITANIUM COATINGS WITH THE HELP OF INNOVATIVE SHS-TECHNOLOGY**

The SHS-technology for producing multicomponent titanium coatings in the thermal self-ignition mode on steels of mass purpose is considered. The laws and mechanisms of their formation are investigated. Experimentally established the role of activators in the process of diffusion saturation, as well as the dependence of the thickness of the coatings on the technological parameters of the process (temperature and duration of isothermal exposure). It was established experimentally that the maximum concentration of copper powder in the SHS mixture should not exceed 7-8%, since its growth leads to a sharp increase in the maximum ignition temperature t_m , which will lead to overheating of the base metal and decrease its physical and mechanical properties, as well as sintering the mixture and, consequently, reducing its gas permeability for the components of the gas phase. According to the results of X-ray structural and metallographic analyzes, it was found that the coatings obtained have a multiphase structure: a layer of aluminide Fe_2Al_5 , solid solutions $FeAl$, Fe_3Al doped with titanium and a solid solution Ti and Al in α -Fe are formed on the surface of technically pure iron and carbon steel.

The effect of the composition of the reaction mixtures on the properties of the coatings obtained was studied. The results of studies of the structure and properties of complex titanium coatings obtained under conditions of self-propagating high-temperature synthesis in various compositions of the reaction mixtures are shown. A comparative analysis of the operational characteristics of SHS coatings and diffusion coatings obtained by the method of chemical heat treatment is given. Tests have shown that the corrosion resistance of SHS coatings is 1.6–1.7 times higher than that obtained as a result of diffusion saturation. This may be due to the micro-alloying of the coating grains (both the boundaries and the grain body) with aluminum and chromium during the SHS process.

Keywords: chemical gas transport reactions, self-propagating high-temperature synthesis, coating, thermal self-ignition, heat resistance, diffusion,

Введение. Для большинства деталей машин, оборудования, инструмента, работающих в сложных эксплуатационных условиях, большое значение имеют

свойства поверхностного слоя. Во многих случаях для поверхностного упрочнения применяют различные методы химико-термической обработки (ХТО).

© Б. П. Середя, И. В. Палехова, Д. Б. Середя, 2018

Одним из эффективных методов ХТО, позволяющим улучшить коррозионную, износостойкость, жаростойкость стальных изделий, является совместное насыщение титаном и алюминием из порошковых сред. При этом содержание основных насыщающих элементов в порошковой смеси достигает 80 %, а продолжительность процесса варьируется от 4 до 12 часов [1–5]. Однако длительная высокотемпературная изотермическая выдержка может привести к перегреву стальных изделий, что значительно ухудшает структуру и механические свойства деталей, недостатками процессов традиционной химико-термической обработки является также их высокая энергоёмкость, что приводит к повышению себестоимости изделий.

В связи с этим, актуально применение технологий, позволяющих получать покрытия при ограниченном или минимальном времени их формирования, а также снизить процентное содержание насыщающих элементов в смесях при сохранении эксплуатационных свойств покрытий

Одной из таких технологий является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), совмещенный с химическими газотранспортными реакциями [6–10].

СВС представляет собой высокоинтенсивное экзотермическое взаимодействие химических элементов в конденсированной фазе, способное к самопроизвольному распространению в виде волны горения. Процесс может осуществляться в режиме горения или теплового воспламенения и характеризуется интенсивным нанесением покрытий благодаря наличию градиента температур в системе изделие – порошковая среда.

Эффективность обработки определяется временными параметрами процесса и теплофизическими характеристиками СВС-смесей. Поэтому представляет интерес поиск механизма воздействия на протекание процессов теплового воспламенения.

Целью настоящей работы является разработка оптимальных составов порошковых СВС-смесей для нанесения титаноалитированных покрытий в режиме теплового самовоспламенения, изучение влияния добавок-катализаторов на теплофизические свойства СВС-смесей и протекание процесса диффузионного насыщения в нестационарных температурных условиях. Сравнительный анализ технологических параметров СВС-процесса, структуры, фазового, химического состава и свойств покрытий, полученных в СВС-смесях без добавок металлов-активаторов и с ними, а также оценка качества формирующихся покрытий.

Методика проведения исследования. Для нанесения покрытий использовали образцы из железа технической чистоты и сталей массового назначения (сталь 20, сталь 45, У8).

Химико-термическую обработку осуществляли в реакторе открытого типа ($P=10^5$ Па) в рабочем интервале температур 950–1200°C и продолжительности изотермической выдержки 30÷60 минут. Для приготовления реакционных СВС-смесей использовали порошки оксидов хрома и

алюминия, титана, алюминия, меди технической чистоты, металлического йода дисперсностью 200–350 мкм.

Нанесение покрытий проводили в режиме теплового самовоспламенения СВС-процесса.

Подготовка поверхности образцов включала последовательные стадии шлифовки, полировки и обезжиривания в ацетоне.

Инициирование процесса насыщения осуществляли путем предварительного нагрева в печи сопротивления до температуры начала самовоспламенения (скорость нагрева – 0,5°C/с).

Температуры СВС-смеси контролировали хромель-алюмелевой термопарой в защитном чехле, введенной непосредственно в объем шихты, и подключенной к потенциометру серии КСП.

Толщину упрочненных слоев исследовали на световом микроскопе "Neophot-21" при увеличении $\times 150$. Микроструктуру выявляли методом травления в 3% спиртовом растворе пикриновой кислоты (ТУ 6-09-08-317-80). Для выявления границ зерен феррита использовали 4% спиртовый раствор азотной кислоты [11].

Анализ фазового состава покрытий осуществлялся на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М.

Исследование элементного состава проводили методом микрорентгеноспектрального анализа с применением микроанализатора JEOL "Superprob-733". Локальность анализа 1 мкм², глубина анализа ~ 1 мкм.

Микротвердость покрытий определяли на приборе ПМТ-3. Коррозионную стойкость образцов с покрытиями оценивали в 10%- растворе H₂SO₄ при температуре 20°C.

Для расчета равновесного состава продуктов системы был использован прикладные пакеты программ "АСТРА.4", TERA, Recalc [12].

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ реакций, происходящих при воспламенении СВС-смеси, а также результатов экспериментов и металлографических исследований позволили определить механизм образования комплексных покрытий на основе титана.

Теплофизически процесс образования покрытий в режиме теплового самовоспламенения разделяют на пять последовательных стадий: инертный прогрев реакционной смеси до температуры воспламенения; тепловое самовоспламенение; прогрев изделий; изотермическая выдержка; охлаждение.

Продолжительность первой стадии в значительной степени зависит от состава смеси и ее тепловых характеристик. Поэтому введение в состав реакционных смесей веществ (катализаторов), обладающих высокими показателями теплопроводности позволяет интенсифицировать процесс самовоспламенения, а именно – снизить температуру начала воспламенения t_* и значительно увеличить скорость прогрева шихты с 0,86 °C/с до 4,16 °C/с по сравнению с СВС-смесями без добавок катализатора (рис. 1)

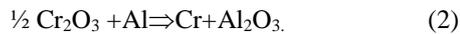
В данной работе в качестве катализатора был применен порошок меди. Аналогичным образом влияет на основные характеристики процесса теплового самовоспламенения (t^* и t_m) увеличение в шихте концентрации активной экзотермической составляющей Cr_2O_3+Al и газотранспортного агента I_2 .

На стадии инертного прогрева происходит испарение и распад используемых газотранспортных носителей по реакции

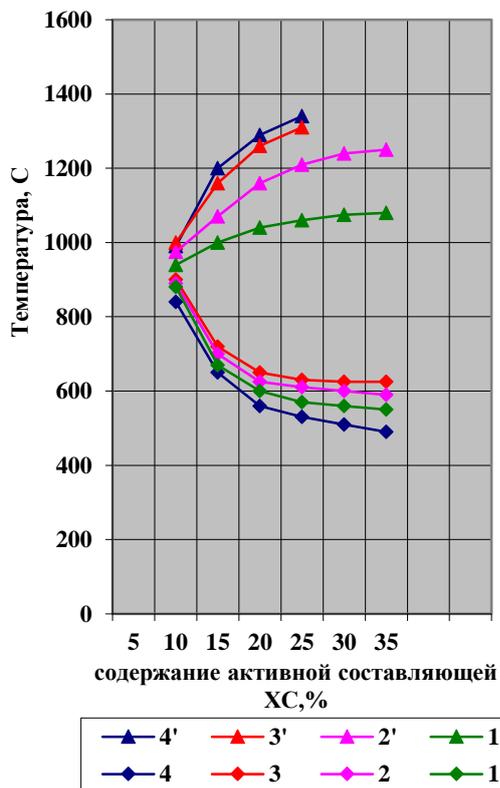


На данной стадии диффузионный слой еще не формируется.

На второй стадии (теплового самовоспламенения) протекает основная экзотермическая реакция восстановления оксида хрома:



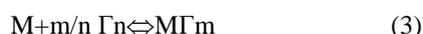
Температура в реакторе резко повышается до максимальной температуры процесса t_m . Происходит образование газообразных соединений и перенос основных насыщающих элементов к подложке:



1-1' – $k=5\%$; 2-2' – $k=10\%$; 3-3' – $k=15\%$; 4-4' – $k=10\%, l=8\%$

Δ – T_m ; \diamond – T^*

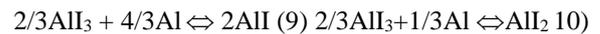
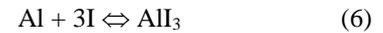
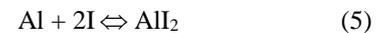
Рис. 1 – Зависимость температур воспламенения T^* и максимальной температуры T_m от содержания в реакционной смеси активной составляющей, алюминия и меди в системе $b(Cr_2O_3+2Al) + n Ti+k Al+l Cu+m Al_2O_3+f I_2$



где M – наносимый элемент, G_n – галоген, MG_m – летучий галогенид.

При этом необходимо, чтобы транспортируемый элемент и подложка находились в разных температурных зонах.

Присутствие в газовой фазе как I , так и I_2 свидетельствует о протекании в исследуемом диапазоне температур следующих химических транспортных реакций:



Более вероятны реакции взаимодействия элементов системы с йодом в атомарном состоянии.

Также на стадии теплового самовоспламенения для СВС-составов, содержащих добавки порошка меди, при достижении максимальных температур, возможен жидкостный механизм транспорта насыщающих элементов в диффузионную зону (титан и алюминий растворяются в меди и переносятся к подложке).

Экспериментально установлено, что максимальная концентрация порошка меди в СВС-шихте не должна превышать 7-8%, так как ее рост приводит к резкому увеличению максимальной температуры воспламенения t_m , что приведет к перегреву металла основы и снижению ее физико-механических свойств, а также к спеканию шихты и, следовательно, уменьшению ее газопроницаемости для составляющих газовой фазы.

На поверхности внесенных в порошковую систему стальных изделий на этой стадии возможно протекание гетерогенных реакций обмена с железом подложки.

На третьей стадии (прогрева изделий) происходит выравнивание температуры по объему реактора. Температура процесса снижается до расчетной температуры насыщения. Начинается формирование покрытия.

На стадии изотермической выдержки происходит диффузионный рост покрытия. Протекают процессы, аналогичные диффузионному насыщению в стационарных условиях.

На стадии охлаждения формирование диффузионных слоев происходит менее интенсивно, что объясняется уменьшением коэффициентов диффузии насыщающих элементов.

Размер зерен покрытия зависит от скорости охлаждения. Исследования показывают, что

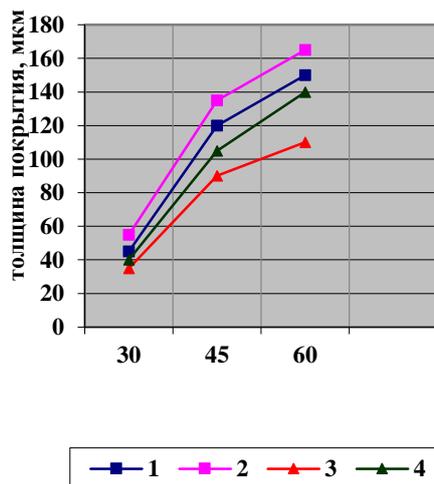
максимальная скорость роста покрытий наблюдается на начальных этапах СВС-процесса. Это может объясняться тем, что аустенит, образующийся при резком повышении температуры на стадии теплового самовоспламенения характеризуется высокой плотностью дислокаций. В связи с чем его диффузионная восприимчивость увеличивается.

Регулируя температурные условия процесса, можно управлять как скоростью роста слоев, так и их структурой.

На толщину формирующихся покрытий влияют состав шихты, продолжительность и температура изотермической выдержки, а также химический состав подложки.

На рисунках 2, 3 представлены зависимости толщин комплексных титановых покрытий, полученных на технически чистом железе и углеродистых сталях 20, 45, У8 в системах Ti-Al и Ti-Al-Cu от температуры насыщения (t_n) и продолжительности изотермической выдержки (τ).

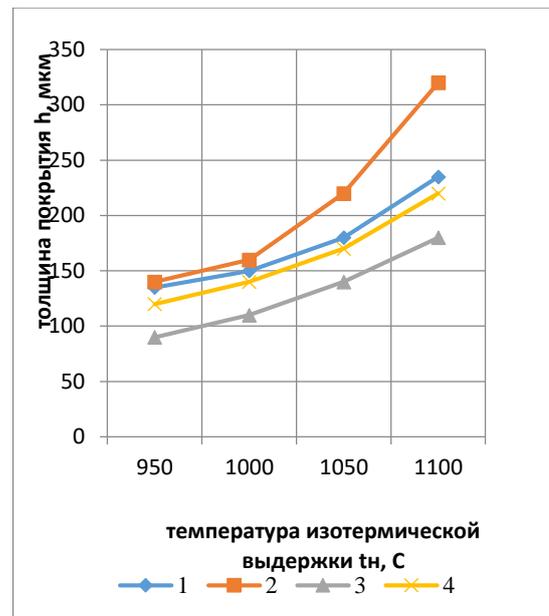
Увеличение этих параметров приводит к росту толщины диффузионного слоя. С увеличением концентрации углерода в подложке, толщина покрытия уменьшается.



1,3 – насыщение в составе $b (Cr_2O_3+2Al)+n Ti+k Al+m Al_2O_3+f I_2$

2,4 – насыщение в составе $b (Cr_2O_3+2Al)+n Ti+k Al+l Cu+m Al_2O_3+f I_2$

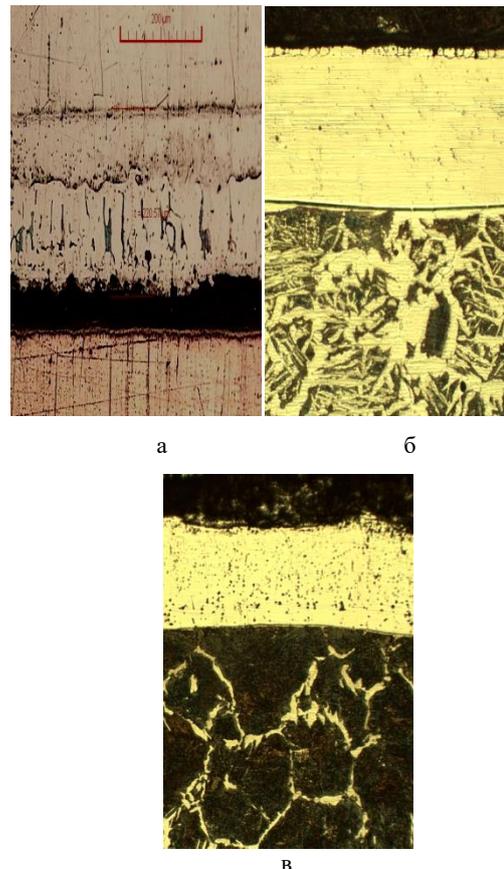
Рис. 2 – Влияние продолжительности изотермической выдержки на толщину титаноалитированных слоев, полученных на технически чистом железе (графики 1,2) и стали 20 (графики 3,4) в режиме теплового самовоспламенения при температуре насыщения $t_n=1000$ °C.



1,3 – насыщение в составе $b (Cr_2O_3+2Al)+n Ti+k Al+m Al_2O_3+f I_2$

2,4 – насыщение в составе $b (Cr_2O_3+2Al)+n Ti+k Al+l Cu+m Al_2O_3+f I_2$

Рис. 3 – Влияние температуры изотермической выдержки на толщину титаноалитированных слоев, полученных на технически чистом железе (графики 1,2) и стали 20 (графики 3, 4) в режиме теплового самовоспламенения. Продолжительность изотермической выдержки $\tau_n=60$ мин



а – технически чистое железо ($\times 145$);

б – сталь 45 ($\times 125$);

в – У8 ($\times 100$).

Рис. 4 – Микроструктуры титаноалитированных покрытий

По результатам рентгеноструктурного и металлографического анализов установлено, что полученные покрытия имеют многофазное строение: на поверхности технически чистого железа и углеродистых сталей образуется слой алюминида Fe_2Al_5 , твердых растворов $FeAl$, Fe_3Al , легированных титаном и зона твердого раствора Ti и Al в α - Fe . При насыщении в СВС-смесях, содержащих дополнительно порошок меди, также возможно образование алюминида меди Cu_3Al_4 (рис. 4).

Такой фазовый состав объясняется тем, что алюминий и медь при температуре химико-термической обработки находятся в жидком состоянии и диффундируют в подложку активнее, чем титан.

При диффузии некарбидообразующего элемента в γ -железе после достижения предела растворимости происходит превращение $\gamma \rightarrow \alpha$. В α -железе растворимость углерода незначительна, что вызывает его отгеснение вглубь подложки. Это приводит к формированию зоны с повышенным содержанием углерода под покрытием на образцах углеродистых сталей [13].

От содержания основных насыщающих элементов в шихте зависит как общая толщина покрытия, так и толщина зон отдельных фаз. С увеличением концентрации титана и алюминия общая толщина покрытия растёт.

Диаграммы распределения микротвердостей по толщине покрытий, полученных при насыщении в составах Cr_2O_3 - Ti - Al - Al_2O_3 - I_2 и Cr_2O_3 - Ti - Al - Cu - Al_2O_3 - I_2 на образцах из железа технической чистоты (рис. 5) показало увеличение микротвердости поверхностного слоя до 3200 и 4000 МПа по сравнению с микротвердостью основы 1100–1200 МПа.

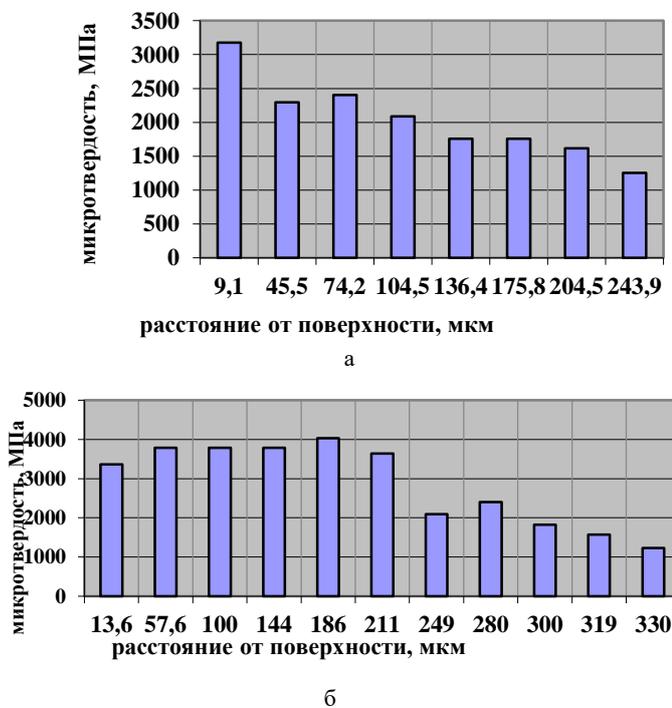


Рис. 5 – Диаграммы распределения микротвердостей по толщине покрытий, полученных в различных составах, на образцах из технически чистого железа:

а – состав реакционной смеси $b (Cr_2O_3+2Al)+n Ti+k Al+m Al_2O_3+f I_2$
 б – состав реакционной смеси $b (Cr_2O_3+2Al)+n Ti+k Al+l Cu+m Al_2O_3+f I_2$

Для оценки эффективности газотранспортных СВС-технологий для нанесения многокомпонентных титановых покрытий на железоуглеродистых сплавах, представляет интерес сравнительный анализ защитных свойств СВС-покрытий, полученных в различных составах насыщающих смесей и аналогичных покрытий, полученных методом традиционной химико-термической обработки.

В работе исследовалась коррозионная стойкость титано-алитированных СВС-покрытий, наносимых при изотермической выдержке 60 минут и диффузионных аналогов (такой же толщины), формирующихся при продолжительности обработки 4 часа.

Испытания показали, что коррозионная стойкость СВС-покрытий в 1,6–1,7 раза выше, чем покрытий, полученных в результате диффузионного насыщения. Это может быть обусловлено микролегированием зерен покрытия (как границ, так и тела зерна) алюминием и хромом при СВС-процессе.

Выводы:

1. Газотранспортная СВС-технология является эффективным способом нанесения комплексных покрытий на основе титана, обеспечивает высокую стабильность результатов обработки при ограниченной продолжительности процесса.

2. Для интенсификации процессов диффузионного насыщения и снижения энергозатрат на стадии инертного прогрева, может быть рекомендовано введение в состав реакционных смесей металлов-катализаторов.

3. Титаноалитированные стали с СВС-покрытиями по сравнению с диффузионными аналогами обладают улучшенными эксплуатационными свойствами при снижении продолжительности обработки в 4 раза.

Список литературы

1. Земсков Г.В., Коган Р.Л., Милохина Л.В., Степаненко Л.Б., Шестаков А.И., Косс Е.В. Диффузионные карбидные покрытия на стали//Защитные покрытия на металлах. Вып.6., 1972.
2. Ворошин Л.Г. Антиккоррозионные диффузионные покрытия – Минск: Наука и техника, 1981 – 296 с.
3. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение машиностроительных материалов: справочник-2 изд., перераб. и доп.– М: Машиностроение, 1994 – 496 с.
4. Многокомпонентные диффузионные покрытия / Ляхович Л.С., Ворошин Л.Г., Панич Г.Г., Щербаков Э.Д. – Минск: Наука и техника, 1974 – 236 с.
5. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / под ред. Ляховича Л.С.– М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
6. Мержанов А.Г. Процессы горения и синтез материалов .– Черноголовка: ИСМАН, 1998.– 512 с.
7. Grigor'ev Y.M., Merzhanov A.G. SHS coatings / Int. J. of SHS, 1992, v.1, №4.– p. 600-639
8. Коган Я.Д., Серeda Б.П., Штессель Э.А. Высокоинтенсивный способ получения покрытий в условиях СВС / Металловедение и термическая обработка металлов, 1991, №6. – с.39-40
9. Серeda Б.П. Получение защитных покрытий в условиях СВС // Новые материалы и технологии. – Бельфор: НИИФ, 1991. - 278 с.
10. Шефер Г. Химические транспортные реакции. – М.: Мир, 1964. – 189 с
11. Беккерт М., Клемм Х. Справочник по металлографическому травлению. – М.: Металлургия, 1979. – 336 с.
12. Сняреву Г.Б., Ватоллин Н.А., Трусов Б.Г., Моисеев Р.К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. – М.: Наука, 1982. – 263с.
13. Шатинский В.Ф., Нестеренко А.И. Защитные диффузионные покрытия. – Киев: Наук. думка, 1988. – 272 с.

References (transliterated)

1. Zemskov G.V., Kogan R.L., Miljuhina L.V., Stepanenko L.B., Shestakov A.I., Koss E.V. Diffuzionnye karbidnye pokrytija na stali//Zashhitnye pokrytija na metallah. Vyp.6, 1972 (in Russian).
2. Voroshnin L.G. Antikorrozionnye diffuzionnye pokrytija – Minsk: Nauka i tehnika, 1981 – 296 p. (in Russian).
3. Polevoj S.N., Evdokimov V.D. Uprochnenie mashinostroitel'nyh materialov: Spravochnik – 2 izd., pererab. i dop. – Moscow: Mashinostroenie, 1994 – 496 p. (in Russian).
4. Mnogokomponentnye diffuzionnye pokrytija / Ljahovich L.S., Voroshnin L.G., Panich G.G., Shherbakov Je.D. – Minsk: Nauka i tehnika, 1974 – 236 p. (in Russian).
5. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov i splavov: Spravochnik / pod red. Ljahovicha L.S.– Moscow: Metallurgija, 1981. – 424 p. (in Russian).
6. Merzhanov A.G. Processy gorenija i sintez materialov. – Chernogolovka: ISMAN, 1998. – 512 p. (in Russian).
7. Grigor'ev Y.M., Merzhanov A.G. SHS coatings / Int. J. of SHS, 1992, v.1, No4. – p. 600–639 (references)
8. Kogan Ja.D., Sereda B.P., Shtessel' Je.A. Vysokointensivnyj sposob poluchenija pokrytij v uslovijah SVS / Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov, 1991, No6. – p. 39–40 (in Russian).
9. Sereda B.P. Poluchenie zashitnyh pokrytij v uslovijah SVS // Novye materialy i tehnologii. – Bel'fort: NIIF, 1991. – 278 p. (references)
10. Shefer G. Himicheskie transportnye reakcii. – Moscow: Mir, 1964.– 189 p. (in Russian).
11. Bekkert M., Klemm H. Spravochnik po metallograficheskomu travleniju. – Moscow: Metallurgija, 1979. – 336 p. (in Russian).
12. Sinjarev G.B., Vatolin N.A., Trusov B.G., Moiseev R.K. Primenenie JeVM dlja termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh processov – Moscow: Nauka, 1982. – 263 p. (in Russian).
13. Shatinskij V.F., Nesterenko A.I. Zashhitnye diffuzionnye pokrytija. – Kiev: Nauk. dumka, 1988. – 272 p. (in Russian).

Поступила (received) 22.10.2018

Відомості про авторів /Сведения об авторах / About the Authors

Серета Борис Петрович (Серета Борис Петрович, Sereda Borys Petrovich) – научный руководитель научно-исследовательского центра «Материаловедения и инновационных технологий», доктор технических наук, профессор Днепропетровского государственного технического университета, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9518-381X>; e-mail: seredabp@ukr.net

Палехова Ирина Владимировна (Палехова Ирина Володимирівна, Palekhova Irina Vladimirovna) – аспірант кафедри «Автомобілі та автомобільне господарство» Дніпровський державний технічний університет, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6507380761> , e-mail: seredabp@ukr.net

Серета Дмитрий Борисович (Серета Дмитро Борисович, Sereda Dmytro Borisovich) – ассистент кафедры «Машиностроение» Днепропетровского государственного технического университета, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4353-1365>; e-mail: seredabp@ukr.net

УДК 539.3

**М. А. ТКАЧУК, О. А. ИЩЕНКО, Н. А. ДЬОМИНА, М. М. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ,
В. В. ШЕМАНСКА, Д. Р. ВАСИЛЬЧЕНКО**

КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ШТАМПОВОГО ОСНАЩЕННЯ

Робота спрямована на розв'язання актуальної та важливої для машинобудування, зокрема, стосовно процесів та машин обробки тиском, науково-технічної задачі забезпечення характеристик розділових штамів на основі дослідження міцності та жорсткості їхніх елементів на етапі проектування. Для дослідження напружено-деформованого стану елементів штампового оснащення розроблена комплексна математична модель, яка, на відміну від відомих, дає можливість враховувати множинну контактну взаємодію елементів досліджуваних технологічних систем. Крім того, у цю модель інтегрована технологія параметричного моделювання, що дає можливість розв'язувати задачі синтезу на основі більш достовірних нелінійних задач аналізу. Запропоновано підхід із застосуванням поповненої бази даних розрахунків напружено-деформованого стану елементів штампової оснастки для обґрунтування їхніх проектно-технологічних рішень. На відміну від спрощених розрахункових моделей або прямого багаторазового розв'язання задач у повній постановці, запропонований підхід забезпечує і точність, і оперативність розв'язання даних задач. Установлено, що при багатоконтактному сполученні набору елементів штамів, що є багатопаровою конструкцією, зони контактної взаємодії і розподілу контактної тиску практично не змінюються при збільшенні сил штампування, а розподіли і максимальні значення контактної тиску практично лінійно залежать від діючих сил штампування. За результатами чисельних досліджень напружено-деформованого стану елементів розділових штамів установлені уточнені залежності їхніх міцнісних і жорсткісних характеристик від проектно-технологічних параметрів.

Ключові слова: розділовий штамп, напружено-деформований стан, штампувальне оснащення, контактна взаємодія, метод скінченних елементів.

**Н. А. ТКАЧУК, О. А. ИЩЕНКО, Н. А. ДЕМИНА, Н. Н. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСКИЙ,
В. В. ШЕМАНСКАЯ, Д. Р. ВАСИЛЬЧЕНКО**

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

Работа направлена на решение актуальной и важной для машиностроения, в частности, относительно процессов и машин обработки давлением, научно-технической задачи обеспечения характеристик разделительных штампов на основе исследования прочности и жесткости их элементов на этапе проектирования. Для исследования напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки разработана комплексная математическая модель, которая, в отличие от известных, дает возможность учитывать множественное контактное взаимодействие элементов исследуемых технологических систем. Кроме того, в эту модель интегрирована технология параметрического моделирования, которая дает возможность решать задачи синтеза на основе более достоверных нелинейных задач анализа. Предложен подход с применением пополняемой базы данных расчетов напряженно-деформированного состояния элементов штамповой оснастки для обоснования их проектно-технологических решений. В отличие от упрощенных расчетных моделей или прямого многократного решения задач в полной постановке, предлагаемый подход обеспечивает и точность, и оперативность решения данных задач. Установлено, что при многоконтактном соединении набора элементов штампов, которые являются многослойной конструкцией, зоны контактного взаимодействия и распределения контактного давления практически не изменяются при увеличении сил штампования, а распределения и максимальные значения контактного давления практически линейно зависят от действующих сил штампования. По результатам численных исследований напряженно-деформированного состояния элементов разделительных штампов установлены уточненные зависимости их прочностных и жесткостных характеристик от проектно-технологических параметров.

Ключевые слова: разделительный штамп, напряженно-деформированное состояние, штамповочная оснастка, контактное взаимодействие, метод конечных элементов.

**М. А. ТКАЧУК, О. А. ИЩЕНКО, Н. А. ДЬОМИНА, М. М. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСКИЙ,
В. В. ШЕМАНСКА, Д. Р. ВАСИЛЬЧЕНКО**

CONTACT INTERACTION ELEMENTS STAMPING TOOL

The work is aimed at solving actual and important for mechanical engineering, in particular, regarding the processes and machines of pressure treatment, the scientific and technical task of ensuring the characteristics of separation dies based on the study of the strength and rigidity of their elements at the design stage. To study the stress-strain state of the elements of die tooling, a complex mathematical model has been developed, which, unlike the well-known ones, makes it possible to take into account the multiple contact interaction of the elements of the technological systems under study. In addition, the parametric modeling technology is integrated into this model, which makes it possible to solve synthesis problems on the basis of more reliable nonlinear analysis problems. An approach is proposed with the use of a replenished database of calculations of the stress-strain state of elements of die tooling to substantiate their design and technological solutions. Unlike the simplified computational models or the direct multiple solution of problems in a complete formulation, the proposed approach ensures both the accuracy and efficiency of solving these problems. It has been established that with a multi-contact connection of a set of stamp elements that are multi-layered, the areas of contact interaction and contact pressure distribution do not practically change with increasing pressing forces, and the distribution and maximum values of contact pressure depend almost linearly on the existing pressing forces. According to the results of numerical studies of the stress-strain state of the elements of separation punches, the refined dependencies of their strength and stiffness characteristics on the design and technological parameters were established.

Keywords: separation stamp, stress-strain state, stamping tooling, contact interaction, finite element method.

Вступ. Розвиток сучасного машинобудування неможливий без активного просування прогресивних технологій, обладнання, оснащення та інструменту. Зокрема, однією із домінуючих тенденцій є застосування технологій обробки матеріалів тиском. Дійсно, ці технології є за своєю природою надзвичайно ефективними, оскільки дають можливість істотно знижувати трудомісткість виготовлення деталей, підвищувати коефіцієнт використання матеріалу, а також у багатьох випадках обходитися без наступної

механічної обробки, тобто одержувати готові деталі. У той же час одним із вузьких місць при впровадженні цих технологічних процесів є значна вартість технологічного оснащення та інструменту. Зокрема, для листоштампувального виробництва це пов'язане, наприклад, із виготовленням штамів та різальних елементів. Вони повинні мати високу точність і стійкість. З цією метою все більше застосування отримує оборотне переналагоджуване оснащення. Воно складається з основного блоку і змінного

переналаджуваного пакета, шляхом заміни якого можна перелаштовуватися на виготовлення тієї чи іншої деталі. Цим самим підвищується оперативність і знижується вартість технологічної підготовки виробництва нових виробів, що особливо важливо в умовах превалюючих тенденцій зниження серійності машинобудівного виробництва. При цьому підвищені вимоги до точності та стійкості розділових штампів передбачають розробку адекватних, точних і економічних (з точки зору використовуваних обчислювальних ресурсів) математичних і чисельних моделей та методів розрахунку проектно-технологічних параметрів проєктованих штампів за критеріями міцності і жорсткості з урахуванням множинного контакту їхніх елементів.

У той же час існуючі аналітичні та чисельні методики розрахунку елементів штампного оснащення (ЕШО) далеко не повною мірою відповідають висунутим вимогам. Зокрема, найбільш відчутним їхнім недоліком є не зовсім коректне урахування крайових умов у областях спряження окремих елементів досліджуваних штампів, що призводить до істотних похибок у визначенні їх напружено-деформованого стану (НДС). У свою чергу, це призводить або до недостатньої міцності та жорсткості, стійкості та точності штампа, або – до завищеної металоємності. Протиріччя, яке склалося між можливостями науки і потребами практики, формує актуальну і важливу науково-практичну задачу розробки нових, більш адекватних, точних і оперативних моделей та методів розрахунку проектно-технологічних параметрів елементів штампного оснащення за критеріями забезпечення міцності і жорсткості. Розв'язання цієї задачі для штампів, що здійснюють операції вирубки-пробивання листового матеріалу, є актуальним та складає напрямок поставлених до розв'язання у роботі досліджень.

Аналіз існуючих методів розрахунку напружено-деформованого стану та дослідження контактної взаємодії елементів штампного оснащення. Різні методи дослідження точнісних, жорсткісних, стійкісних, міцнісних характеристик елементів штампної оснастки наведені у роботах І.С. Алієва, В.В. Драгобецького, Є.І. Заярненка, О.Я. Мовшовича, О.Ф. Тарасова, В.А. Тітова, Є.А. Фролова, N. Kardes, W. Liu, L.C. Zhang та інших дослідників [1–19]. У їхніх роботах здійснено широкий спектр досліджень впливу проектно-технологічних параметрів оснащення, інструмента та обладнання на їх експлуатаційні характеристики. У той же час у цих роботах ключова компонента – контактна взаємодія – досліджена недостатньо повно. При цьому великий обсяг експериментальних даних не узгоджений із чисельними дослідженнями, які свого часу здійснені на спрощених моделях. Це пояснюється недостатньо розвиненими засобами комп'ютерного моделювання, наявними у свій час у цих досліджень. Зокрема, можна за означеним напрямком відзначити роботи про деформацію елементів блока штампів та інструмента [1], базових плит та інших елементів штампів [2–4], про дослідження точності збирання оснащення [5], про моделювання конструкцій штампів, процесів і станів при обробці матеріалів тиском [6–15]. При цьому

особлива увага приділяється чисельним методам аналізу напружено-деформованих станів (НДС) пружних тіл та систем тіл [13, 16–19]. Таким чином, проведений аналіз дав підстави визначити, що множинна контактна взаємодія є важливою, проте врахована недостатньо, що, у свою чергу, дає можливість зробити висновок про актуальність і важливість поставленої задачі та визначити завдання досліджень. Ця робота знаходиться у руслі розвитку методів та моделей, розроблених та описаних у попередніх публікаціях авторів [20–25].

Постановка задач дослідження. Для обґрунтування вибору та напрямків розвитку і застосування математичних моделей, чисельних та експериментальних методів, що використані та адаптовані у роботі для досліджень НДС розділових штампів (РШ), залучається математична модель множинної контактної взаємодії елементів РШ. Для реалізації моделей обрано чисельний метод скінченних елементів (МСЕ), для експериментальних досліджень – тензометрії, чутливих до тиску плівок та голографічної інтерферометрії. Вони доповнені методом узагальненого параметричного моделювання, за допомогою якого усі моделі та методи інтегруються у єдиний комплекс. Усі перелічені моделі, методи та засоби мають переваги для розв'язання задач, що виникають. Так, МСЕ володіє широким арсеналом аналізу НДС деталей конструкцій, у т.ч. – із урахуванням контактної взаємодії. Метод із використанням чутливих до тиску плівок дає можливість безпосередньо вимірювати контактний тиск між деталями конструкцій. Метод параметричного моделювання дає змогу варіювати розрахункові моделі досліджуваних елементів ЕШО.

Із залученням, адаптацією та розвитком цих методів поставлені та розв'язані наступні задачі:

1) розробити вдосконалену математичну модель напружено-деформованого стану елементів РШ з урахуванням множинної контактної взаємодії, а також інтегрувати у цю модель набір варіюваних і контрольованих параметрів;

2) створити удосконалені чисельні моделі НДС контактуючих елементів досліджуваних штампів для розділових операцій на основі розробленої математичної моделі;

3) розв'язати на створеній основі прикладні задачі дослідження впливу конструктивних і технологічних параметрів на міцність і жорсткість ЕШО;

4) проаналізувати та узагальнити виявлені фізичні особливості у розподілі компонент НДС;

5) експериментально дослідити НДС і контактну взаємодію елементів РШ.

Математична модель напружено-деформованого стану елементів штампного оснащення. У загальному вигляді задача дослідження міцності, стійкісних, жорсткісних і точнісних характеристик ЕШО виливається у систему диференціальних рівнянь, що утворюють початково-крайову задачу. Система розв'язувальних співвідношень може бути подана у операторному вигляді:

$$L(u, \sigma, p, f, t) = 0. \quad (1)$$

Тут L – оператор початково-крайової задачі;

u, σ – вектор переміщень і тензор РШ.

У розгорненому вигляді співвідношення для визначення напружень елементів штампного оснащення;

f – масив зовнішніх навантажень;

t – час;

p – масив узагальнених параметрів: саме вони визначають варіативність геометричної форми, розмірів, властивостей матеріалу елементів штампного оснащення, саме завдяки їм вдається здійснювати різноманітні дослідження для обґрунтування раціональних параметрів елементів НДС ЕШО мають вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= 1/2(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{i,r} \cdot u_{r,i}), \\ \sigma_{ij,j} + F_i &= 0, \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \end{aligned} \quad (2)$$

де $*,_i = \partial*/\partial x_i$ – похідна за x_i ;

$r = \{x_1, x_2, x_3\}^T$ – радіус-вектор точок, утворений набором декартових координат x_1, x_2, x_3 ;

$u_i, \varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}$ – компоненти вектора переміщень точок досліджуваних об'єктів, тензорів деформацій і напружень відповідно;

C_{ijkl} – тензор модулів пружності матеріалів, із яких складаються досліджувані елементи;

F_i – компоненти об'ємного навантаження;

індекси $i, j, k, l = 1, 2, 3$ (при їх повторенні у виразі діє правило підсумовування за цими індексами).

На відміну від класичних, присутні крайові умови на поверхнях S_C (з номерами s та g) можливого контакту із зазорами δ_{sg} , що означають непроникнення тіл одне в одного:

$$\left(u_i^{(s)} n_i^{(s)} + u_k^{(g)} n_k^{(g)} \right) \Big|_{S_C} \leq \delta_{sg}. \quad (3)$$

Тут u – компоненти переміщень, а n – компоненти нормалей (рис.1).

Ці умови, на відміну від традиційних, мають вигляд нерівностей. Це відразу ж перетворює задачу у нелінійну. При її розв'язанні необхідно визначати і зони контакту, і контактний тиск

$$q = q(r) \Big|_{S_C} \geq 0. \quad (4)$$

Якраз у цьому – основна складність її розв'язання.

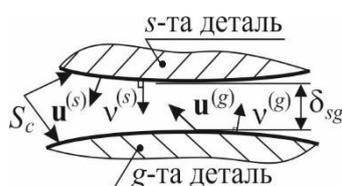


Рис. 1 – Умови контактної взаємодії елементів РШ

Особливістю ЕШО є наявність не одиничного, а множинного контакту на поверхнях узгодженої форми, зокрема, на плоских поверхнях. З урахуванням

нелінійності задачі (1)–(4), а також варіативності технічних рішень штампів, приходимо до оперування з великим масивом складних задач. Відповідно, різко зростають вимоги до часу і обчислювальних ресурсів. У той же час ці дослідження потрібно здійснювати оперативно. У результаті стикаємося із центральним протиріччям методологічного плану.

Для розв'язання цієї суперечності були здійснені теоретичні розробки у двох напрямках. Перший відноситься до тенденції зміни розв'язку варіаційної задачі. Дійсно, із розв'язку задачі мінімізації функціонала повної внутрішньої енергії

$$\begin{aligned} I(v) &= \frac{1}{2} \sum_s \int_{\Omega_s} \sigma_{ij}^{(s)} \cdot \varepsilon_{ij}^{(s)} d\Omega - \\ &- \sum_s \int_{S_C^{(s)}} \sigma_{ij}^{(s)} u_i dS - \sum_s \int_{S_C} \sigma_{sj} \cdot v_j \cdot u_s dS \end{aligned} \quad (5)$$

на множині

$$K \in \left\{ v^{(s)} : \left(v_i^{(s)} n_i^{(s)} + v_k^{(g)} n_k^{(g)} \right) \Big|_{S_{sg}} \leq \delta_{sg} \right\}, \quad (6)$$

що задається лінійними обмеженнями (3), можна прийти до наступного висновку: якщо за якимось параметром досягається безумовний мінімум, то спостерігається зміщення на таку ж величину, як і сила штампування; у випадку попадання на обмеження за якимось параметром, зміщення відбувається порівняно з початковим значенням на таку ж величину в цій області (рис. 2). Іншими словами, положення умовного та безумовного мінімумів (у варіанті (4) від навантаження залежать лінійно. Це справедливо для випадку нульового зазору δ_{sg} між контактуючими елементами.

Отримуємо, що з ростом зусилля штампування зона контакту не змінюється, закон розподілу контактного тиску залишається стабільним, а компоненти НДС прямо йому пропорційні. Цей результат дає можливість різко скоротити обсяги чисельних досліджень за рахунок зменшення варіантів аналізу НДС елементів штампів.

Другий напрямок відноситься до часового розподілу компонент НДС. Дійсно, процес штампування за своєю суттю є динамічним. Для визначення значущості вкладу інерційних складових необхідно зіставити частоту збурення від $P_{шт}$ із власними частотами коливальності ЕШО. Для цього, відштовхуючись від скінченно-елементного формулювання

$$M\ddot{\mathbf{X}} + C\dot{\mathbf{X}} = 0, \quad (7)$$

де M, C – матриці мас і жорсткості, а \mathbf{X} – вектор вузлових змінних, що описує стан досліджуваного об'єкта, слід розв'язати задачу про власні частоти ω_i та власні форми коливальності λ_i :

$$(C - \omega^2 M) \lambda = 0, \text{Det}(C - \omega^2 M) = 0. \quad (8)$$

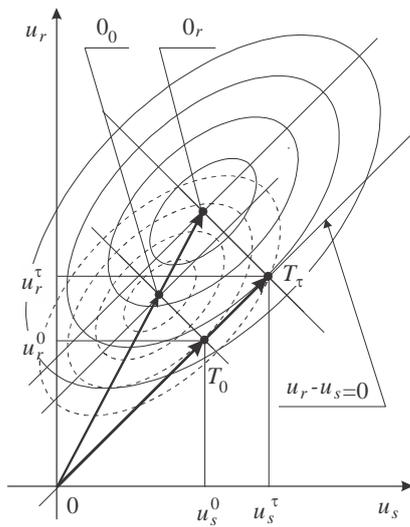


Рис. 2 – Лінії рівня функції I в перерізі координат $u_r - u_s$

Як показали результати подальших чисельних експериментів, частота збудження від кривошипно-шатунних пресів на порядки нижча власних частот коливань базових плит, блоків: $\nu = 1/T \ll \nu_1 = 1/T_1$. Таким чином, обґрунтовується квазістатична постановка задачі.

У результаті запропоновано теоретичні основи аналізу напружено-деформованого стану ЕШО з урахуванням не одиничного (тобто якогось одного елемента з іншим), а множинного контакту (тобто декількох елементів одночасно) для забезпечення необхідних міцнісних, жорсткісних, стійкісних і точнісних характеристик РПШ.

Чисельна реалізація математичної моделі.

Створені математичні моделі знайшли свою реалізацію у вигляді спеціалізованого програмно-моделного комплексу (СПМК), представленого на рис. 3. Він об'єднує, з одного боку, спеціальні модулі, а з іншого, – універсальні пакети типу SolidWorks, Creo (там створені параметричні та геометричні моделі, а в ANSYS – скінченно-елементні моделі елементів РПШ). Це дало можливість перейти до розв'язання прикладних задач.

Прикладні задачі досліджень. У першу чергу, були досліджені власні частоти (ВЧК) і власні форми коливань (ВФК) нижніх базових плит, а також блоків РПШ у зборі.

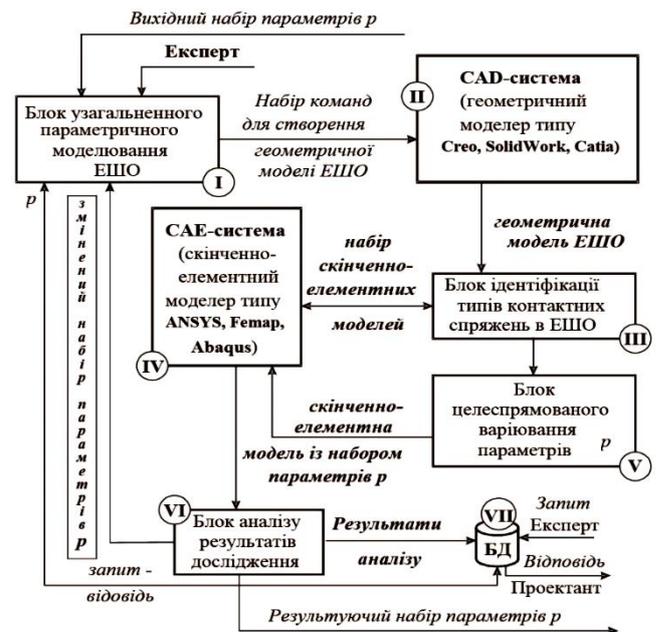


Рис. 3 – Структура СПМК для дослідження НДС ЕШО з урахуванням контактної взаємодії

Зіставлення спектрів ВЧК і ВФК (рис. 4, 5) з частотою навантаження і видом навантаження однозначно підтверджує можливість і правомірність квазістатичної постановки задачі аналізу НДС ЕШО, оскільки нижні частоти власних коливань вищі, ніж частоти збурення.

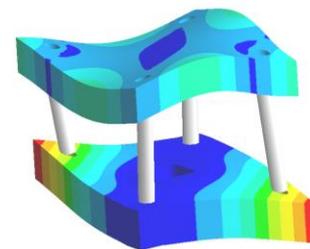


Рис. 4 – Приклад ВФК блока штампа з частотою 4,24 Гц (Shell-конструктиви)

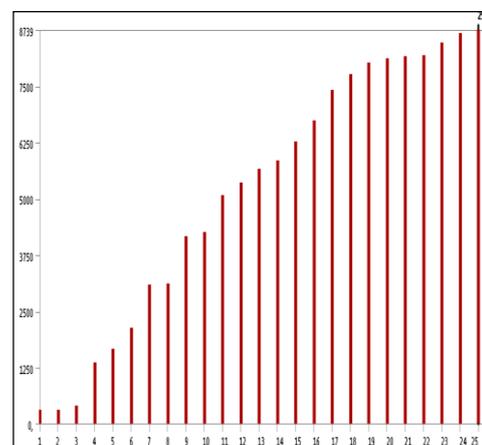


Рис. 5 – Спектр власних частот коливань (Гц) блока штампа (Shell-конструктиви)

Далі були розв'язані задачі про контактну взаємодію ЕШО у різних постановках (рис. 6). Зокрема, досліджено

вплив товщини нижньої базової плити та діаметра провального отвору у підштамповій плиті преса на контактний тиск, напруження і переміщення.

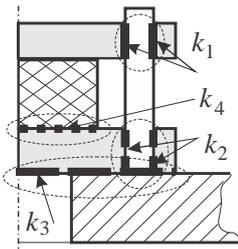


Рис. 6 – Елементи досліджуваної технологічної системи та відповідні характерні зони контактної взаємодії $k_1 \div k_4$

Встановлено такі закономірності (рис. 7, 8): напруження в елементах даної підсистеми концентруються в зонах їх механічного контакту; напруження і контактний тиск розподіляються на площях контактного сполучення нерівномірно; інтегральні залежності характеристик НДС від варійованих параметрів (у цьому випадку – товщина базової плити і діаметр провального отвору) відповідають «гіперболічній» поведінці (рис. 9, різке зростання при зменшенні об'єму матеріалу деталі нижче певної межі, практично незмінна величина – при зростанні цього об'єму вище деякої іншої межі і плавну зміну у перехідному діапазоні).

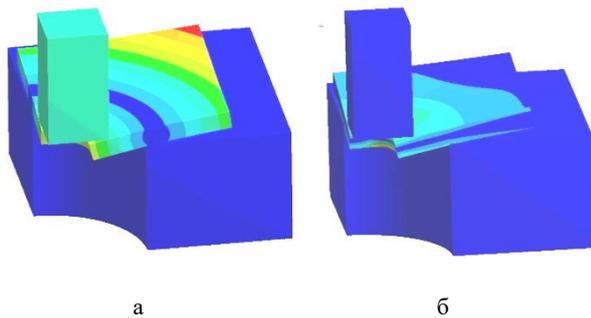


Рис. 7 – Результати дослідження НДС елементів штампів:
а – розподіл повних переміщень;
б – еквівалентні напруження за Мізесом

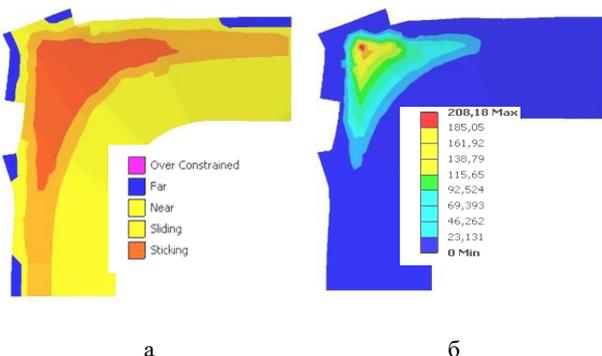


Рис. 8 – Результати дослідження НДС елементів штампів у сполученні змінного пакету та базової плити: а – контактні зони; б – контактний тиск

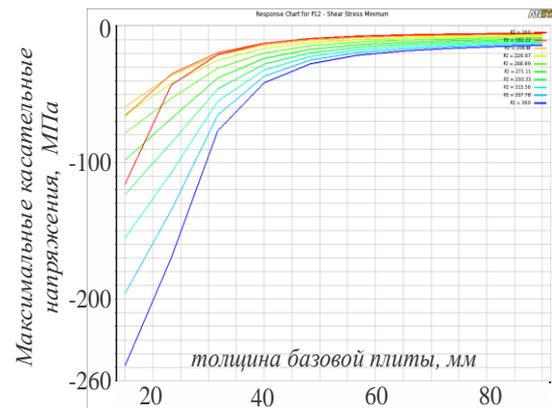
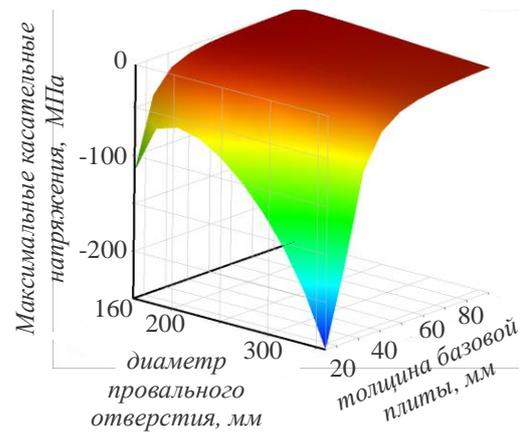


Рис. 9 – Залежність максимальних за величиною дотичних напружень від товщини базової плити та діаметра провального отвору

Також встановлено особливості контактної взаємодії напрямних колонок із запресовкою та із заливкою епоксидним компаундом в отвір у нижній базовій плиті (рис. 10). Як видно з представлених графіків і розподілів (рис. 10, 11), для випадку запресовки спостерігаються такі закономірності: найбільш навантаженими від горизонтальних зусиль зонами є області, що примикають до з'єднання колонок із плитами; контактний тиск у сполученні «колонка – плита» розподіляється нерівномірно, і чим менше натяг, тим більше ця нерівномірність; для випадку з'єднання епоксидною смолою: напруження у цьому випадку набагато нижчі, ніж у разі посадки колонок з натягом; переміщення колонок від дії горизонтальних зусиль вищі, ніж у разі посадки колонок з натягом; розподіл напружень у шарі клейового компаунда після полімеризації та прикладання навантаження у разі посадки колонок з натягом нерівномірний за висотою; незважаючи на більш низький рівень напружень, слід ураховувати також і більш низький рівень механічних характеристик матеріалу клейового шару порівняно з властивостями металу, з якого виготовлені колонка і плита; залежності інтегральних характеристик НДС дослідженої підсистеми від величини зусиль носять приблизно лінійний характер з відхиленням до 3%.

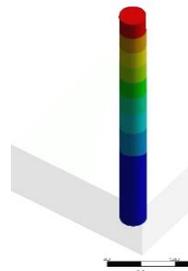


Рис. 10 – Розподіл повних переміщень у колонці штамп

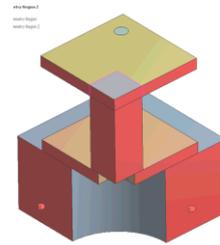
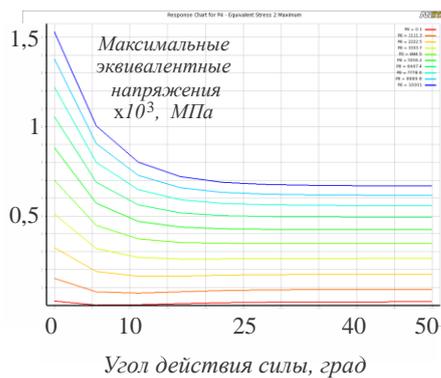
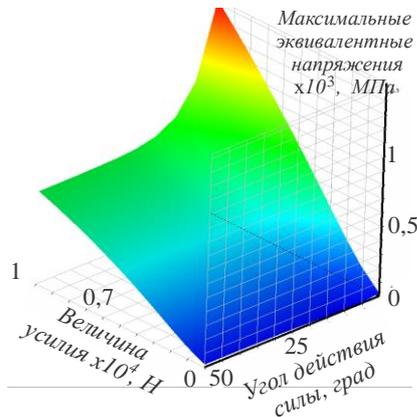
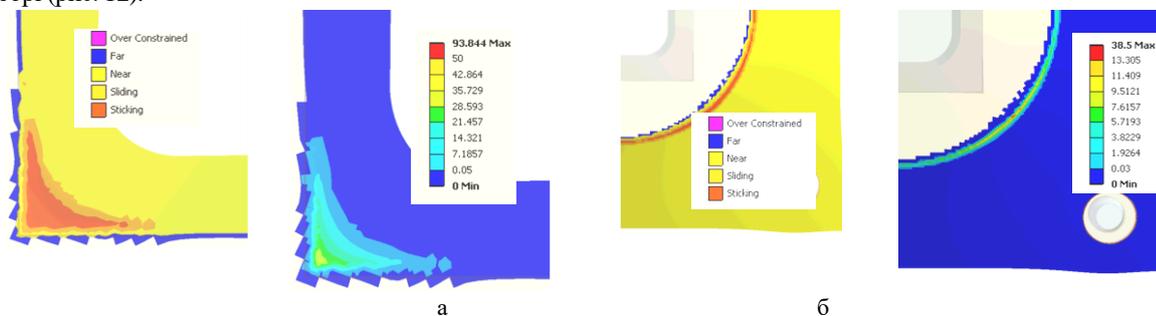


Рис. 12 – Розділовий штамп: геометрична модель

Рис. 11 – Залежність максимальних еквівалентних напружень від параметрів p_1, p_2 (кут дії та величина зусилля відповідно)

На завершення на більш докладній моделі НДС блоку РПШ досліджено в комплексі поведінку штамп у зборі (рис. 12).

Рис. 13 – Картини розподілу контактного тиску у зонах: а – k_4 ; б – k_3 ($P_{шт} = 10$ кН) (див. рис. 6)

Як випливає з аналізу отриманих результатів, напружено-деформований стан цієї системи має ті ж особливості, що були встановлені на частинних моделях. Дійсно, виявлені закономірності (рис. 13), а саме щодо істотно нерівномірного розподілу контактного тиску у сполученнях елементів штампового оснащення, підтверджуються з відмінністю до 5%. Те ж можна сказати і про розподіл повних переміщень, еквівалентних напружень за Мізесом (рис. 14). З усієї системи можна виокремити картини напружено-деформованого стану окремих елементів (рис. 15–17). Вони також дають підстави підтвердити прогнозовані особливості НДС, обґрунтовані на частинних моделях: про концентрацію напружень у зонах контактної взаємодії окремих ЕШО та про значні рівні пружних переміщень.

На рис. 18 наведені отримані результати щодо контактного тиску. Із задовільною для практики точністю відзначена лінійна залежність контактного тиску від зусиль штампування з похибкою до 2-4%. На рис. 19 – залежність прогинів та напружень від товщини нижньої плити та діаметра провального отвору.

Видно, що проектно-технологічні чинники здійснюють істотний вплив на жорсткісні та міцнісні характеристики ЕШО. Якщо брати до уваги абсолютні значення обмежень за прогинами базової плити і рівнем напружень, то її параметри слід обирати із умов конкретної задачі. Так, рівень прогинів 30 мкм забезпечується за товщини плити $h = 45$ мм та діаметра провального отвору $D = 160$ мм. Рівень напружень до 100 МПа забезпечують $h = 45$ мм та $D = 175$ мм.

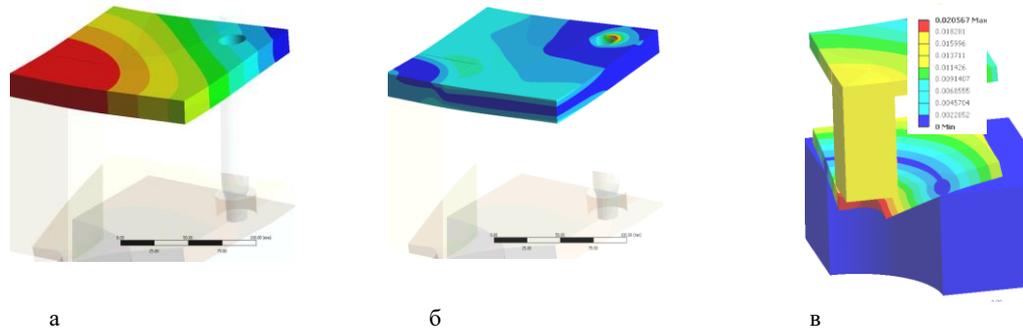
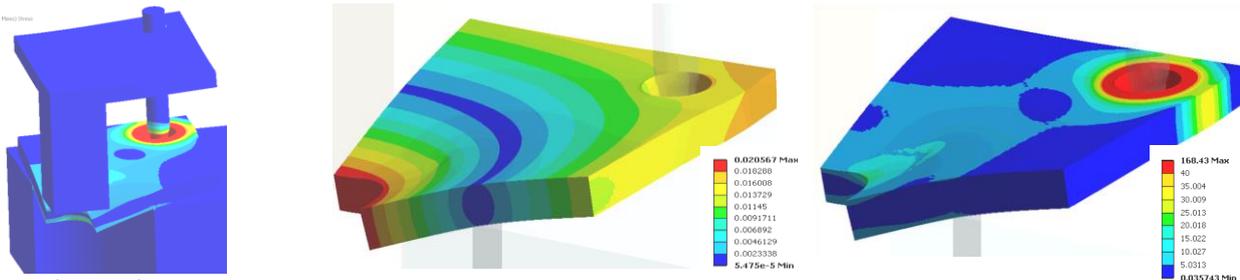


Рис. 14 – Картини розподілу компонент НДС у верхній базовій плиті ($P_{шт} = 10$ кН):
а – повні переміщення; б – еквівалентні напруження за Мізесом; в – повні переміщення



Еквівалентні напруження за Мізесом

Рис. 15 – Картини розподілу компонент НДС ($P_{шт} = 10$ кН)

Рис. 16 – Картини розподілу компонент НДС у нижній базовій плиті ($P_{шт} = 10$ кН):
а – повні переміщення; б – еквівалентні напруження за Мізесом

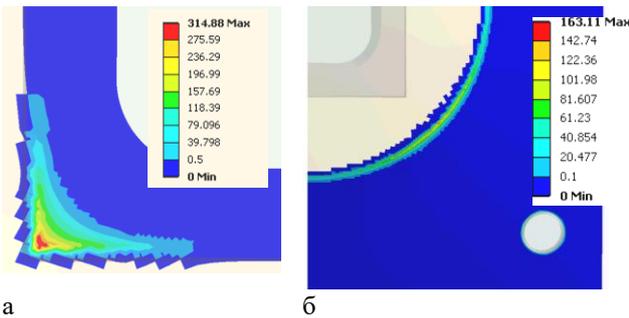


Рис. 17 – Картини розподілу контактної тиску у зонах (див. рис. 6): а – k_4 ; б – k_3 ($P_{шт} = 100$ кН)

Якщо ж виходити із чутливості жорсткісних та міцнісних характеристик ЕШО до зміни варійованих параметрів, то рекомендовані діапазони: за прогинами – $h \geq 45$ мм та $D \leq 160$ мм, а за напруженнями – $h \geq 45$ мм та $D \leq 175$ мм.

Таким чином, можна зробити висновок, що якісну картину розподілу компонент напружено-деформованого стану можна проаналізувати за результатами більш повної моделі штампа, у той же час як кількісні залежності характеристик НДС від варійованих параметрів можна визначати за результатами розрахунку із застосуванням частинних моделей, що менш громіздкі, а, значить, – і вимагають менше обчислювальних витрат на комп'ютерне моделювання. У результаті забезпечується збалансування точності отриманих результатів і складності створюваних моделей.

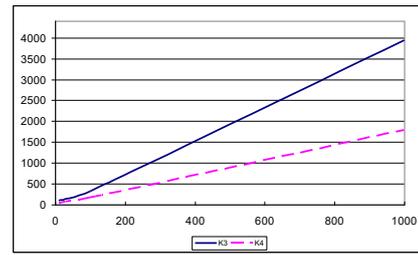
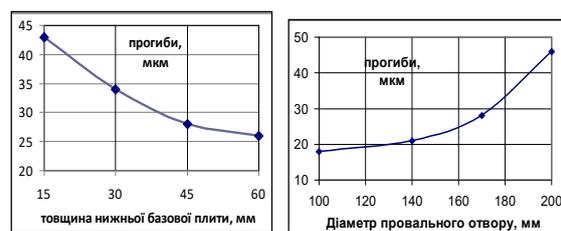


Рис. 18 – Залежність максимального контактної тиску у сполученнях від величини зусилля штампування k_4, k_3



Еквівалентні (за Мізесом) напруження

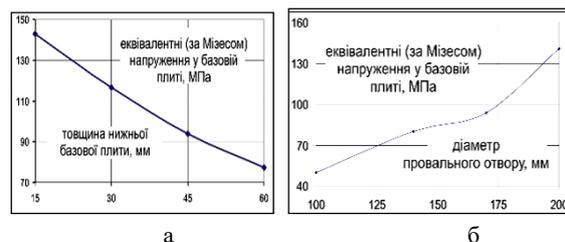


Рис. 19 – Картина НДС у базовій плиті:
а – при різних значеннях товщини нижньої базової плити ($D = 170$ мм); б – при варіюванні діаметру провального отвору ($h = 45$ мм)

Експериментальні дослідження. Для обґрунтування точності одержуваних чисельно результатів дослідження НДС елементів технологічного оснащення вони були зіставлені з даними експериментальних досліджень. При цьому були використані як дані, отримані іншими дослідниками, так і одержувані у ході самостійно проведених експериментів результати. Зокрема, були залучені результати досліджень НДС базових плит методом голографічної інтерферометрії, тензометрії і контактних відбитків. Відповідність чисельно і експериментально отриманих, причому як у ході власних, так і у ході випробувань, проведених іншими дослідниками [2], становить 10–15% за середнім відхиленням контактного тиску, визначеного чисельно та експериментально (рис. 20, 21).



Рис. 20 – Загальний вигляд стану

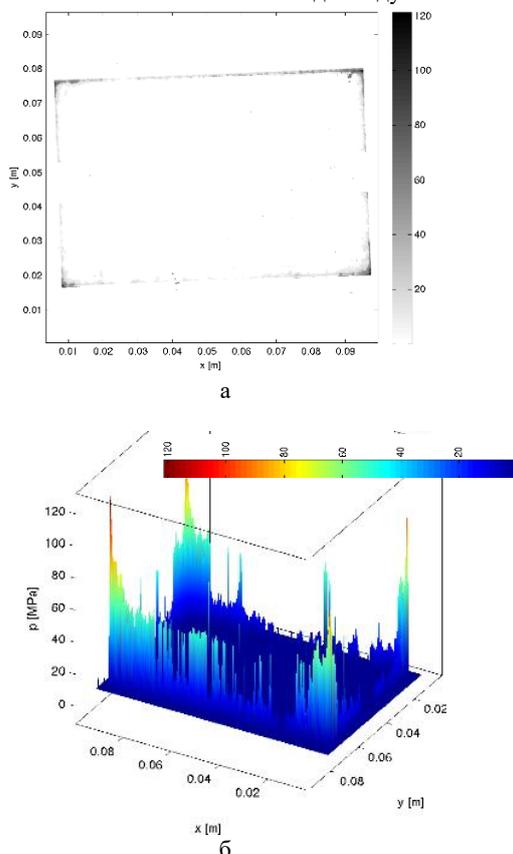


Рис. 21 – Результати дослідження взаємодії пакета із базовою плитою: площа поверхні – 358.08 мм², $P = 5938.11$ Н, $p_{\max} = 121.21$ МПа: а – відбиток; б – розподіл тиску

Висновки та рекомендації. Отримані результати служать як основа при обґрунтуванні раціональних проектно-технологічних рішень РІШ. Зокрема, мова йде про обґрунтування товщини нижніх базових плит РІШ, величин натягів для закріплення напрямних колонок або властивостей клейових сумішей, діаметра провального отвору, зусиль штампування тощо.

Що стосується вимог до стійкості, міцності, жорсткості і точності виконання технологічних операцій, то вони безпосередньо залежать: міцність – від рівня напружень в основних, найбільш навантажених елементах штампового оснащення $\sigma_3^{\max} \leq [\sigma]$, жорсткість – від рівня переміщень і поворотів ЕШО $w_{\max} \leq [w]$; $w'_{\max} \leq [w']$.

Зокрема, на базі проведених досліджень досягнуто зниження рівня контактного тиску та еквівалентних напружень у базових плитах на 20–25%, а переміщень – на 25–30% за рахунок раціонального вибору товщини нижніх базових плит, габаритних розмірів, товщини та матеріалів деталей, що штамнуються.

Перевагою цього підходу (порівняно з відомими), є висока оперативність і точність, що дуже цінно в умовах стислих термінів і обмежених матеріальних ресурсів при проектуванні технологічного оснащення для штампування деталей на підприємствах в умовах низької серійності.

Список літератури

1. Тарасов А. Ф., Короткий С. А. Влияние конструкции штампа на деформацию элементов блока и рабочего инструмента. Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тем. зб. наук. праць. Краматорськ: ДДМА, 2004. С. 103–108.
2. Зарненко Е. И. Разработка математических моделей и расчеты на прочность разделительных переналаживаемых штампов: дисс. доктора. техн. наук: спец. 01.02.06 и 05.03.05. Харьков, 1992. 280 с.
3. Бых А. И., Кузнецова Л. Г., Мовшович А. Я. Напряженно-деформированное состояние вырубных матриц специализированных переналаживаемых штампов. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2004. № 8. С. 30–33.
4. Зарненко Е. И., Ткачук А. В., Ткачук Н. А. Исследование контактного взаимодействия пуансона со штампуемым материалом. ВОР. Серия 2. 1985. вып. 10 (176). С. 20–23.
5. Мовшович И. Я., Фролов Е. А., Бондарь О. В. и др. Исследование параметров точности сборки универсально-сборной переналаживаемой оснастки. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 5. С. 17–21.
6. Матвийчук В. А., Михалевиц В. М., Алиева Л. И. Оценка деформируемости материала заготовок, полученных отделением методами пластического сдвига. Обработка материалов давлением. 2013. № 4 (37). С. 16–22.
7. Драгобецкий В. В., Троцко О. В., Шлык С. В. Расширение возможностей моделирования процесса сложной вытяжки. Обработка материалов давлением. 2012. № 2 (31). С. 30–34.
8. Воронцов А. Л. Описание деформаций при анализе процессов обработки металлов давлением. Ч. 1. Степень деформации и накопленная деформация. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 1. С. 3–8.
9. Воронцов А. Л. Описание деформаций при анализе процессов обработки металлов давлением. Часть 2. Выявление зон с различным деформированным состоянием. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 2. С. 3–7.
10. Воронцов А. Л. Описание деформаций при анализе процессов обработки металлов давлением. Часть 3. Деформированное состояние и учет упрочнения при осадке и вдавливании в полупространство. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 3.
11. Шибиков В. Г., Мулюков Р. И., Вильданов И. З. Разработка конструкторско-технологической модели детали для САПР ТП обработки металлов давлением. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 8. С. 15–20.

12. Тарасов А. Ф., Колесникова Г. В., Спасская А. М. и др. Регрессионно-математическое моделирование энергосиловых параметров процесса холодной прокатки. *Обработка материалов давлением*. 2010. № 2(23). С. 72–78.
 13. Тарасов А. Ф., Короткий С. А. Моделирование разделительных операций на основе оценки степени использования ресурса пластичности материала в среде системы конечно-элементного анализа ABAQUS. *Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні: наук. журнал*. Запоріжжя: 2010. № 1. С. 114–117.
 14. Алиева Л. И., Борисов Р. С., Савчинский И. Г. Методика расчета и проектирования процессов выдавливания в разъемных матрицах. *Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej, V miedzynarodowa konferencja naukowa: Seria Metalurgia*, nr 39. Czestohowa: Wipmifs, 2004. С. 383–391.
 15. Popat P. B., Ghosh A., Kishore N. N. Finite – element analysis of the blanking process. *Journal of Mechanical Working Technology*. Amsterdam. 1989. Vol. 18. № 3. Pp. 269–282.
 16. Михаленко Ф. П., Гулиев А. И. Закономерности распределения интенсивности напряжений и деформаций по пояску смятия при вырубке-пробивке. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1989. № 12. С. 17–19.
 17. Шибакон В. Г., Панкратов Д. Л., Виноградов А. И. и др. Система автоматизированного расчета технологических свойств металла в процессах разделительных операций листовых штамповки. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2015. № 4. С. 36–40.
 18. Oujebbour F.-Z., Habbal A., Ellaia R., Zhao Z. Multicriteria shape design of a sheet contour in stamping. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2014. Vol. 1, No. 3. P. 187–193.
 19. Hamdaoui M., Le Quilliec G., Breitkopf P., Villon P. POD surrogates for real-time multi-parametric sheet metal forming problems. *International Journal of Material Forming*. 2013. Pp. 1–22.
 20. Ищенко О. А., Демина Н. А., Грабовский А. В. и др. Моделирование напряженно-деформированного состояния базовых плит разделительных штампов. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. Москва, 2012. №9. С. 40–44.
 21. Ищенко О. А. Контактное взаимодействие элементов штампов для разделительных операций. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2013. № 1. С. 93–96.
 22. Ткачук Н. А., Ищенко Н. А., Ткачук Н. Н. и др. Расчетно-экспериментальное исследование элементов штамповой оснастки. *Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*. 2017. № 3 (24Е). С. 11–19.
 23. Ткачук Н. А., Демина Н. А., Сердюк Ю. Д. и др. Моделирование контактного взаимодействия элементов штамповой оснастки. *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. Краматорск: ДГМА*, 2010. № 2 (23). С. 240–248.
 24. Ткачук Н. Н., Мовшович И. Я., Ткачук Н. А. и др. Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие соотношения. 3. Прямой и вариационный методы решения задачи негерцевского нормального контакта гладких тел. 4. Модель контакта шероховатых тел. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. Москва: ООО "Тисо Принт"*, 2014. № 4. С. 3–8.
 25. Ткачук Н., Скрипченко Н., Ткачук Н., Грабовский А. Численные методы контактного анализа корпусов сложной формы с учетом нелинейных промежуточных слоев. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. Том 5, № 7 (95). С. 22–31.
- References (transliterated)**
1. Tarasov A. F., Korotkij S. A. Vlijanie konstrukcii shtampa na deformatsiju jelementov bloka i rabocheho instrumenta [Influence of stamp design on deformation of block elements and working tool]. *Udoskonalennja procesiv i obladnannja obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni. Tem. zb. nauk. prac'*. Kramatorsk: DDMA Publ., 2004, pp. 103–108.
 2. Zajamenko E. I. *Razrabotka matematicheskikh modelej i raschety na prochnost' razdelitel'nyh perenalazhivaemyh shtampov: diss... doktora tehn. nauk. 01.02.06 i 05.03.05*: [Development of mathematical models and strength calculations of dividing returnable diesspec. Dr. eng.sci.diss.]. Har'kov, 1992. 280 p.
 3. Byh A. I., Kuznecova L. G., Movshovich A. Ja. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie vyrubnyh matric specializirovannyh perenalazhivaemyh shtampov [Stress-strain state of cutting matrices of specialized readable stamps]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2004, No8, pp. 30–33.
 4. Zajamenko E. I., Tkachuk A. V., Tkachuk N. A. Issledovanie kontaktnogo vzaimodejstvija puansona so shtampuemym materialom [The study of the contact interaction of the punch with the stamped material]. *VOT. Serija 2*. 1985, vyp.10 (176), pp. 20–23.
 5. Movshovich I. Ja., Frolov E. A., Bondar' O. V. i dr. Issledovanie parametrov tochnosti sborki universal'no-sbornoj perenalazhivaemoj osnastki [Investigation of the accuracy parameters of the assembly of the universal modular retrofitted rig]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013, No. 5, pp. 17–21.
 6. Matvijchuk V. A., Mihalevich V. M., Alieva L. I. Ocenka deformiruемости materiala zagotovok, poluchennyh otdeleniem metodami plasticheskogo sdviga [Evaluation of the deformability of the material of the workpieces obtained by separation by the methods of plastic shear]. *Obrabotka materialov davleniem*. 2013, No. 4 (37), pp. 16–22.
 7. Dragobekij V. V., Trocko O. V., Shlyk S. V. Rasshirenie vozmozhnostej modelirovanija processa slozhnoj vytjazhki [Expansion of possibilities for modeling a complex extraction process]. *Obrabotka materialov davleniem*. 2012, No. 2 (31), pp. 30–34.
 8. Voroncov A. L. Opisanie deformacij pri analize processov obrabotki metallov davleniem. Ch. 1. Stepen' deformacii i nakoplenaja deformacija [Description of deformations in the analysis of metal forming processes. Part 1. The degree of deformation and accumulated deformation]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013, No. 1, pp. 3–8.
 9. Voroncov A. L. Opisanie deformacij pri analize processov obrabotki metallov davleniem. Chast' 2. Vyjavlenie zon s razlichnym deformirovannyim sostojaniem [Description of deformations in the analysis of metal forming processes. Part 2. Identification of zones with different deformed state]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013, No. 2, pp. 3–7.
 10. Voroncov A. L. Opisanie deformacij pri analize processov obrabotki metallov davleniem. Chast' 3. Deformirovannoe sostojanie i uchety uprochnenija pri osadke i vdavlivanii v poluprostranstvo [Description of deformations in the analysis of metal forming processes. Part 3. Deformed state and consideration of hardening during upsetting and indentation into a half-space]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013, No. 3.
 11. Shibakov V. G., Muljukov R. I., Vil'danov I. Z. Razrabotka konstruktorsko-tehnologicheskoi modeli detali dlja SAPR TP obrabotki metallov davleniem [Development of a design-technological model of a part for CAD of metal forming]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013, No. 8, pp. 15–20.
 12. Tarasov A. F., Kolesnikova G. V., Spaskaja A. M. i dr. Regressionno-matematicheskoe modelirovanie jenergosilovyh parametrov processa holodnoj prokatki [Regression-mathematical modeling of the power parameters of the cold rolling process]. *Obrabotka materialov davleniem*. 2010, No. 2(23), pp. 72–78.
 13. Tarasov A. F., Korotkij S. A. Modelirovanie razdelitel'nyh operacij na osnove ocenki stepeni ispol'zovanija resursa plastichnosti materiala v srede sistemy konechno-jelementnogo analiza ABAQUS [Simulation of separation operations based on the assessment of the degree of utilization of the material plasticity resource in the environment of the system of finite element analysis ABAQUS]. *Novi materiali ta tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni: nauk. zhurnal. Zaporizhzhja*: 2010, No. 1, pp. 114–117.
 14. Alieva L. I., Borisov R. S., Savchinskij I. G. Metodika rascheta i proektirovanija processov vydavlivanija v razjomnyh matricah [Method of calculation and design of extrusion processes in split matrices]. *Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej, V miedzynarodowa konferencja naukowa: Seria Metalurgia*, Czestohowa: Wipmifs, 2004, pp. 383–391.
 15. Popat P. B., Ghosh A., Kishore N. N. Finite – element analysis of the blanking process. *Journal of Mechanical Working Technology*. Amsterdam. 1989, vol. 18, No. 3, pp. 269–282.
 16. Mihalenko F. P., Guliev A. I. Zakonomernosti raspredelenija intensivnosti naprjazhenij i deformacij po pojasku smjatija pri vyrubke-probivke [Patterns of stress intensity and strain distribution along the belt of collapse during cutting-punching]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo*. 1989, No. 12, pp. 17–19.
 17. Shibakov V. G., Pankratov D. L., Vinogradov A. I. i dr. Sistema avtomatizirovannogo rascheta tehnologicheskikh svojstv metalla v processah razdelitel'nyh operacij listovoj shtampovki [The system of automated calculation of the technological properties of the metal in the processes of separation of sheet metal stamping]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2015, No. 4, pp. 36–40.
 18. Oujebbour F.-Z., Habbal A., Ellaia R., Zhao Z. Multicriteria shape design of a sheet contour in stamping. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2014, vol. 1, No. 3, pp. 187–193.
 19. Hamdaoui M., Le Quilliec G., Breitkopf P., Villon P. POD surrogates for real-time multi-parametric sheet metal forming problems. *International Journal of Material Forming*. 2013, pp. 1–22.

20. Ishhenko O. A., Demina N. A., Grabovskij A. V. i dr. Modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya bazovyh plit razdelitel'nyh shtampov [Simulation of the stress-strain state of the base plates separation dies]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. Moskva, 2012, No. 9, pp. 40–44.
21. Ishhenko O. A. Kontaknoe vzaimodejstvie jelementov shtampov dlja razdelitel'nyh operacij [Contact interaction of stamp elements for separation operations]. *Novi materialy` i tehnologiji v metalurgiji ta mashy`nობუდვანი*. 2013, No. 1, pp. 93–96.
22. Tkachuk N. A., Ishhenko O. A., Tkachuk N. N. i dr. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie jelementov shtampovoj osnastki [Computational and experimental study of elements of die tooling]. *Nauchnyj Vestnik Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii*. 2017, No. 3 (24E), pp. 11–19.
23. Tkachuk N. A., Demina N. A., Serdjuk Ju. D. i dr. Modelirovanie kontaktnogo vzaimodejstvija jelementov shtampovoj osnastki [Simulation of the contact interaction of elements of die tooling]. *Obrabotka materialov davleniem: sb. nauch. tr. Kramatorsk: DGMA*, 2010, No. 2 (23), pp. 240–248.
24. Tkachuk N. N., Movshovich I. Ja., Tkachuk N. A. i dr. Analiz kontaktnogo vzaimodejstvija gladkih i sherohovatyh tel metodom granichnyh jelementov: modeli i razreshajushhie sootnosheniya. 3. Prjamoj i variacionnyj metody reshenija zadachi negercevsogo normal'nogo kontakta gladkih tel. 4. Model' kontakta sherohovatyh tel [Analysis of the contact interaction of smooth and rough bodies by the method of boundary elements: models and resolving relations. 3. Direct and variational methods for solving the problem of the non-Hertz normal contact of smooth bodies. 4. Model of contact of rough bodies]. *Kuznechno-shtampovocnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. Moscow: OOO "Tiso Print"*. 2014, No. 4, pp. 3–8.
25. Tkachuk N., Skripchenko N., Tkachuk N., Grabovskij A. Chislennye metody kontaktnogo analiza korpusov slozhnoj formy s uchetom nelinejnyh interfejsnyh sloev [Numerical methods for contact analysis of buildings of complex shape, taking into account nonlinear interface layers]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. 2018. Vol 5, No. 7 (95), pp. 22–31.

Надійшла (received) 22.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, Tkachuk Mykola Anatoliyivich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Ищенко Ольга Анатоліївна (Ищенко Ольга Анатольевна, Ishchenko Olha Anatoliyivna) – Таврійський державний агротехнологічний університет, старший викладач кафедри вищої математики та фізики; м. Мелітополь, Запорізька обл., Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5274-2618>; E-mail: olha.ishchenko@tsatu.edu.ua.

Дьоміна Наталія Анатоліївна (Дёмина Наталья Анатольевна, Diomina Natalia Anatoliyivna) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Таврійський державний агротехнологічний університет, доцент кафедри вищої математики та фізики; м. Мелітополь, Запорізька обл., Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1118-1834>; E-mail: natalia.domina@tsatu.edu.ua.

Ткачук Микола Миколайович (Ткачук Николай Николаевич, Tkachuk Mykola Mykolayovych) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший науковий співробітник кафедри інформаційних технологій та систем колісних і гусеничних машин імені О.О. Морозова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>; e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org

Грабовський Андрій Володимирович (Грабовский Андрей Владимирович, Grabovskiy Andrey Vladimirovich) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.

Шеманська Вікторія Вікторівна (Шеманская Виктория Викторовна, Shemanska Viktoria Viktorivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка, м. Харків, Україна; e-mail: s1605@tmm-sapr.org.

Васильченко Дар'я Романівна (Васильченко Дарья Романовна, Vasilchenko Darja Romanivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка, м. Харків, Україна; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

УДК 628.16:621.981.3

О. І. ТРИШЕВСЬКИЙ, М. В. САЛТАВЕЦЬ**ИНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ПРОГРЕСИВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ ЛИСТА**

Представлена покрокова інженерна методика проектування прогресивного технологічного процесу гарячої прокатки тонкого листа товщиною до 0,7 мм. Відмінною рисою нової технології є використання прискореного охолодження смуги між чорною і чистою групами клітей прокатного стану. Методика базується на створених математичних моделях теплового стану смуги і валків, їх прискореного теплообміну з навколишнім середовищем і водою на ділянці надшвидкісного охолодження. Розроблені математичні моделі дозволяють провести оптимізацію нового техпроцесу і забезпечити можливість скорочення часу випуску готової продукції і економію енергетичних витрат.

Ключові слова: тонкий лист, гаряча прокатка, прискорене охолодження, робочі валки, тепловий стан, математичне моделювання, теплообмінні процеси, форсунка.

О. И. ТРИШЕВСКИЙ, Н. В. САЛТАВЕЦ**ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРЕССИВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ЛИСТА**

Представлена пошаговая инженерная методика проектирования прогрессивного технологического процесса горячей прокатки тонкого листа толщиной до 0,7 мм. Отличительной чертой новой технологии является использование ускоренного охлаждения полосы между черновой и чистой группами клетей прокатного стана. Методика базируется на созданных математических моделях теплового состояния полосы и валков, их ускоренного теплообмена с окружающей средой и водою на участке сверхскоростного охлаждения. Разработанные математические модели позволяют провести оптимизацию нового техпроцесса и обеспечить возможность сокращения времени выпуска готовой продукции и экономии энергетических затрат.

Ключевые слова: тонкий лист, горячая прокатка, ускоренное охлаждение, рабочие валки, тепловое состояние, математическое моделирование, теплообменные процессы, форсунка.

О. I. TRISHEVSKY, M. V. SALTAVETS**ENGINEERING METHOD OF PROJECTING PROGRESSIVE TECHNOLOGICAL PROCESS OF HOT LINE SHEET**

A step-by-step engineering technique for designing a progressive hot rolling process for a thin sheet up to 0.7 mm thick is presented. A distinctive feature of the new technology is the use of accelerated cooling of the strip between the rough and the finishing groups of the rolling mill stands. The technology is based on a complex of theoretical, experimental, and industrial studies of heat exchange processes between the rolled strip and rolls using their accelerated cooling, carried out over the years by the Ukrainian Metals Research Institute and the P. Vasilenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. The technique is based on the created mathematical models of the thermal state of the strip and rolls, their accelerated heat exchange with the environment and water in the section of ultrafast cooling. The developed mathematical models make it possible to optimize the new process technology and to ensure the possibility of reducing the time of production of finished products and save energy costs. The method involves calculating the total amount of water needed to cool the rolls for rolling strips of maximum and minimum widths, the amount of water for the ultra-rapid cooling installation and the installation for heat treating the metal from the rolling heating, the total required number of nozzles, and also allows you to calculate the number of solenoid valves nozzles.

Keywords: thin sheet, hot rolling, speed-up cooling, working felling, thermal state, mathematical design, heat-exchange processes, nozzles.

Вступ. Вимоги сучасного ринку листопрокатної продукції диктують необхідність підвищення конкурентоспроможності виробленого листа за рахунок зниження його собівартості без втрати якості. Зокрема, це спонукає металургів шукати нові технологічні схеми прокатки тонкого гарячекатаного листа, який за якістю і рівнем властивостей не поступається або наближається до гарячекатаного. Так, відносно недавно з'явився новий технологічний процес прокатки, сутність якого полягає у використанні системи прискореного охолодження полоси між чорною та чистою групами клітей листопрокатного стану, а також прискореного охолодження полоси за чистою групою з метою отримання гарячекатаної полоси товщиною до 0,7 мм. Але, нажаль, до цього часу невирішеною залишається проблема охолодження полоси і валків при мінімумі розходу енергії, що дозволило би більш ефективно використовувати існуюче обладнання для здійснення нового технологічного процесу. Тому завдання, пов'язані з удосконаленням технологічних процесів прокатки тонколистової сталі, зокрема, раціонального охолодження смуги і валків при мінімальному

витрачання енергії з метою зниження собівартості є важливими і актуальними.

Аналіз стану питання, основних досягнень і літератури. Аналіз технічного стану обладнання заводів України і технологій виготовлення полоси на цих заводах і порівняння існуючого обладнання з обладнанням і технологіями сучасного виробництва гарячої полоси за кордоном показали наступне:

1. У промислово розвинених країнах (Німеччина, Японія, Франція, Канада, США, Італія, Південна Корея) проводяться дослідження технології прокатного виробництва гарячекатаної полоси з метою скорочення витрат на виробництво тони прокату (економія палива, електроенергії, металу) за рахунок скорочення часу технологічного процесу. Для досягнення цієї мети, на основі математичного моделювання технологічного процесу з уточненням окремих положень під час натурних експериментів, створено ливарно-прокатні агрегати.

Але, наведена в технічній літературі інформація, про досягнення в розробці нових технологій, має рекламний характер, або такий, що вводить в оману і

не може бути використаний для розробки обладнання і технологій.

2. На Україні обладнання і технологія прокатки полоси були створені відповідно до вимог часу їх побудови, із застосуванням злитків великих розмірів при мінімумі обладнання. Така технологія потребує неодноразового нагріву прокату і внаслідок цього відзначається великими витратами енергії на виробництво тони прокату.

3. Технології прокатки полоси на Україні потребують докорінних змін з урахуванням вимог економії енергії для зменшення собівартості готової окалини;

4. Реальні практичні рекомендації щодо удосконалення технології прокатки тонкого гарячекатаного листа з використанням прискореного охолодження полоси між чорною та чистою групами клітей листопрокатного стану, а також прискореного охолодження полоси за чистою групою клітей відсутні.

Матеріали досліджень. З урахуванням вищевикладеного та з метою розширення сортаменту, підвищення ефективності і забезпечення економії матеріальних ресурсів при виробництві листового металопрокату шляхом удосконалення охолодження полоси і валків на протязі ряду років спочатку в Українському науково-дослідному інституті металів, а потім у Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. П.Василенка був виконаний комплекс теоретичних, експериментальних та промислових досліджень процесів теплообміну між валками та полою при виготовленні тонколистового прокату.

При проведенні цих досліджень необхідно було вирішити наступні задачі:

1. Розробити математичні моделі теплового стану полоси при прокатці

2. Створити математичні моделі теплового стану валка з метою його оптимізації і забезпечення можливості довгострокової роботи валка при безперервній прокатці.

3. Виконати теоретичні дослідження теплообміну полоси, що прокатується, з оточуючим середовищем і водою на ділянці надшвидкісного охолодження, з метою скорочення часу випуску готової продукції і економії енергетичних витрат.

4. Провести теоретичні дослідження теплообміну полоси з прокатними валками і впливу охолодження на тепловий стан валків.

5. Зробити порівняння результатів експериментальних вимірів температури поверхні металу на реально працюючих прокатних станах України з даними, отриманими теоретично.

В результаті виконання усього комплексу згаданих досліджень:

– були розроблені математичні моделі теплового стану полоси від входу в чорну групу клітей до змотування готової полоси у рулон. З допомогою цих моделей проведені теоретичні дослідження теплообміну в системі полоса – валок – окалина, а також силових параметрів процесу прокатки;

– отримані результати були порівняні з даними виконаних експериментальних досліджень, а також з результатами експериментальних досліджень, проведеними іншими дослідниками. Оцінка достовірності одержаних результатів показала, що використання розроблених математичних моделей для інженерних розрахунків систем керування тепловим станом металу та валків правомірне, бо максимальна похибка обчислень температури і тиску металу на валкі не перевищує, відповідно, 2,1% та 6,8%.

– отримані на основі теоретичних та експериментальних досліджень дані дали змогу рекомендувати найбільш раціональну систему охолодження валків та полоси форсунками, розрахувати їх необхідну кількість, а також визначити ширину зони ефективної дії води з форсунки;

– на основі виконаного комплексу досліджень і математичного моделювання технологічного процесу розроблена нова удосконалена технологія гарячої прокатки полоси при мінімумі енергетичних витрат за рахунок керування тепловим станом металу і валків та їх раціонального охолодження.

Наукові результати, отримані при проведенні згаданих досліджень, неодноразово публікувались у вітчизняній та закордонній науково-технічній літературі, але у зібраному зручному виді, як універсальна методика розрахунку та проектування нової технології ще не були представлені.

Інженерна методика проектування прогресивного технологічного процесу гарячої прокатки листа. З урахуванням визначених мінімальних допустимих геометричних розмірів заготовки для прокатки в чорновій групі виходячи з проектної потужності прокатного стану при проектуванні нового технологічного процесу прокатки листа згідно з розробленою методикою необхідно:

1. За допомогою розробленої математичної моделі [1–4] визначити тепловий стан металу при мінімальній кількості прокатних клітей в чистовій і чорновій групах.

2. Визначити тиск металу на валки і порівняти його з тиском на валки, який допускає конструкція клітей, що використовуються [5].

3. Якщо тиск металу на валки в деяких клітях перевищує допустимий змінити режим обтиснень і повторити пункти 1 і 2.

4. Якщо і після цього коректування (виконаного може і декілька разів) – тиск на валки перевищує допустимий, необхідно передбачити встановлення ще однієї кліті (в чорновій або чистовій групі).

Зауваження загального плану. Стала температура валка приймається в залежності від місця де вже встановлено або буде встановлено прокатне обладнання (Україна, Африка, Азія). Дані про сталу температуру валка потрібні при обчисленні теплового стану металу. Температура води, що йде на охолодження, приймається на 15°C більшою ніж середньомісячна температура в літній період. Це пов'язано з використанням градирень для охолодження оборотної води.

5. Обчислити системи охолодження валків для кожної кліті, використовуючи математичну модель валка з розробленим, програмним забезпеченням, та

урахуванням фактичних розмірів зон деформації. Розрахунки

необхідно проводити для випадку прокатки листа найбільшої ширини [6].

6. Визначити необхідну кількість форсунок в ряду (у напрямку поперечному вісі валка), для забезпечення стабілізації теплового режиму роботи валка впродовж одного оберту [6 – 7].

7. Визначити кількість форсунок в ряду (паралельному вісі валка), в залежності від ширини металу, що прокатується і ширини зони дії струменю з однієї форсунки [7].

8. Визначити загальну кількість форсунок, що розташовані на колекторах однієї кліти. Це кількість форсунок в ряду поперечному вісі валка (п.6.) помножена на кількість форсунок в ряду паралельному вісі валка (п.7).

Тип форсунок, їх кількість і розташування на колекторах для охолодження верхнього і нижнього валків може бути різними.

9. Обчислити кількість електромагнітних клапанів для відключення форсунок при прокатці листів ширини меншої за максимальну і необхідної електричної арматури для керування групами електромагнітних клапанів.

10. Після визначення загальної кількості форсунок для одного типорозміру листа повторно виконуються п.6–9. для всього сортаменту листа, що проектується прокатувати.

11. Обчислити загальну кількість води, яка необхідна для охолодження валків при прокатці листів найбільшої ширини. Це похідні дані для вибору насосів на ділянку підготовки оборотної води.

12. Обчислити кількість води, що необхідна для охолодження валків при прокатці листів найменшої ширини. Це похідні дані для вибору схеми регулювання тиску в системі подачі води. Для забезпечення стабільної роботи системи охолодження можливі два варіанти. Один – тиристорне регулювання тиску в системі подачі води [8]. Другий – використання насосу, що забезпечить необхідний тиск перед форсунками.

13. Провести оцінку економічної ефективності обох варіантів – тиристорного, а також варіанту з використанням насосу без тиристорного регулювання. Оцінка виконується, як по вартості обладнання, так і по кількості електроенергії, що буде використана на ділянці підготовки води впродовж року при прокатці сортаменту, що планується для випуску на виробництві.

Для обчислення кількості води на установку надшвидкісного охолодження, яка розташована між чорною і чистою групами клітей необхідно виконати пункти подібні до п.п.6.-13., з урахуванням того, що у цьому випадку охолоджуються не валки, а лист металу, що прокатується.

14. Визначити необхідну кількість форсунок, встановлених над листом вздовж вісі прокатки, які забезпечать зниження його температури до значення, передбаченого технологією прокатки листа в чистовій групі. Визначається на основі досліджень, наведених у роботах [9, 7].

15. В залежності від ширини металу, що прокатується і ширини зони дії струменю однієї форсунки, визначити кількість форсунок в ряду, розташованому перпендикулярно вісі прокатки [7].

16. Визначити загальну кількість форсунок, що розташовані над листом. Це кількість форсунок в ряду вздовж вісі прокатки (п. 14) помножена на кількість рядів, що розташовані перпендикулярно вісі прокатки (п. 15).

17. Визначити загальну кількість форсунок, що розташовані для охолодження листа знизу. (Виконується подібним чином, як за п. 14.-16. з урахуванням значень коефіцієнту тепловіддачі при подачі води знизу; див. підрозділ [7].

18. Після визначення загальної кількості форсунок для одного типорозміру листа повторно виконуються п. 14.-17. для всього сортаменту листа, що проектується прокатувати.

Оскільки при прокатці листа менших максимальної ширини необхідно відключати форсунки, які не використовуються, необхідно повторити виконання етапів згідно з п.9. – 13.

19. Для обчислення кількості води на установку надшвидкісного охолодження, яка розташована за чистою групою клітей перед моталками, повторюється виконання п. 14–18.

20. Для обчислення кількості води на установку термообробки металу з прокатного нагріву, яка розташована за чистою групою клітей, повторно виконуються п. 14–18. з метою забезпечення режиму термообробки, передбаченого технологією.

21. Для обчислення кількості води на установки гідрозмиву окалини, які необхідно встановити в потоці стана повторно виконуються п. 14–18. методики, з урахуванням даних про кількість води, що подається на одну форсунку гідрозмиву.

Таким чином, на основі комплексу досліджень, виконаних в Українському науково-дослідному інституті металів та Харківському національному технічному університеті сільського господарства ім. П.Василенка, розроблена сучасна інженерна методика проектування прогресивного технологічного процесу гарячої прокатки листа. Вона може бути використана як для удосконалення технологічного процесу прокатки на діючому обладнанні із зниженням енергетичних витрат, так і при розробці перспективного обладнання п'ятого покоління для обробки металів тиском.

Список літератури

1. Trishevskii O.I., Saltavets N.V. Mathematical model of the thermal state of strip in rolling // Steel in translation, 2009 – №2, Vol. 39 – P.42–44. Allerton Press Inc.
2. Trishevskii O.I., Saltavets N.V. Thermal state of strip in ultrafast cooling // Steel in translation, 2015 – №6, Vol. 45 – P.443–446. Allerton Press Inc.
3. Тришевський О.І., Салтавець М.В. Дослідження теплового стану штаби при прокатці // Вісник ХНТУСГ «Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві». – вип. 122, Харків, 2012. – С. 138–146.
4. Тришевский О.И., Салтавец Н.В. Теоретические исследования теплового состояния рабочих валков при горячей прокатке листа. // Сталь, 2012. – №9. – С. 81–84.
5. Тришевський О.І., Салтавець М.В. Підвищення точності оцінки зусиль на валки від штаби, що прокатується. // Вісник національного технічного університету (ХП) «Нові рішення в

- сучасних технологіях». – вип.42(1015), Харків, 2013. – С. 167–174.
6. Тришевський О.І., Салтавец М.В., Бодаренко С.М. Аналіз теплового стану валків гарячої прокатки при існуючих та перспективних схемах їх охолодження. // Вестник Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). – С. 199–204.
 7. Тришевський О.І., Салтавец Н.В., Бодаренко С.Н. Экспериментальные исследования охлаждения полосы в валках. // Вестник национального технического университета «ХПИ» «Новые решения в современных технологиях». – вып.47, Харьков, 2011. – С.63–69.
 8. Компоненты систем энергоснабжения и автоматизации в промышленности: Каталог продукции. – Киев: ООО «СВ АЛТЕРА», 2001. – 61 с.
 9. Тришевський О.І., Салтавец Н.В. Математическое моделирование теплового состояния полосы при использовании сверхскоростного охлаждения. // Сталь, 2015. – №6. – С. 31–34.
 4. Trishevskij O.I., Saltavec N.V. Teoreticheskie issledovaniya teplovogo sostoyaniya rabochih valkov pri goryachej prokatke lista. // Stal', 2012. – No9. – P. 81–84.
 5. Trishevskij O.I., Saltavec M.V. Pidvishchennya tochnosti ocinki zusuil' na valki vid shtabi, shcho prokatuet'sya. // Visnik nacional'nogo tekhnichnogo universitetu (HPI) «Novi rishennya v suchasnih tekhnologiyah». – vip.42(1015), KHarkiv, 2013. – P. 167–174.
 6. Trishevskij O.I., Saltavec M.V., Bodarenko S.M. Analiz teplovogo stanu valkiv garyachoi prokatki pri isnuyuchih ta perspektivnih skhemah ih oholodzhennya. // Vestnik nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta «HPI» «Novye resheniya v sovremennyh tekhnologiyah». – 2012. – №47(953). – P. 199–204.
 7. Trishevskij O.I., Saltavec N.V., Bondarenko S.N. Eksperimental'nye issledovaniya ohlazhdeniya polosy v valkah. // Vestnik nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta «HPI» «Novye resheniya v sovremennyh tekhnologiyah». – vyp.47, Har'kov 2011. – P. 63–69.
 8. Komponenty sistem ehnergosnabzheniya i avtomatizacii v promyshlennosti: Katalog produkcii. – Kiev: ООО «SV AL'TERA», 2001. – 61 p.
 9. Trishevskij O.I., Saltavec N.V. Matematicheskoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya polosy pri ispol'zovanii sverhskorostnogo ohlazhdeniya. // Stal', 2015. – No 6. – P. 31–34.

References (transliterated)

Надійшла (received).22.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Тришевський Олег Ігорович (Тришевский Олег Игоревич, Trishevskiy Oleh Igorovich) – доктор технічних наук, професор, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім.Петра Василенка, завідувач кафедри «Технологія матеріалів», тел. 050-407-26-11, E-mail: 3shev@ukr.net.

Салтавец Микола Вільямович (Салтавец Николай Вильямович, Saltavec' Nikolay Vil'yamovich) Харківський національний технічний університет сільського господарства ім.Петра Василенка, інженер, тел. 7-164-153.

УДК 621.7

*А. М. ФЕДОТЬЄВ, С. В. ШКЕЛЬ***ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СОБІВАРТОСТІ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ МЕТОДОМ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ГВИНТОВОЮ ЕКСТРУЗИЄЮ**

Гомогенізацію алюмінієвих сплавів традиційно проводять при температурі 450-560°C кілька годин для отримання однорідної структури. Однак можна проводити гомогенізацію матеріалів методом гвинтової екструзії. Спроби застосувати цей підхід в екструзійному виробництві довгомірних профілів стикаються з низкою серйозних проблем. Показали можливість проведення гвинтової екструзії циліндричної заготовки від діаметра 150 мм до діаметра 127 мм. Порівняли питому собівартість процесів гомогенізації методами нагрівання у печі та гвинтової екструзії. Зробили висновки щодо ефективності гомогенізації методом гвинтової екструзії.

Ключові слова: пластична деформація, гвинтова екструзія, гомогенізація, питома собівартість.

*А. Н. ФЕДОТЬЄВ, С. В. ШКЕЛЬ***ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОЦЕССА ГОМОГЕНИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦИИ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИЕЙ**

Гомогенизацию алюминиевых сплавов обычно проводят при температуре 450-560°C несколько часов для получения однородной структуры. Однако можно проводить гомогенизацию материалов методом винтовой экструзии. Попытки применить этот подход в экструзийном производстве длинномерных профилей сталкиваются с рядом серьезных проблем. Показали возможность проведения винтовой экструзии цилиндрической заготовки от диаметра 150 мм до диаметра 127 мм. Сравнили удельную себестоимость процессов гомогенизации методами нагрева в печи и винтовой экструзии. Сделали выводы относительно эффективности гомогенизации методом винтовой экструзии.

Ключевые слова: пластическая деформация, винтовая экструзия, гомогенизация, удельная себестоимость.

*A. M. FEDOTIEV, S. V. SHKEL***ECONOMIC ASSESSMENT OF THE TECHNOLOGICAL COSTS OF THE GOMOGENIZATION PROCESS OF ALUMINUM ALLOYS BY THE METHOD OF DEFORMATION BY SCREW EXTRUSION**

Homogenization of aluminum alloys is traditionally carried out at a temperature of 450-560°C for several hours to obtain a homogeneous structure. However, it is possible to homogenize the materials by twist extrusion. Attempts to apply this approach to the extrusion production of long-term profiles face a number of serious problems. They showed the possibility of twist extrusion of cylindrical billet from a diameter of 150 mm to a diameter of 127 mm. In this case, the workpiece at the outlet has no distortion, and the equivalent deformation, across its cross-section, exceeds 2. In order to evaluate the methods of homogenization and the choice of the most economically efficient, the specific cost of homogenization processes was compared with the methods of heating in the furnace and twist extrusion. It includes costs that are directly related to the operation of a particular product. We made conclusions about the efficiency of homogenization by twist extrusion: the costs of the traditional homogenization process make up 6.85 UAH / kg, while the HPD process (homogenization by plastic deformation) is 0.37 UAH / kg. We see that the process HPD 94.6% more efficient than the traditional homogenization technology. In addition, the total time for homogenization of the HPD is lower during the time of homogenization in the traditional way by 78.6%.

Keywords: plastic deformation, screw extrusion, homogenization, specific cost.

Вступ. Гвинтова екструзія, як метод інтенсивної пластичної деформації дозволяє отримувати матеріали з мікрокристалічною структурою та підвищеним рівнем властивостей за значно коротший проміжок часу [1] у порівнянні із нагріванням матеріалів у печах.

Відомо [2], що для фізичного моделювання процесу потрібно виготовити серію матриць, за допомогою індукційної печі нагрівати заготовку та проводити екструзію із використанням гідравлічного преса із зусиллям 2500 т. Такий підхід потребує значних коштів, тому доцільніше провести дослідження методом комп'ютерного моделювання процесу екструзії. Для цього розробили тривимірну модель матриці (рис. 1), провели серію досліджень та отримали результати (рис. 2), в яких показана можливість виконання гвинтової екструзії циліндричної заготовки від діаметра 150 мм до діаметра 127 мм [3, 4]. При цьому, заготовка на виході не має викривлень, а еквівалентна деформація, по всьому її поперечному перерізу, перевищує 2.

Показана можливість гомогенізації шляхом гвинтової екструзії потребує економічної оцінки.

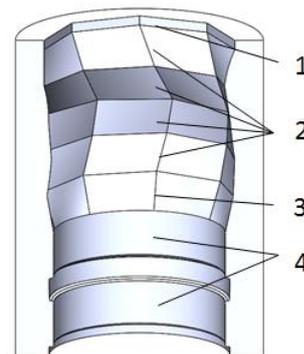


Рис. 1 – Тривимірна модель матриці з восьмигранним гвинтовим каналом (ГК):

- 1 – зона входження матеріалу із контейнера в матрицю;
- 2 – гвинтова ділянка (ГД);
- 3 – ділянка створення протитиску для ГД;
- 4 – калібрувальна ділянка.

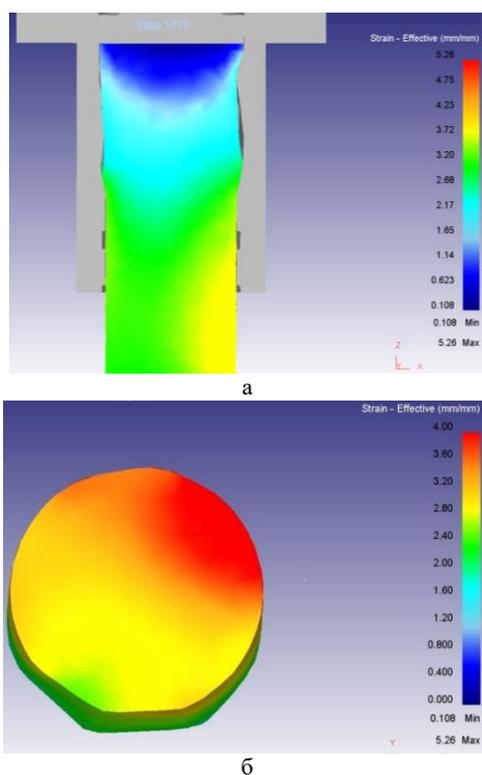


Рис. 2 – Результати комп'ютерного моделювання процесу GE:
а – повздовжній переріз матриці із деформованим матеріалом,
б – переріз заготовки на виході із матриці

Постановка задачі. Для оцінки методів гомогенізації і вибору найбільш економічно ефективного можна порівняти технологічну собівартість відомих методів. Вона включає витрати, які мають безпосереднє відношення до виконання операцій над певним виробом.

У роботі буде порівняно два методи гомогенізації: пропонується метод гвинтової екструзії, та нагрівання й витримка заготовки у печі.

До процесу гомогенізації в печі нагрівають заготовку та комплект оснащення, в який входять матриця, контейнер та обойма, а потім проводять процес гомогенізації одним із вищезгаданих методів.

Технологічну собівартість гомогенізації пластичною деформацією (ГПД) розраховуємо за формулою:

$$C_T = C_{GE} + C_{PЗ} + C_{PKO}, \quad (1)$$

Таблиця 1 – Початкові дані для розрахунку

Позначення	Найменування	Розмірність	Значення
m_z	маса заготовки	кг	28,72
$m_{ко}$	маса комплекту оснащення	кг	930,78
H_0	висота заготовки	мм	600
V_{np}	швидкість пресування	мм/с	10
σ_m	межа текучості сплаву Al6063 АД31 за нормованими механічними властивостями згідно стандарту EN755-2	МПа	65
$\delta_{деф}$	середнє значення степеня деформації за результатами моделювання процесу GE за допомогою програми Deform 3D	МПа	2,55
$\mu_{тр}$	коефіцієнт тертя алюмінію по сталі		0,4

де C_{GE} – собівартість процесу гвинтової екструзії (GE);

$C_{PЗ}$ – собівартість розігріву заготовки;

C_{PKO} – собівартість розігріву комплекту оснащення.

Розраховуємо собівартість процесу GE за формулою:

$$C_{GE} = N_{GE} \cdot C_e \cdot t, \quad (2)$$

де N_{GE} – потужність процесу GE;

C_e – вартість електроенергії;

t – час, за який відбувається процес GE.

Питома собівартість розраховується за формулою:

$$C_n = \frac{C_T}{m}, \quad (3)$$

де m – маса заготовки.

Час процесу t розраховується за формулою:

$$t = \frac{H}{V}, \quad (4)$$

де H – висота заготовки;

V – швидкість пресування.

Потужність пресування визначаємо за формулою [4]:

$$N_{GE} = F_{GE} \cdot V = (F_{np} + F_{тр}) \cdot V, \quad (5)$$

де F_{GE} – сила процесу GE;

F_{np} – сила пресування;

$F_{тр}$ – сила тертя.

$$F_{np} = \sigma_m \cdot \delta_{деф} \cdot S_{поршня}, \quad (6)$$

де σ_m – межа текучості сплаву Al6063 АД31 за нормованими механічними властивостями згідно стандарту EN755-2;

$\delta_{деф}$ – середнє значення степеня деформації за результатами моделювання процесу GE за допомогою програми Deform 3D [2];

$S_{поршня}$ – площа поршня циліндра.

$$F_{тр} = \sigma_m \cdot \mu_{тр} \cdot S_{боз}, \quad (7)$$

де $\mu_{тр}$ – коефіцієнт тертя алюмінію по сталі;

$S_{боз}$ – площа бокової поверхні заготовки.

Дані для розрахунку заносимо у табл. 1.

Собівартість розігріву заготовки (C_3) та собівартість розігріву комплексу оснащення ($C_{КО}$) можна оцінити за формулою:

$$C = V_{CH_4} \cdot C_{CH_4} \quad (8)$$

Ринкова вартість 1 м³ метану, $C_{CH_4} = 19,98 \text{ грн} / \text{м}^3$.

Приймаємо метод нагрівання в камерній печі за допомогою теплоти згорання газоподібного природного палива. Прийнята методика розрахунку наведена у спеціалізованій літературі [5].

Результати розрахунку витрати пального й показників собівартості процесу нагрівання заготовки і елементів оснащення наведено в табл. 2.

Таким чином остаточні результати розрахунків собівартості процесу ГПД приведені у табл. 3.

Таблиця 2 – Результати розрахунку витрати пального й показників собівартості процесу нагрівання заготовки і елементів оснащення

Позначення	Найменування	Розмірність	Значення
M	кількість метану для нагрівання заготовки і елементів оснащення	кг	7,23
V_{CH_4}	кількість метану для нагрівання заготовки і елементів оснащення	м ³	10,08
$C_H = C_3 + C_{КО}$	собівартість нагрівання заготовки і елементів оснащення	грн	201,4
C_H^n	питома собівартість нагрівання	грн / кг	0,21

Таблиця 3 – Результати розрахунків собівартості процесу ГПД

Позначення	Найменування	Розмірність	Значення
$S_{боз}$	площа бокової поверхні заготовки	мм ²	376800
$F_{тр}$	сила тертя	кН	9801,08
$F_{пр}$	сила пресування	кН	5207,2
$F_{ГЕ}$	сила процесу ГЕ	кН	15009
$F_{ГЕ}$	сила процесу ГЕ	т	1500
$N_{ГЕ}$	потужність процесу ГЕ	кВт	150,1
t	час процесу ГЕ включно із нагріванням	год	1,36
$C_{ГЕ}$	собівартість процесу гвинтової екструзії (ГЕ),	грн	4,49
$C_{ГПД}^n$	максимальна питома собівартість процесу ГПД	грн / кг	0,16

Алюмінієві сплави підлягають трьом видам термічної обробки: відпалу, загартуванню та старінню. Основними видами відпалу є: дифузний (гомогенізація), рекристалізаційний і термічне зміцнення сплавів.

Після розливання злитки піддають відпалу в печі гомогенізації для підвищення однорідності структури і, як наслідок, підвищення пластичності металу. Гомогенізація представляє собою процес дифузії в твердому стані, який забезпечує розподіл дисперсних частинок і зменшує залишкові напруження. Гомогенізація є обов'язковою і необхідною операцією перед пресуванням через особливості способу отримання циліндричних заготовок. Деякі компоненти при охолодженні поверхневого шару сегрегують через спосіб охолодження (швидкого охолодження зовнішніх шарів і більш повільного – внутрішніх).

Ці ефекти можуть бути частково або повністю ліквідовані при гомогенізації відлитих заготовок. При гомогенізації температура заготовок досягає точки, при якій досягається однорідність розподілу компонентів сплаву в структурі металу.

Гомогенізацію алюмінієвих сплавів традиційно проводять при температурі 450-560°C. Після того, як ця температура встановиться в усіх заготовках,

необхідно ще близько 2,5 годин для отримання однорідної структури.

В нашому випадку приймаємо витримку в печі протягом п'яти годин. Прийнята методика розрахунку наведена у спеціалізованій літературі [6].

Результати розрахунку витрати пального й показників собівартості процесу нагрівання заготовки наведено в табл. 4.

Витрати на нагрівання обойми, контейнера, заготовки і матриці та підтримання температури печі під час процесу гомогенізації:

$$C^n = C_H^n + C_{ГН}^n = 0,21 + 6,64 = 6,85 \text{ грн} / \text{кг}$$

Витрати на нагрівання обойми, контейнера, заготовки і матриці та процес гомогенізації методом екструзії:

$$C^n = C_H^n + C_{ГПД}^n = 0,21 + 0,16 = 0,37 \text{ грн} / \text{кг}$$

Висновки. Отже витрати на традиційний процес гомогенізації складають – 6,85 грн/кг, а на процес ГПД – 0,37 грн/кг. Бачимо, що процес ГПД на 94,6 % ефективніший ніж гомогенізація за традиційною технологією. Окрім того загальний час на гомогенізацію ГПД менший за час гомогенізації традиційним способом на 78,6 %.

Таблиця 4 – Результати розрахунків процесу гомогенізації заготовки методом нагрівання у печі

Позначення	Найменування	Розмірність	Значення
$Q_{нагр}$	питома витрата метану для нагрівання заготовки	кг / год	1,3714
V_{CH_4}	питома витрата метану для нагрівання заготовки	м ³ / год	1,91
t	час процесу ГЕ включно із нагріванням	год	6,35
C^n	питома собівартість процесу гомогенізації	грн / год	38,16
$C_{ГН}$	собівартість процесу гомогенізації заготовки методом нагрівання у печі	грн	190,8
$C_{ГН}^n$	питома собівартість процесу гомогенізації заготовки методом нагрівання у печі	грн / кг	6,64

Список літератури

1. Деформационная обработка вторичного алюминия и алюминий содержащих отходов / [А. И. Шевелев, Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин и др.]. – Донецк: ДонФТИ НАН Украины, 2011. – 327 с.
2. Федотьев А. М. Застосування гвинтової екструзії з метою гомогенізації алюмінієвих сплавів при виробництві профілів / А. М. Федотьев, Я. Ю. Бейгельзимер, С. В. Шкель // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2018. – № 1 (46). – С. 48–53.
3. Бейгельзимер Я. Ю. Моделирование процесса интенсивной пластичной деформации методом гвинтовой экструзии / Я. Ю. Бейгельзимер, А. М. Федотьев, С. В. Шкель // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 17-й Международной научно-практической конференции, 04–08 сентября 2017 г., г. Одесса. – Киев: АТМ України, 2017. – С. 33–36.
4. Перлин И. Л. Теория прессования металлов / И. Л. Перлин, Л. Х. Райтбарг. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.
5. Методические указания самостоятельной работы и практических занятий по курсу “Технология нагрева и нагревательных устройств КШЦ” по образовательной программе подготовке бакалавра. МУ-ХПИ-МТ.ОМД23.12.2007. Составили В.И. Кузьменко, Тихомиров Ю.С. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2008. – 86 с.
6. Тепловой баланс печи: методические указания по курсовому проектированию металлургических печей сост.: Е. П. Карамышева, И. П. Маклакова. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2009. – 18 с.

References (transliterated)

1. Deformatsionnaya obrabotka vtorichnogo alyuminiya i alyuminiy sodержaschih othodov / [A. I. Shevelev, Ya. E. Beygelzimer, V. N. Varyuhin i dr.]. – Donetsk: DonFTI NAN Ukrainyi, 2011. – 327 p.
2. Fedotiev A. M. Zastosuvannya gvintovoyi ekstruziyi z metoyu gomogenizatsiyi alyuminitvih splaviv pri virobniцtvi profiliv / A. M. Fedotiev, Ya. Yu. Beygelzimer, S. V. Shkel // Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyih trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2018. – No 1 (46). – PP. 48–53.
3. Beygelzimer Ya. Yu. Modelyuvannya protsesu Intensivnoyi plastichnoyi deformatsiyi metodom gvintovoyi ekstruziyi / Ya. Yu. Beygelzimer, A. M. Fedotiev, S. V. Shkel // Kachestvo, standartizatsiya, kontrol: teoriya i praktika: Materialyi 17-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 04–08 sentyabrya 2017 g., g. Odessa. – Kiev: ATM Ukrainyi, 2017. – PP. 33–36.
4. Perlin I. L. Teoriya pressovaniya metallov / I. L. Perlin, L. H. Raytbarg. – 2-e izd., pererab. i dop. – Moscow: Metallurgiya, 1975. – 448 p.
5. Metodicheskie ukazaniya samostoyatelnoy raboty i prakticheskikh zanyatiy po kursu “Tehnologiya nagreva i nagrevatelnykh ustroystv KShTs” po obrazovatelnoy programme podgotovke bakalavra. MU-HPI-MT.OMD 23.12.2007. Sostavili V.I. Kuzmenko, Tihomirov Yu.S. – Kharkov: NTU “HPI”, 2008. – 86 p.
6. Teplovoy balans pechi: metodicheskie ukazaniya po kursovomu proektirovaniyu metallurgicheskikh pechey sost.: E. P. Karamyisheva, I. P. Maklakova. – Lipetsk: Izdatelstvo LGTU, 2009. – 18 p.

Надійшла (received).18.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Федотьев Андрій Миколайович (Федотьев Андрей Николаевич, Fedotiev Andriy Mykolayovych) – кандидат технічних наук, доцент; начальник відділу інновацій Алюмета груп, Бровари, Україна; e-mail: a.fed450@gmail.com.

Шкель Сергій Володимирович (Шкель Сергей Владимирович, Shkel Serhii Volodymyrovych) – магістр; інженер-дослідник відділу інновацій Алюмета груп, Бровари, Україна; e-mail: shkelsv@gmail.com.

Е. В. ЩИПКОВСКИЙ, В. В. ДРАГОБЕЦКИЙ, Р. Г. ПУЗЫРЬ, Р. В. ЛЕВЧЕНКО

ИЗМЕНЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ И ОСНАСТКИ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ И ШТАМПОВКИ ЗАГОТОВОК ДИСКОВ КОЛЕС ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Рассмотрены два способа предварительной подготовки заготовок под вытяжку диска колеса транспортного средства. Приведен сравнительный анализ предлагаемых способов на основе экономической себестоимости изготовления новой оснастки для преса и профилировочной машины. Который показал, что изготовление штампа почти в 2 раза дороже обходится предприятию, чем изготовление новых деформирующих роликов. Показано, что большое количество оснастки, которое скопилось в заделах и на стеллажах, позволяет обойтись без изготовления новых конструкций. На переоснастку требуется почти в 10 раз меньше количество денежных средств, причем ее проведение не требует больших капиталовложений, так как используется имеющееся на предприятии оборудование. Предлагается при проведении данных мероприятий использование эластичных сред в качестве деформирующего элемента сборной оснастки. Данный прием позволит исключить потерю устойчивости полуфабриката при наборе металла в предварительном штампе, а также уменьшить утонение при накатывании предварительного профиля на профилировочной машине. Причем создание гидростатического сжатия позволит направлено влиять на очаг пластической деформации для получения геометрически точных и качественных полуфабрикатов. Однако предложенные способы и оснастка под них не являются окончательными, так как не учитывают дальнейшую деформацию полуфабриката вытяжкой. В первом случае, с набором металла в местах предполагаемой локализации деформаций, утолщенная часть заготовки будет зажиматься в зазор между матрицей и пуансоном, что приведет к росту растягивающих меридиональных напряжений и принципиально иному процессу вытяжки – вытяжки с утонением стенки. Во втором случае, с профилированием рифта с заданными геометрическими размерами, узким местом будет как раз зона центра рифта, которая втягиваясь в зазор между матрицей и пуансоном и далее изгибаясь, и утоняясь, не позволит в совокупности получить ожидаемого экономического эффекта по набору металла в местах локализации деформаций. Однако положительным моментом последнего способа является возможность создания торцевого подпора из-за конструкции самого рифта. Однако при этом необходимо доработать оснастку, в частности пуансон, который в конце процесса должен оказывать давление на стенки вытягиваемого стакана.

Ключевые слова: диск колеса, вытяжка, штамп, профиль, прес, профилировочная машина, эластичный элемент

Є. В. ЩИПКОВСЬКИЙ, В. В. ДРАГОБЕЦЬКИЙ, Р. Г. ПУЗИР, Р. В. ЛЕВЧЕНКО

ЗМІНА КОНСТРУКЦІЇ ОБЛАДНАННЯ І ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО ПРОФІЛЮВАННЯ І ШТАМПУВАННЯ ЗАГОТОВОК ДИСКІВ КОЛЕС ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Розглянуто два способи попередньої підготовки заготовок під витягування диска колеса транспортного засобу. Наведено порівняльний аналіз пропонувані способів на основі економічної собівартості виготовлення нової оснастки для преса і профілювальної машини. Який показав, що виготовлення штампа майже в 2 рази дорожче обходиться підприємству, ніж виготовлення нових роликів, що деформують. Показано, що велика кількість оснащення, яке накопичилося у сховищах і на стелажах, дозволяє обійтися без виготовлення нових конструкцій. На переоснащення потрібно майже в 10 разів менша кількість грошових коштів, причому його проведення не потребує великих капіталовкладень, так як використовується наявне на підприємстві обладнання. Пропонується при проведенні даних заходів використання еластичних середовищ в якості деформуючого елемента збірної оснащення. Даний прийом дозволить виключити втрату стійкості напівфабрикату при наборі металу в попередньому штампі, а також зменшити стоншення при накопченні попереднього профілю на профілювальної машині. Причому створення гідростатичного стиснення дозволить направлено впливати на осередок пластичної деформації для отримання геометрично точних і якісних напівфабрикатів. Однак запропоновані способи і оснащення під них не є остаточними, оскільки не враховують подальшу деформацію напівфабрикату витягуванням. У першому випадку, з набором металу в місця передбачуваної локалізації деформацій, потовщена частина заготовки буде стискатися в зазорі між матрицею і пуансоном, що призведе до зростання меридіональних напружень, що розтягують, і до принципово іншого процесу витягування – витягування зі стоншенням стінки. У другому випадку, з профілюванням рифту зі заданими геометричними розмірами, вузьким місцем буде якраз зона центру рифту, яка втягується в зазор між матрицею і пуансоном і далі згинаючись, і стоншуючись, не дозволить в сукупності отримати очікуваного економічного ефекту по набору металу в місця локалізації деформацій. Однак позитивним моментом останнього способу є можливість створення торцевого підпору через конструкції самого рифту. Однак при цьому необхідно доопрацювати оснащення, зокрема пуансон, який в кінці процесу повинен чинити тиск на стінки циліндру, що витягується.

Ключові слова: диск колеса, витягування, штамп, профіль, прес, профілювальна машина, еластичний елемент

Y. V. SHCHIPKOVSKIY, V. V. DRAGOBETSKII, R. H. PUZYR, R. V. LEVCHENKO

MODIFICATION OF EQUIPMENT DESIGN AND TOOLING FOR PRELIMINARY PROFILING AND STAMPING OF CUTTERS WHEELS VEHICLES

Two ways of preliminary preparation of blanks for exhaust of a wheel vehicle are considered. A comparative analysis of the proposed methods is given on the basis of the economic cost of manufacturing a new tooling for a press and a roll forming machine. Which showed that the manufacture of a stamp is almost 2 times more expensive for an enterprise than the production of new deforming rollers. It is shown that a large number of equipment that has accumulated in the groundwork and on the racks, allows you to do without the manufacture of new designs. Re-equipment requires almost 10 times less money, and its implementation does not require large capital investments, since the equipment available at the enterprise is used. It is proposed during these events the use of elastic media as a deforming element of the team tooling. This technique will eliminate the loss of stability of the semi-finished product when typing metal in the pre-stamp, as well as reduce the thinning when the pre-profile is rolled on the roll forming machine. Moreover, the creation of hydrostatic compression will allow to influence the source of plastic deformation to obtain geometrically accurate and high-quality semi-finished products. However, the proposed methods and equipment for them are not final, since they do not take into account the further deformation of the semifinished product by the hood. In the first case, with a set of metal in the places of the proposed localization of deformations, the thickened part of the workpiece will be clamped in the gap between the matrix and the punch, which will lead to an increase in tensile meridional stresses and a fundamentally different drawing process – drawing with wall thinning. In the second case, with rift profiling with given geometrical dimensions, the bottleneck will be just the rift center area, which, being drawn into the gap between the matrix and the punch and further bending and thinning, will not allow to get the expected economic effect on the set of metal in localized areas deformations. However, the positive point of the latter method is the possibility of creating an end support due to the design of the rift itself. However, it is necessary to modify the equipment, in particular the punch, which at the end of the process should exert pressure on the walls of the drawable glass.

Keywords: wheel disk, exhaust, stamp, profile, press, roll forming machine, elastic element

Введение. Изготовление стальных дисков колес транспортных средств на ПАТ «Кременчугский колесный завод» основано на применении двух технологий, которые включают в себя общие операции отрезки и вырубки заготовок, пробивки отверстий, токарной обработки торцов и отверстий, сверления. Отличаются эти процессы формообразующими операциями обработки металлов давлением – раскатка и вытяжка. Раскатка применяется в основном при единичном и мелкосерийном производстве колес, а также при внедрении новых конструкций и экспериментальном производстве.

Вытяжка – наиболее востребованная операция при крупно и среднесерийном типе производства. Основным недостатком данной операции является локализация деформаций в угловых зонах полуфабриката, что приводит к чрезмерному утонению этих зон, а это влечет за собой снижение прочности и долговечности всего изделия [1]. Для повышения надежности работы колеса конструкторы увеличивают толщину исходной заготовки. Данный прием обеспечивает запас прочности конструкции в опасных зонах диска колеса, но и наращивает толщину всего изделия в целом, увеличивая его массу, что негативно сказывается на его эксплуатационных характеристиках [2].

Для утолщения опасного сечения при деформации разработано большое количество способов и оснастки для вытяжки, основанных на торцевом подпоре и осадке [3], предварительном профилировании заготовок [4], учете положительного и отрицательного действия сил трения [5], применении противодавления [6], конического прижима [7], штампов с поворотными дисками [8], штампов для пульсирующей вытяжки [9] и т.д. С позиции технической оснащенности завода и минимизации затрат на изготовление новой оснастки авторами было предложено проводить процесс вытяжки диска колеса из предварительно спрофилированной заготовки [10].

Цель работы. Основной целью данного исследования является анализ и сравнение конструктивных изменений оборудования и оснастки для предварительного профилирования заготовки под вытяжку цилиндрической детали типа «диск».

Изложение основного материала. Перед формообразующей операцией вводится операция предварительного профилирования, что позволяет теоретически уменьшить толщину вытягиваемого полуфабриката, как минимум на 2 мм, что, в свою очередь, снизит себестоимость изделия.

Данную операцию предварительного профилирования можно проводить двумя способами, которые подразумевают использование имеющегося на предприятии оборудования:

- первый способ – получение спрофилированной заготовки на формовочном штампе, с незначительным изменением непосредственного формоизменяющего инструмента (матрица, пуансон, выталкиватель). Способ не требует больших капиталовложений;

- второй способ – получение профильной заготовки путем деформирования на профилировочных роликах. Данная технология требует, как доработки профилировочной машины

(введение державки под технологическое отверстие), так и непосредственно переточку профилировочных роликов под определенный угол профиля.

Первый способ реализуется за два штамповочных перехода на штампах, которые по сроку службы не подлежат переточкам или же не используются ввиду изменения номенклатуры изделий. Осуществление данного способа набора металла основывается на изобретении Бобурина М.А. и др. [11], сущность которого заключается в предварительном формовании из плоской заготовки полого полуфабриката в форме усеченного конуса. Полученный полуфабрикат помещают в пакет между двумя формообразующими элементами, которые выполнены равновысотными в осевом направлении. Затем проводят осаживание полученного пакета в контейнере, преобразуя исходную толщину полуфабриката в утолщенную часть изделия с образованием переходных зон утолщений. На рис. 1 изображена конструкция штампа первого перехода штамповки для вытяжки полого полуфабриката.

Штамп изображен в конечном рабочем положении без полуфабриката и прижима. Заготовка подается на зеркало матрицы до упора 3 и производится формование полуконуса из плоской заготовки с дополнительной фиксацией по центральному технологическому отверстию. Далее полуфабрикат передается на следующую операцию для набора металла в определенных расчетных зонах. На рис. 2 показан штамп второй предварительной операции. Для набора металла необходимо обеспечить условия для возникновения сдвигающих деформаций, действующих в плоскости силового воздействия.

Для этого полуфабрикат устанавливается между плоскими бойками, снабженными выточками для затекания металла, которые двигаются навстречу друг другу, меньшим диаметром основания полуконуса вверх.

Верхний пуансон снабжен эластичной вставкой, которая играет роль прижима и предотвращает возможность выпучивания части полуконуса с большим диаметром при его опускании. В процессе деформации торцы полуфабриката упираются во вставки матрицы, что обеспечивает радиальный подпор и затекание металла в выточки верхнего пуансона.

Для предварительного профилирования заготовки на профилировочной машине вносят изменения в ее конструкцию, добавлением специального удерживающего устройства для диска колеса. Оно монтируется на станине машины консольного типа, и предназначено только для удерживания диска в горизонтальном положении относительно направления подачи силового вала с возможностью свободного вращения. (рис. 3.).

При включении подачи, деформирующие ролики, вращаясь навстречу друг другу, сближаются и захватывают заготовку в зону пластической деформации, формируя определенного размера предварительный профиль. Геометрия профиля будет зависеть от величин радиусного перехода диска и радиуса закругления вытяжной кромки матрицы.

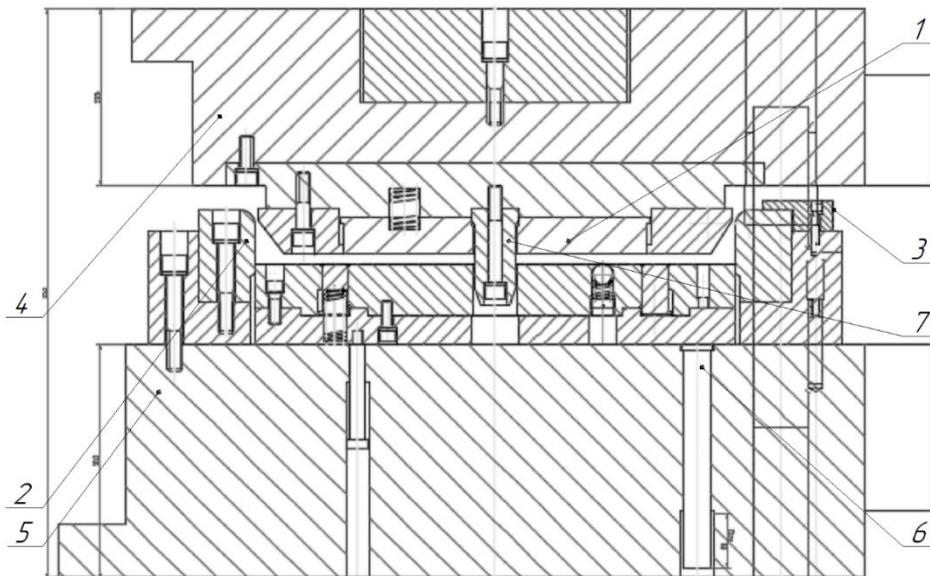


Рис. 1 – Конструкция совмещенного штампа первого предварительного перехода: 1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – упор, 4 – верхняя плита пресса, 5 – нижняя плита пресса, 6 – толкатель, 7 – фиксатор

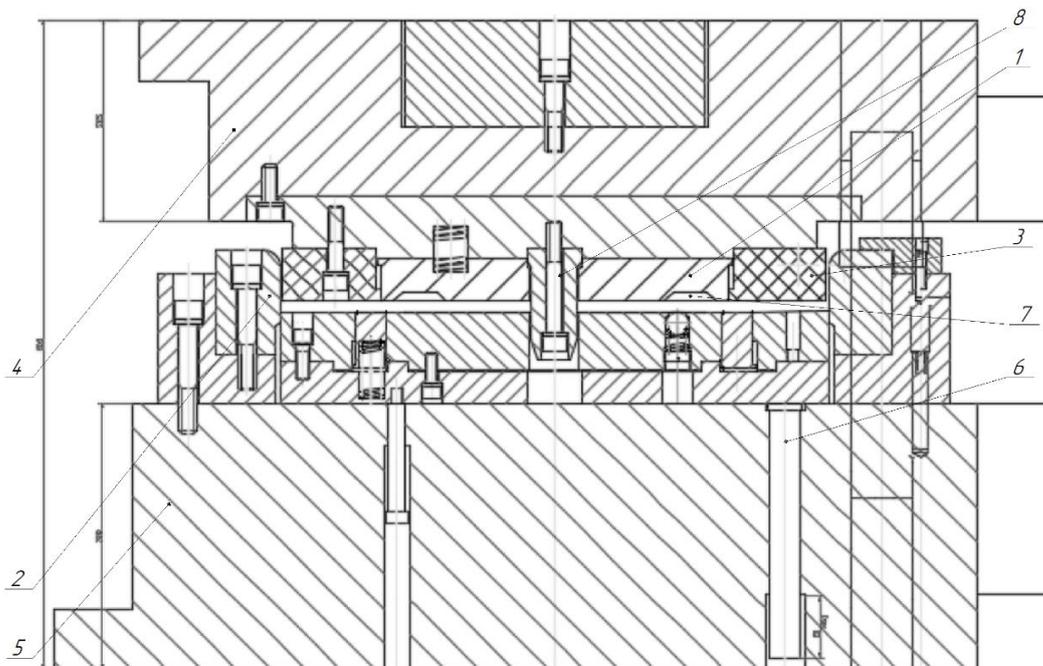


Рис. 2 – Конструкция штампа второго предварительного перехода: 1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – эластичная вставка, 4 – верхняя плита пресса, 5 – нижняя плита пресса, 6 – толкатель, 7 – выточки для размещения утолщений, 8 – фиксатор

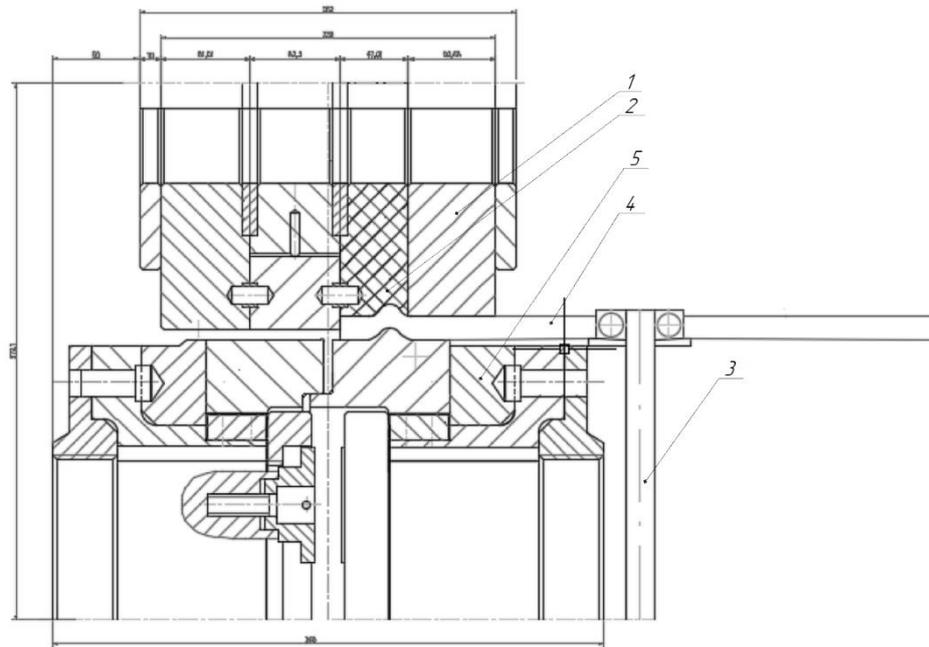


Рис. 3– Деформирующие ролики для накатывания профиля: 1 – сборный верхний ролик, 2 – эластичная вставка, 3 – стойка для заготовки диска (удерживающее устройство), 4 – заготовка, 5 – сборный нижний ролик

Обсуждение результатов. Для сравнения экономически предпочтительного способа предварительного профилирования заготовки необходимо знать себестоимость изготовления конечного продукта. Однако уже на данном этапе можно сделать предварительные выводы.

Предварительное профилирование подразумевает внедрение одного-двух переходов по обработке заготовки. Для получения заготовки путем профилирования необходим комплект профилировочных роликов, а для ее изготовления путем односторонней штамповки необходимы два полноценных штампа [12, 14]. Средняя стоимость полного штампа с необходимыми затратами на материалы и изготовление составляет около 250000 грн., средняя стоимость новых роликов, необходимых для процесса профилирования составляет около 120000 грн. (по данным ПАО «Кременчугский колесный завод»). Но для введения данной технологии достаточно для любого штампа формовки или чеканки диска ввести наладку на штамп, что, в свою очередь, снизит стоимость затрат до 30000 – 50000 грн. Для профилировочных роликов можно использовать любые доработанные изношенные профилировочные ободные ролики т. к. данная технология не требует определенной закрытой высоты машины, как при профилировании ободьев (толщина обода меньше толщины диска) [16]. Тем самым появляется возможность использовать отработанные ролики с незначительной доработкой, стоимость затрат от 5000 до 10000 грн.

Необходимым элементом в оснастке для предварительных переходов является вставка из эластичного материала (резина, полиуретан). Ее применение основано на положительных особенностях процесса деформирования [13, 10, 17]:

1) наличием полезных сил трения между пуансоном, роликом и заготовкой, возникающих в результате прижатия заготовки к их поверхности;

2) наличием условий благоприятного пластического течения вследствие больших сжимающих напряжений, вызываемых высоким гидростатическим давлением;

3) возможностью управления в заданном направлении большими пластическими деформациями.

Выводы. Приведен сравнительный анализ предлагаемых способов на основе экономической себестоимости изготовления новой оснастки для прессы и профилировочной машины. Который показал, что изготовление штампа почти в 2 раза дороже обходится предприятию, чем изготовление новых деформирующих роликов. Показано, что большое количество оснастки, которое скопилось в заделах и на стеллажах, позволяет обойтись без изготовления новых конструкций. На переоснастку требуется почти в 10 раз меньшее количество денежных средств, причем ее проведение не требует больших капиталовложений, так как используется имеющееся на предприятии оборудование. Предлагается при проведении данных мероприятий использование эластичных сред в качестве деформирующего элемента сборной оснастки. Данный прием позволит исключить потерю устойчивости полуфабриката при наборе металла в предварительном штампе, а также уменьшить утонение при накатывании предварительного профиля на профилировочной машине [18]. Причем создание гидростатического сжатия позволит направлено влиять на очаг пластической деформации для получения геометрически точных и качественных полуфабрикатов. Однако предложенные способы и оснастка под них не являются окончательными, так как

не учитывают дальнейшую деформацию полуфабриката вытяжкой. В первом случае, с набором металла в местах предполагаемой локализации деформаций, утолщенная часть заготовки будет зажиматься в зазоре между матрицей и пуансоном, что приведет к росту растягивающих меридиональных напряжений и принципиально иному процессу вытяжки – вытяжки с утонением стенки. Во втором случае, с профилированием рифта с заданными геометрическими размерами, узким местом будет как раз зона центра рифта, которая втягиваясь в зазор между матрицей и пуансоном и далее изгибаясь, и утоняясь, не позволит в совокупности получить ожидаемого экономического эффекта по набору металла в местах локализации деформаций. Однако положительным моментом последнего способа является возможность создания торцевого подпора из-за конструкции самого рифта.

Список литературы

1. Каложний О.В., Каложний В.Л. *Інтенсифікація формуючих процесів холодного листового штампування: Монографія*. Київ: ТОВ «Сік Груп Україна», 2015. 292 с.
2. Драгобецкий В.В., Пузырь Р.Г., Залесов М.Д. Совершенствование методики расчета потребного крутящего момента при горизонтальном радиально-ротационном профилировании ободьев колес. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА. 2014. № 1(38). С. 109 – 114.
3. Luo J.C. Study on Stamping-Forging Process and Experiment of Sheet Metal Parts with Non-uniform Thickness. *Wuhan: Huazhong University of Science & Technology*. 2011. 51. pp. 49–54.
4. Wang X.Y., Luo W.T., Xia J.C., Hu G.A. Investigation of warm stamping-forging process for car flywheel panel. *Forging & Stamping Technology*. 2009. 34 (5). pp. 43–46. DOI:10.3969/j.issn.1000-3940.2009.05.013.
5. Luo J.C., Wang X.Y., Guo M.L., Xia J.C. Precision research in sheet metal flanging and upset extruding. *Materials Research Innovations*. 2011. 151. pp. 439 – 442. DOI:10.1179/143307511X12858957675552.
6. Yan G.X., Wang X.Y., Deng L., Jin J.S. A study of hole flanging-upsetting process. *Advanced Materials Research*. 2014. 939. pp. 291–298. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.939.291.
7. Wu H.C., Altan T. Process optimization in stamping – A case study for flanging a clutch hub from steel plate. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. 146(1). pp. 8–19. DOI:10.1016/S0924-0136(03)00839-2.
8. Майоров Г.И., Бут А.Ю. Совершенствование процессов комбинированной вытяжки с использованием штампов с поворотными дисками. *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. Алчевск: ДонГТУ, 2008. Вып. 26. С. 211 – 216.
9. Колесов Ю.Б. Повышение устойчивости заготовки против гофрообразования на основе синтеза энергетического метода и теоретического эксперимента. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1991. №4. С. 7 – 8.
10. Аргат Р.Г., Пузырь Р.Г., Долгих О.Н. Оценка приемов, увеличивающих степень деформации при вытяжке цилиндрических деталей без складкодержателя. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. №36 (1258). С. 5–9.
11. Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Герасимов Н.В., Зарубина О.В., Тарасов В.А. Анализ формоизменения заготовок при вытяжке полусферических деталей с применением промежуточных деформируемых сред. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2014. № 7. С. 21–24.
12. Puzyr R., Savelov D., Argat R., Chernish A. Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. 1. pp. 27–32.
13. Puzyr R., Haikova T., Trotsko O., Argat R. Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. 4/1 (82). pp. 52–60. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76225>
14. Sosenushkin, E.N., Yanovskaya, E.A., Sosenushkin, A.E., Emel'yanov, V.V. Mechanics of nonmonotonic plastic deformation. *Russian Engineering Research*. 2015. Т. 35, №12. pp. 902–906.
15. Пузырь Р.Г., Троцко О.В., Черкащенко В.Ю. Влияние геометрических параметров цилиндрической заготовки на напряженно-деформированное состояние при раздаче коническими пуансонами. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск: ДГМА. 2012. № 4 (33). С. 114–121.
16. Мосьян Д.В., Драгобецкий В.В., Пузырь Р.Г. Определение потребного крутящего момента при радиально-ротационном профилировании ободьев колес. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КДПУ. 2008. Вип. 6(53), ч. 2. С. 64–66.
17. Grushko A.V., Kukhar V.V., Slobodyanyuk Yu. O. Phenomenological Model of Low-Carbon Steels Hardening during Multistage Drawing. *Solid State Phenomena*. 2017. 265. pp. 114–123.
18. Пузырь Р.Г., Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А. Установление поля напряжений при радиально-ротационном профилировании цилиндрической заготовки без учета радиусов закругления деформирующего инструмента. *Вестник МГТУ «Станкин». Научный рецензируемый журнал*. Москва: МГТУ «Станкин». 2013. №4 (27). С. 42–47.

References (transliterated)

1. Kalyuzhnyj O.V., Kalyuzhnyj V.L. *Intensyfikaciya formoutvoryuyuchy'x procesiv xolodnogo ly'stovoogo shtampuvannya: Monografiya* [Intensification of forming processes of cold sheet stamping: Monograph]. Kyiv, TOV «Sik Grup Ukrainayn», 2015. – 292 p.
2. Dragobeckij V.V. Puzyr' R.G., Zalesov M.D. Sovershenstvovanie metodiki rascheta potrebnogo krutyashhego momenta pri gorizont'nom radial'no-rotacionnom profilirovaniy obod'ev koles [Improving the method of calculating the required torque for horizontal radial-rotational profiling of wheel rims]. *Obrobka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov* [Materials working by pressure: a collection of science papers]. Kramatorsk, DGMA, 2014, No 1(38), pp. 109–114.
3. Luo J.C. Study on Stamping-Forging Process and Experiment of Sheet Metal Parts with Non-uniform Thickness. *Wuhan: Huazhong University of Science & Technology*, 2011, No51, pp. 49–54.
4. Wang X.Y., Luo W.T., Xia J.C., Hu G.A. Investigation of warm stamping-forging process for car flywheel panel. *Forging & Stamping Technology*, 2009, No 34 (5), pp. 43–46. DOI:10.3969/j.issn.1000-3940.2009.05.013.
5. Luo J.C., Wang X.Y., Guo M.L., Xia J.C. Precision research in sheet metal flanging and upset extruding. *Materials Research Innovations*, 2011, No 151, pp. 439–442. DOI:10.1179/143307511X12858957675552.
6. Yan G.X., Wang X.Y., Deng L., Jin J.S. A study of hole flanging-upsetting process. *Advanced Materials Research*, 2014, No 939, pp. 291–298. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.939.291.
7. Wu H.C., Altan T. Process optimization in stamping – A case study for flanging a clutch hub from steel plate. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, No 146(1), pp. 8–19. DOI:10.1016/S0924-0136(03)00839-2.
8. Majorov G.I., But A.Ju. Sovershenstvovanie processov kombinirovannoj vytjazhki s ispol'zovaniem shtampov s povorotnymi diskami [Improving the combined extraction process using dies with rotary discs]. *Sbornik nauchnyh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of Scientific Papers of Donbass State Technical University] Alchevsk, DonGTU, 2008, vyp. 26, pp. 211–216.
9. Kolesov Ju.B. Povyshenie ustojchivosti zagotovki protiv gofroobrazovaniya na osnove sinteza jenergeticheskogo metoda i teoreticheskogo jeksperimenta [Improving the stability of the workpiece against the formation of corrugations based on the synthesis of the energy method and theoretical experiment]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 1991, No 4, pp. 7–8.
10. Argat R.G., Puzyr' R.G., Dolgih O.N. Ocenka priemov, uvelichivajushhih stepen' deformacii pri vytjazhke cilindricheskikh detalej bez skladdoderzhatelja [Evaluation of techniques that increase the degree of deformation during the drawing of cylindrical parts without the folding holder]. *Visnik Nacional'nogo tekhnicheskogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Serija «Innovacijni tehnologii ta obladnannja obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii»* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Series "Innovative technologies and equipment for processing materials in mechanical engineering and metallurgy"]. Harkiv, NTU «HPI», 2017, No 36 (1258), pp. 5–9.
11. Baburin M.A., Baskakov V.D., Gerasimov N.V., Zarubina O.V., Tarasov V.A. Analiz formoizmeneniya zagotovok pri vytjazhke polusfericheskikh detalej s primeneniem promezhutochnyh

- deformiruemih sred [Analysis of the shape change of blanks when drawing hemispherical parts using intermediate wrought media] *Kuznechno-shtampovoechnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2014, No 7, pp. 21–24.
12. Puzyr R., Savelov D., Argat R., Chernish A. Distribution analysis of stresses across the stretching edge of die body and bending radius of deforming roll during profiling and drawing of cylindrical workpiece. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, No 1, pp. 27–32.
 13. Puzyr R., Haikova T., Trotsko O., Argat R. Determining experimentally the stress-strained state in the radial rotary method of obtaining wheels rims. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016, No 4/1 (82), pp. 52–60. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76225>
 14. Sosenushkin, E.N., Yanovskaya, E.A., Sosenushkin, A.E., Emel'yanov, V.V. Mechanics of nonmonotonic plastic deformation. *Russian Engineering Research*. 2015, vol. 35, No 12, pp. 902-906.
 15. Puzyr' R.G., Trocko O.V., Cherkashhenko V.Ju. Vlijanie geometricheskikh parametrov cilindricheskoj zagotovki na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie pri razdache konicheskimi puansonami [The influence of the geometrical parameters of a cylindrical billet on the stress-strain state when dispensing with conical punches]. *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov* [Materials working by pressure: a collection of science papers]. Kramatorsk, DGMA, 2012, No 4 (33), pp. 114–121.
 16. Mos'pan D.V., Dragobeckij V.V., Puzyr' R.G. Opredelenie potrebnogo krutjashhego momenta pri radial'no-rotacionnom profilirovanii obod'ev koles [Determination of the required torque at radial-rotational profiling of wheel rims]. *Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo*. Kremenchuk, KDPU, 2008, No 6(53), vol. 2, pp. 64–66.
 17. Grushko A.V., Kukhar V.V., Slobodyanyuk Yu. O. Phenomenological Model of Low-Carbon Steels Hardening during Multistage Drawing. *Solid State Phenomena*. 2017, No 265, pp. 114–123.
 18. Puzyr' R.G., Sosenushkin E.N., Janovskaja E.A. Ustanovlenie polja naprjazhenij pri radial'no-rotacionnom profilirovanii cilindricheskoj zagotovki bez ucheta radiusov zakruglenija deformirujushhego instrumenta [Determination of the stress field during radial-rotational profiling of a cylindrical workpiece without taking into account the radii of curvature of the deforming tool]. *Vestnik MGТУ «Stankin»*. Nauchnyj recenziruemij zhurnal. Moscow, MGТУ «Stankin», 2013, No 4 (27), pp. 42–47.

Поступила (received) 01.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Щипковський Євгеній Володимирович (Щипковський Евгений Владимирович, Shchirkovskiy Yevhenii Vladimirovych) – начальник технологічного бюро ООО НВФ «Техвагонмаш»; м. Кременчук, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0774-8631>; e-mail: schirkovskiy.yevhenii@gmail.com.

Драгобецький Володимир Вячеславович (Драгобецкий Владимир Вячеславович, Dragobetskiy Vladimir Vjacheslavovych) – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, завідувачий кафедрою технології машинобудування; м. Кременчук, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9637-3079>; e-mail: kdu.edu.ua.

Пузыр Руслан Григорович (Пузырь Руслан Григорьевич, Puzyr Ruslan Hryhorovych) – доктор технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри технології машинобудування; м. Кременчук, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9791-9002>; e-mail: puzyruslan@gmail.com.

Левченко Роман Володимирович (Левченко Роман Владимирович, Levchenko Roman Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, Коледж Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, заступник директора; м. Кременчук, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2033-2905>; e-mail: levroma2005@gmail.com.

УДК 6.67.672

В. В. БЕРЕЗУЦЬКИЙ, І. І. ХОНДАК**ЗВАРЮВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ТА БЕЗПЕКА**

У статті проведений аналіз літературних джерел в області основних видів зварювання, а також небезпек, які з ними зв'язані. Розглядається вплив небезпечних і шкідливих виробничих чинників при зварюванні металевих виробів, запропоновано їх класифікацію відповідно до різних процесів зварювання. Приділено увагу речовинам, які вражають робітників при зварюванні і різанні кольорових металів. Описано професійні захворювання, а також заходи і засоби захисту зварників в процесі роботи від впливу шкідливих і небезпечних чинників. Зроблена класифікація найбільш поширених сучасних респіраторів в Україні для зварників. Виконано аналіз наукових досліджень щодо забезпечення безпеки зварювальних робіт. Особливу увагу було приділено питанням утворення чадного газу при різних видах зварювання, розглянуті питання з дослідження впливу СО на зварника і засобів захисту від нього. Розглянуті небезпеки, пов'язані з утворенням чадного газу в зоні зварювання, особливо в замкнених просторах і просторах, які погано вентилуються. Проаналізовані питання безпечної праці осіб, безпосередньо зайнятих при процесах зварювання, і для осіб, які знаходяться в близькості від робочого місця зварника.

Ключові слова: небезпечні і шкідливі виробничі чинники, зварник, професійне захворювання, зварювальний аерозоль, профілактика, засоби індивідуального захисту.

В. В. БЕРЕЗУЦЬКИЙ, И. И. ХОНДАК**СВАРКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ И БЕЗОПАСНОСТЬ**

В статье проведен анализ литературных источников в области основных видов сварки, а также опасностей, которые с ними связаны. Рассматривается влияние опасных и вредных производственных факторов при сварке металлических изделий, предложена их классификация в соответствии с различными процессами сварки. Уделено внимание веществам, которые поражают рабочих при сварке и резке металлов. Описаны профессиональные заболевания, а также меры и средства защиты сварщиков в процессе работы от воздействия вредных и опасных факторов. Произведена классификация наиболее распространенных современных респираторов в Украине для сварщиков. Выполнен анализ научных исследований по обеспечению безопасности сварочных работ. Особое внимание было уделено вопросам образования угарного газа при различных видах сварки, рассмотрены вопросы по исследованию влияния СО на сварщика и средств защиты от него. Рассмотрены опасности, связанные с образованием угарного газа в зоне сварки, особенно в замкнутых пространствах и пространствах, которые плохо вентилируются. Проанализированы вопросы безопасного труда лиц, непосредственно занятых при процессах сварки, и для лиц, находящихся в близости от рабочего места сварщика.

Ключевые слова: опасные и вредные производственные факторы, сварщик, профессиональное заболевание, сварочный аерозоль, профилактика, средства индивидуальной защиты.

V. BEREZUCKYI, I. HONDAK**WELDING OF METAL PRODUCTS AND SAFETY**

The article analyzes literary sources in the field of the main types of welding, as well as the dangers associated with them. The influence of hazardous and harmful production factors on the welding of metal products is considered, and their classification according to different welding processes is proposed. Attention is paid to substances that affect workers when welding and cutting non-ferrous metals. The maximum danger of damage to the health of welders from harmful substances in the form of solid particles, as well as from harmful substances in the form of gaseous particles, in particular, includes: carbon monoxide, nitrogen oxide, nitrogen dioxide, ozone. Industrial sprays are considered as occupational hazards, depending on their biological aggressiveness from the basic physical and chemical properties. Described are occupational diseases, as well as measures and means of protecting welders during work from the influence of harmful and dangerous factors. The classification of the most common modern respirators in Ukraine for welders is made. The analysis of scientific researches concerning safety of welding works is executed. Despite the constant improvement of welding methods and welding materials, many hygienic problems of welding production have not been finally solved, so special attention has been paid to the formation of carbon monoxide in various types of welding, the issues of studying the effect of CO on the welder and the means of protection against it have been considered. The hazards associated with the formation of carbon monoxide in the welding zone are considered, especially in closed spaces and spaces that are poorly ventilated. The issues of safe work of persons directly involved in welding processes and those who are in proximity to the welder's place of work are analyzed.

Keywords: hazardous and harmful production factors, welder, occupational disease, welding aerosol, prevention, personal protective equipment.

Вступ. Однією із провідних технологій сучасного виробництва є зварювання [1]. Зварювання та споріднені технології відіграють важливу роль в економіці різних країн. Розвиток цих напрямків диктується, з одного боку, наявністю в конкретній країні відповідного наукового та інженерного потенціалу, а з іншого – потребами галузей промисловості. Понад половини валового національного продукту промислово розвинених країн створюється за допомогою зварювання та споріднених технологій. При цьому до $\frac{2}{3}$ світового споживання сталевих прокатів йде на виробництво зварних конструкцій та споруд,

У залежності від призначення ЗК та вимог, які до них висуваються, використовують різні конструкційні матеріали. При цьому основним з них є 5 сталь,

виробництво якої складає близько 93% від усього виробництва конструкційних матеріалів.

Покращення технології зварювання відіграє вирішальну роль у забезпеченні якості зварних з'єднань та – в цілому – в створенні високоефективного зварювального виробництва, в якому перші позиції займають дугове та контактне зварювання.

Зварювання є одним із основних технологічних процесів виготовлення та ремонту виробів у різних галузях промисловості, будівництва й транспорту. Без зварювання неможливе виробництво автомобілів, кораблів, літаків, мостів, котлів, турбін, реакторів та інших конструкцій. Зварювання дозволило створити принципово нові конструкції машин, внести корінні зміни в конструкцію й технологію виробництва.

Порівняно з іншими способами виготовлення конструкцій зварні є легшими та дешевшими. При цьому економія металу становить від 10 до 50%. За допомогою зварювання одержують нероз'ємні з'єднання майже всіх металів і сплавів різної товщини – від сотих часток міліметра до декількох метрів. Поряд з традиційними конструкційними сталями зварюють спеціальні сталі та сплави на основі титану, цирконію, молібдену, ніобію й інших матеріалів, а також різномірні матеріали.

Багато галузей промислового виробництва в світі вимагають застосування зварювальних технологій. Зварювальні технології включають велику групу технологічних процесів з'єднання, роз'єднання (різання), наплавлення, пайки, напилення, спікання, локальної обробки матеріалів. Ці процеси виконуються із застосуванням на місці обробки термічної, термомеханічної або електричної енергії [2], які мають чинники, що негативно впливають на людину. Тому, створення безпечних умов праці найважливіша задача будь-якого виробництва. За правильну організацію і стан охорони праці несе відповідальність керівництво підприємства. Безпека зварювальних робіт цілком залежить від рівня професійної майстерності, знань і уміння виконання їх зварником.

Розглянемо основні небезпеки, що можуть призвести до виробничих травм при зварюванні:

- ураження електричним струмом при електрозварювальних роботах;
- ураження зору та відкритої поверхні шкіри випромінюванням електричної дуги;
- отруєння організму шкідливими газами, пилом та випарами, що виділяються при зварюванні;
- пожежна безпека та опіки;
- вибухи ацетиленових генераторів від зворотних ударів полум'я, коли не спрацьовує водяний затвор;
- вибухи кисневих балонів у момент їх відкриття, якщо на штуцері балона чи на клапані редуктора є масло;
- небезпечна ситуація при необережному поводженні з пальником;
- механічні травми при заготівельних і складально-зварювальних операціях.

Виконання зварювання і різання електродами пов'язано з експлуатацією обладнання і використанням речовин, які при невмілому поводженні або грубому порушенні правил роботи можуть стати причиною травм і аварійних ситуацій, джерелом отруйної дії на організм зварника і забруднень навколишнього середовища, пожеж. [3].

Щоб робота була безпечною для осіб, безпосередньо зайнятих при процесах зварювання, і для оточуючих, слід знати можливі шкідливі і вражаючі чинники, причини їх виникнення та вміти користуватися прийомами запобігання безпеки, засобами індивідуального і колективного захисту, щоб уникнути розвитку професійних захворювань.

Актуальність роботи. Актуальність даної теми пов'язана з суттєвою проблемою забезпечення виробничої безпеки при зварювальних роботах і споріднених процесах на виробництві. [25].

Зварювання є одним з основних промислових процесів, який використовують для з'єднання металів. Найбільшою шкодою сам процес зварювання і суміжні з ним процеси може завдати самим електрозварникам. В процесі виконання своєї роботи вони піддаються впливам шкідливих і небезпечних виробничих чинників різного походження.

Основні причини нещасних випадків при електрозварюванні – це відсутність засобів індивідуального захисту, ураження електричним струмом зварників з різних причин (наприклад, відсутність систем заземлення металевих частин; відсутність захисту на струмопровідних частинах), при газовому зварюванні – вибух газоповітряної суміші від джерела відкритого вогню, випромінювання від полум'я, іскріння розплавлених металів і шлаків. Ці чинники можуть привести до травматичних ушкоджень і професійних захворювань [25].

Електрозварники в процесі трудової діяльності піддаються впливу цілого комплексу небезпечних і шкідливих виробничих чинників фізичної та хімічної природи.

Під час застосування різного виду зварювальних технологій може підвищуватись рівень електромагнітних полів [4], з'являться лазерне, ультрафіолетове, інфрачервоне, іонізуюче випромінювання, підвищуватись напруженість електростатичного поля, рівень шуму, ультразвук, запиленість і загазованість повітря робочої зони; можливі значні статичні навантаження на руки і плечовий пояс [4, 5]. Всі ці чинники належать до шкідливих виробничих чинників (ШВЧ).

Небезпечні виробничі чинники (НВЧ), які можуть виникати при зварюванні це – вплив електричного струму, іскри і бризки, викиди розплавленого металу і шлаку; можливість вибуху балонів і систем, що знаходяться під тиском; рухомі механізми і вироби [25].

Найбільш поширеними профзахворюваннями у зварювальників є захворювання дихальних шляхів: пневмоконіоз, професійний бронхіт, гіперчутливий пневмоніт, бронхіальна астма [25].

Психофізіологічна дія на зварника виявляється у вигляді фізичних та нервово-психічних навантажень [5]. Фізичні навантаження викликають у людини статичні та динамічні напруження, що залежать від маси зварювального інструменту, гнучкості шлангів і дротів, тривалості безперервної роботи, підтримання робочої пози [5]. Нервово-психічні навантаження призводять до перенапруження зорових аналізаторів та виникнення нервово-емоційного напруження; при недостатньому захисті очей розвивається катаракта [5]. Під час праці на робітників впливають несприятливі метеорологічні фактори, що призводять до розвитку теплового дискомфорту [5]. Під час шліфувальних і зачищувальних робіт, під час газової різки металів у повітря виробничого середовища виділяється пил, який містить з'єднання марганцю, міді, заліза, цинку, свинцю [5].

При зварюванні виділяється дим, який складається з суміші дуже дрібних частинок і газів. Більшість компонентів диму, які виділяються при зварюванні: хром, нікель, миш'як, азбест, марганець,

кремній, берилій, кадмій, оксиди азоту, хлороокіс вуглецю, акролеїн, сполуки фтору, оксид вуглецю, кобальт, мідь, свинець, озон, селен, і цинк можуть бути надзвичайно токсичні.

Деякі складові диму (цинк, магній, мідь, і оксид міді) можуть викликати лихоманку. Отруєння цинком небезпечно для здоров'я, часто відбувається на виробничих майданчиках. Симптоми передозування проявляються не відразу [17].

Основні симптоми лихоманки, включаючи озноб, спрагу, підвищену температуру, болі в м'язах і грудей, кашель, задишку, втому, нудоту, і металевий присмак у роті можуть з'явитися через 6-12 годин після впливу [3,17]. Дим також подразнює очі, слизову носа, дихальних шляхів, викликає кашель, задишку, бронхіт, набряк легенів (скупчення рідини в легенях) і пневмоніт (запалення легенів). Шлунково – кишкові розлади: нудоту, втрату апетиту, блювоту, спазми, і уповільнене засвоєння також пов'язані зі зварюванням. Тривала дія диму від дугового зварювання загрожує розвитком астми [18].

Важливе місце відводиться зварюванню кольорових металів [28]. Особливу увагу необхідно приділяти речовинам, які вражають робітників при зварюванні і різанні кольорових металів. Граничні допустимі концентрації їх часто бувають набагато вищими на практиці. Треба дотримуватись правил безпеки при зварюванні міді і мідних сплавів, тому що мідь і легувальні елементи в її сплавах інтенсивно випаровуються, а пари дуже токсичні. Особливу увагу слід приділяти концентрації марганцю, його наявність в повітрі більше за $0,3 \text{ мг/м}^3$ може викликати важкі захворювання нервової системи [6].

Найбільш небезпечним чинником при проведенні робіт із застосуванням електродугового та газового зварювання може бути виділення зварювального аерозолу (ЗА) в робочій зоні. Так, за статистикою, понад 50% професійних захворювань зварників – це хвороби органів дихання (хронічний бронхіт, пневмокозіоз), можуть також розвиватися легкі форми марганцевих інтоксикацій і різні патології, пов'язані з вдиханням зварювального аерозолу [7].

Зварювальний аерозоль за характером утворення відноситься до аерозолів конденсації і являє собою дисперсну систему, в якій дисперсною фазою є дрібні частинки твердої речовини і дисперсійним середовищем – газ або суміш газів. [8,10]. В основному зварювальний аерозоль складається із заліза і його оксидів, але в його складі можуть бути такі речовини і їх сполуки, як марганець, хром, нікель, алюміній, мідь, цинк, фтор, кремній, азот і багато інших. Токсичність ЗА підвищується при застосуванні зварювальних електродів, у складі яких збільшується концентрація канцерогенного шестивалентного хрому і нікелю [8]. Незважаючи на те, що промислові аерозолі як професійна шкідливість вивчаються досить давно, дотепер не вирішено багато питань щодо залежності їхньої біологічної агресивності від основних фізико-хімічних властивостей. До останніх можна віднести дисперсність частинок, зокрема, нанорозмірних фракцій твердої складової зварювальних аерозолів (ТСЗА), їхні структурні параметри, розчинність окремих сполук [26].

Хімічний склад забруднень, які виділяються при зварюванні залежить в основному від складу зварювальних матеріалів, за допомогою яких відбувається процес зварювання (дроту, покриттів, флюсів) і в меншій мірі від складу металів, які зварюються [8]. Тому створення нових марок зварювальних матеріалів обов'язково має супроводжуватись їхньою первинною санітарно-гігієнічною оцінкою відповідно до міжнародних стандартів ДСТУ ISO 15011-1:2008 [11] та ДСТУ ISO 15011-4:2008 [9].

Вплив канцерогенних речовин шестивалентного хрому і нікелю у складі зварювального аерозолу на органи дихання може підвищувати ризик розвитку онкологічних захворювань. Марганець викликає інтоксикацію, симптомами якої є біль у верхніх кінцівках, погіршення пам'яті та головний біль. Сполуки хрому спричиняють утворення злоякісних пухлин. Цинк впливає на печінку, викликаючи зміни та запалення тканин. Нікель у вигляді зварювального аерозолу змінює реактивну спроможність організму – викликає алергію. Оксиди азоту, озон, фтористий водень чинять переважно подразнюючу дію, що викликає подразнення очей та верхніх дихальних шляхів, кашель, біль у грудях, головний біль. Фтористий водень, внаслідок утворення в організмі токсичного фтор-іона, уражає опорно-руховий апарат, порушує процеси мінерального обміну [5].

Інтенсивність праці та параметри мікроклімату впливають на стан людини, яка працює в запиленому та загазованому приміщенні. При цьому посилені дихальна діяльність призводить до поглинання підвищених доз повітря, а разом з ним – шкідливих речовин; високі температури повітря посилюють шкідливу дію хімічних речовин на організм людини.

Максимальну небезпеку заподіяння шкоди здоров'ю викликають шкідливі речовини у формі твердих частинок. Але при різних технологіях виникають і шкідливі речовини у формі газоподібних частинок, насамперед, сюди відносяться:

- окис вуглецю;
- окис азоту;
- двоокис азоту;
- озон [12].

Більшу частину газів, які виділяються або використовуються, під час зварювання складають: озон, азот і моноокис вуглецю (чадний газ), крім того виділяються і інші небезпечні гази – фосфін і фосген. Озон утворюється в результаті хімічної реакції під впливом ультрафіолетового випромінювання на атмосферний кисень. Озон – це безбарвний газ, сильно подразнює слизову і дихальні шляхи. Азот (оксид азоту) утворюється в результаті хімічної реакції атмосферного азоту і кисню під впливом випромінювання зварювальної дуги і нагрітого металу. Азот негативно впливає на легені. Чадний газ утворюється під час зварювання електродом, що плавиться в середовищі активних газів (MAG) в процесі розщеплення вуглекислого газу. Чадний газ зупиняє процес збагачення крові киснем [3]. Озон і оксиди азоту в великих дозах смертельні, а в малих можуть викликати подразнення слизової оболонки носа і носоглотки і серйозні респіраторні, легеневі

захворювання. Двоокис азоту є небезпечним вже у відносно малих концентраціях, а у великих концентраціях він може призвести до смертельного набряку легенів. В результаті впливу ультрафіолетового випромінювання зварювальної дуги хлоровані вуглеводневі розчинники: типу трихлоретилен, 1, 1, 10 трихлоретан, хлористий метилен і тетрахлоретилен вступають в хімічну реакцію, виділяючи газ фосген (хлорокис вуглецю). Навіть дуже маленька кількість хлорокису вуглецю може бути смертельною, хоча ранні ознаки отруєння – запаморочення, озноб, і кашель зазвичай проявляються через 5 або 6 годин [3].

Все це впливає на здоров'я людини та на стан навколишнього середовища.

Вплив всіх цих чинників безпеки призводить до розвитку хронічних бронхітів, захворювання опорно-рухового апарату, периферичної нервової системи, дерматозів, хронічної інтоксикації марганцем та іншими токсичними компонентами зварювального аерозолю.

Завдяки багаторічним дослідженням на декількох підприємствах вдалося встановити, що пневмоконіоз і хронічний бронхіт розвиваються в осіб до 40 років, зайнятих на зварюванні сталі та сталевих конструкцій, при середньому стажі роботи за професією понад 14 років. Чимало зварювальників з великим стажем за станом здоров'я «недопрацьовують» навіть до пільгового пенсійного 55-річного віку (за умови повного стажу роботи зварювальником не менше 12 років). Клінічна картина пневмоконіозів має низку схожих рис: повільний хронічний перебіг з тенденцією до прогресування, що нерідко призводить до порушення працездатності; стійкі склеротичні зміни в легенях[7].

Понад 50% професійних захворювань зварників – це хвороби органів дихання і різні патології, пов'язані з вдиханням зварювального аерозолю[29]. Щоб уникнути несприятливого впливу виробничих факторів, характерних для електрозварювання, необхідно перешкоджати потраплянню до органів дихання зварювального аерозолю.

Всі види зварювання та різання металів є небезпечними у відношенні розвитку електроофтальмії. Електрозварювальні роботи небезпечні також з точки зору можливості електротравм. В операторів плазмових установок під впливом шуму й ультразвуку можуть розвиватися астеноневротичний синдром, вегетосудинна дисфункція, стійке зниження слуху, у клепальників – вібраційна патологія. Останніми роками встановлено, що багато компонентів зварювального аерозолю, не викликаючи специфічних професійних хвороб, при тривалому впливі накопичуються в організмі і збільшують ризик виникнення серцево-судинних і онкологічних захворювань[5].

Тому для попередження виникнення загальних і професійних захворювань важливе значення має ефективна вентиляція з урахуванням особливостей технологічного процесу, а також застосування засобів індивідуального захисту[29].

Недивлячись на постійне удосконалення способів зварювання та зварювальних матеріалів, багато

гігієнічних проблем зварювального виробництва остаточно не вирішено. А саме: утворення і накопичення СО в замкненому, не вентилярованому приміщенні. Як наслідок цього залишаються незадовільними умови праці електрозварників, що негативно позначається на їх здоров'ї та працездатності. Комплексний характер негативного впливу на здоров'я зварників небезпечних та шкідливих виробничих чинників, а також тяжкості і напруженості праці, вимагають здійснення різноманітних оздоровчих заходів.

Метою дослідження є порівняльний аналіз існуючих заходів і засобів захисту зварників в процесі роботи від впливу шкідливих чинників і визначення найбільш ефективніших з цих засобів з метою подальшого удосконалення.

Матеріали та методи дослідження. Аналітичний огляд наукових публікацій і баз даних міжнародних стандартів з питань праці.

Аналіз стану питання безпеки роботи зварювальників/ Існує велика кількість різновидів зварювання [19]. Основні види зварювання можна представити у вигляді схеми (рис.1)



Рис. 1 – Основні види зварювання

Як вже було сказано вище процес зварювання характеризується наявністю шкідливих та небезпечних виробничих чинників.

Автори всі шкідливі виробничі чинники при різних видах зварювання і споріднених процесах звели в табл.1.

Проаналізував наявність шкідливих чинників при різних видах зварювання і споріднених процесах можна зробити висновок, що робота зварника є однією з найбільш професійно шкідливих [2]. Всі ці чинники, за певних умов, можуть призводити до професійних захворювань та нещасних випадків робочих зварювальних професій [4].

Таблиця 1 Шкідливі виробничі чинники при різних видах зварювання і споріднених процесах

Шкідливі виробничі чинники	Види процесів
1	2
Шкідливі речовини	Ручне дугове зварювання покритими електродами. Зварювання під флюсом: напівавтоматичне і автоматичне зварювання. Дугове зварювання в захисних газах: напівавтоматичне і автоматичне. Електрошлакове зварювання. Контактне зварювання (точкове, рельєфне, шовне та ін.) Контактне стикове зварювання оплавленням. Електронно-променеве зварювання. Ультразвукове зварювання Газове зварювання. Плазмове зварювання. Кисневе, киснево-флюсове різання. Плазмове різання Лазерне зварювання і різання Наплавлення Пайка Напилення
Ультрафіолетове випромінювання	Ручне дугове зварювання покритими електродами. Дугове зварювання в захисних газах: напівавтоматичне і автоматичне. Електрошлакове зварювання Електронно-променеве зварювання. Газове зварювання. Плазмове зварювання. Кисневе, киснево-флюсове різання. Плазмове різання. Лазерне зварювання і різання Наплавлення Напилення
Видиме	Ручне дугове зварювання покритими електродами. Дугове зварювання в захисних газах: напівавтоматичне і автоматичне. Електрошлакове зварювання. Електронно-променеве зварювання. Газове зварювання. Плазмове зварювання. Кисневе, киснево-флюсове різання. Плазмове різання. Лазерне зварювання і різання. Наплавлення. Напилення.

1	2
Інфрачервоне випромінювання	Ручне дугове зварювання покритими електродами, зварювання під флюсом: напівавтоматичне і автоматичне. Дугове зварювання в захисних газах: напівавтоматичне і автоматичне. Електрошлакове зварювання. Контактне зварювання (точкове, рельєфне, шовне та ін.). Контактне стикове зварювання оплавленням. Газове зварювання. Плазмове зварювання. Кисневе, киснево-флюсове різання. Плазмове різання. Лазерне зварювання і різання. Наплавлення. Напилення.
Електромагнітні поля	Контактне зварювання (точкове, рельєфне, шовне та ін.). Контактне стикове зварювання оплавленням. Дифузійне зварювання. Зварювання струмами підвищеної частоти.
Магнітні поля	Контактне зварювання (точкове, рельєфне, шовне та ін.). Контактне стикове зварювання оплавленням.
Іонізуючі випромінювання	Електронно-променеве зварювання. Плазмове зварювання. Плазмове різання.
Шум	Ручне дугове зварювання покритими електродами. Зварювання під флюсом: напівавтоматичне і автоматичне. Дугове зварювання в захисних газах: напівавтоматичне і автоматичне. Електрошлакове зварювання. Контактне зварювання (точкове, рельєфне, шовне та ін.). Контактне стикове зварювання оплавленням. Електронно-променеве зварювання. Зварювання тертям. Дифузійне зварювання. Кисневе, киснево-флюсове різання. Ультразвукове зварювання. Газове зварювання. Плазмове зварювання. Плазмове різання. Лазерне зварювання і різання. Напилення.

Закінчення таблиці 1

1	2
Ультразвук	Дифузійне зварювання. Ультразвукове зварювання. Плазмове зварювання. Кисневе, киснево-флюсове різання. Плазмове різання. Напилення.
Статичне навантаження на руку	Ручне дугове зварювання покритими електродами. Зварювання під флюсом: напівавтоматичне і автоматичне. Дугове зварювання в захисних газах: напівавтоматичне і автоматичне. Контактне зварювання (точкове, рельєфне, шовне та ін.). Газове зварювання. Контактне стикове зварювання оплавленням. Кисневе, киснево-флюсове різання. Плазмове різання. Наплавлення

У структурі діагнозів професійних захворювань серед українських працівників хвороби органів дихання складають 40,4% (262 випадки). Загалом за підсумками першого кварталу 2018 року Фондом соціального страхування України зареєстровано 649 випадків захворювань, що були набуті в результаті професійної діяльності. [20].

На сьогоднішній день немає статистики і недостатньо розглянуті питання по дослідженню кількості CO, яка потрапляє до організму зварника в процесі праці.

Оксид вуглецю утворюється при наступних процесах: газово пресованому зварюванні, зварювання металевим електродом в середовищі інертного газу (MIG); дугове зварювання металевим електродом в газовому середовищі (GMAC), зварювання вольфрамовим електродом в інертному газі (TIG); дугове зварювання вольфрамовим електродом в газовому середовищі (GTAW); дугове зварювання в середовищі гелію, плазмове зварювання (PAW) і плазмове зварювання напиленням; дугове різання вольфрамовим електродом, зварювання трубчастим електродом (FCAW); дугове зварювання розплавленим електродом в середовищі активного газу (MAG), повітряно-дугове різання [13].

Вуглекислий газ потрапляє в зону зварювання і під впливом високої температури дуги розпадається на чадний газ і кисень. Процес розпаду відбувається за реакцією: $2\text{CO}_2 = 2\text{CO} + \text{O}_2$ [30]. В результаті реакції в зоні зварювання утворюється суміш з трьох газів: вуглекислий, чадний і кисень. Чадний газ в зоні зварювання являє велику небезпеку, особливо в замкнених і просторах що погано вентилуються.

Чадний газ не має запаху, безбарвний, тому його неможливо відчути. Він утворюється в результаті горіння в умовах нестачі кисню. Тобто, якщо в приміщенні немає достатнього доступу свіжого

повітря, погано працює вентиляція, то там може збиратись чадний газ. Крім того, вітряна погода може спричинити зворотню тягу в вентиляційних каналах, а через це небезпечні продукти горіння не виводяться назовні і накопичуються у приміщенні.

Чадний газ небезпечний тим, що потрапляючи в кров (рис. 2), він сполучається з гемоглобіном та робить його нездатним розносити кисень по організму. Через це людина гине як від задухи.

Знаходження протягом двох годин в приміщенні з концентрацією CO у повітрі лише 0,1% призводить до втрати свідомості, після чого людина може швидко померти. Втрата свідомості супроводжується таким знесиленням, що людина навіть помітивши небезпеку, вже неспроможна врятуватись.

Такі симптоми як погіршення світлової та кольорової чутливості зору, погіршення слуху, головний біль, відчуття тиску свідчать про небезпечну концентрацію чадного газу в повітрі (0,05% CO).

При вищих концентраціях газу відчуватиметься сильний головний біль, слабкість, запаморочення, нудота [24].

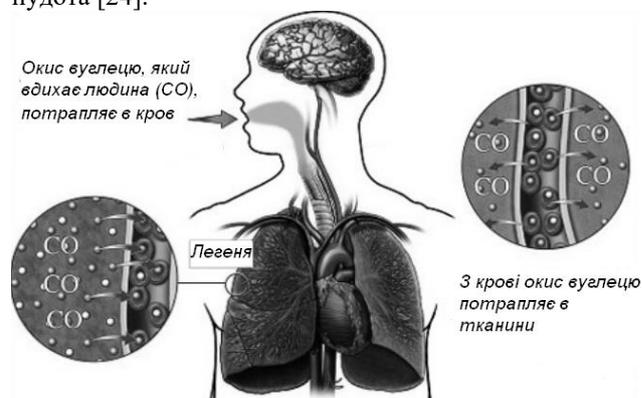


Рис. 2 – CO в організмі людини

В процесі зварювання чадний газ виділяється і зварник ним дихає, таким чином без достатнього захисту працюючого він обов'язково потрапляє в кров. Це може призвести до проблем з кров'ю і розвитку такого захворювання, як лейкемія.

Більш детальному дослідженню цього питання будуть присвячені наступні роботи.

Інтенсивна світлова радіація під час дугового зварювання може викликати пошкодження очей, а інфрачервоне випромінювання може пошкодити рогівку очей і призвести до катаракти. Навіть короточасний вплив (менше ніж одна хвилина) невидимого оку ультрафіолетового випромінювання зварювальної дуги може привести до серйозних наслідків, коли зварювальники за їх висловом "встигають нахапатися зайчиків". Перші ознаки такого впливу зазвичай проявляються через кілька годин і включають відчуття попадання піску або абразивних частинок в очі, розмитий зір, інтенсивні болі, слезотечіння очей і головні болі.

Інтенсивна світлова радіація дуги може впливати на персонал, що працює поблизу. Приблизно половина пошкоджень зору доводиться на персонал, який безпосередньо не бере участь в процесі зварювання. Зварювальники, що працюють без належного захисту, з-за негативного впливу ультрафіолетового

випромінювання можуть бути схильні до хронічних захворювань очей, що призводить до погіршення зору.

Надмірна доза ультрафіолетових променів призводить до опіків шкіри, збільшується ризик захворювання на рак шкіри. Променеві опіки очей проявляються не відразу, а через 4-6 годин [25]. Надмірний шум в процесі зварювання призводить до пошкодження слуху зварника. Високий рівень шуму також викликає нервову напругу і збільшує кров'яний тиск, і може сприяти розвитку хвороб серця.

Певні спеціалізовані види зварювання можуть створювати надмірний рівень шуму [22,23]. Тривале перебування в умовах підвищеного шуму викликає перевтому, збудження і дратівливість робочого персоналу. Тому працюючи в умовах підвищеного шуму, потрібно визначати рівень шуму. Якщо рівень шуму перевищує 85 децибел, роботодавець зобов'язаний вжити певних заходів і забезпечити необхідними засобами захисту слухових органів.

Травми і пошкодження м'язових і кісткових тканин Зварювальники часто скаржаться на болі спини, плечового пояса, тендиніт, слабкість в м'язах, защемлення нервових закінчень, холодні кінцівки рук (порушений кровообмін), і захворювання колінних суглобів. Робоче положення під час зварювання (особливо при зварюванні на стелі), вібрація, підйом вантажів все це може сприяти розвитку цих захворювань.

Значна частина зварювальних робіт проводиться за межами цехів, де можна в значній мірі контролювати умови, – на відкритих будмайданчиках, при ремонті великих споруд і машинного обладнання. Зварнику доводиться переносити все своє обладнання, встановлювати його і працювати, наприклад, в тісному замкнутому просторі або на хитких лісах. Через те, що потрібно дотягуватися до потрібної точки, опускатися на коліна або приймати інші незручні положення, зварювальник стикається з цим ризиком отримання кістково-м'язових травм, змушений відчувати велике фізичне напруження, надмірну втому. Робітникам в герметичному захисному одязі загрожує і тепловий стрес, особливо в жарку погоду.[20]

Зварювальні роботи відносяться до категорії підвищеної небезпеки[14] як для самого зварника, так і для людей, що знаходяться в безпосередній близькості від робочого місця.

У виробничих умовах не завжди можна знизити вміст усіх шкідливих речовин до ГДК за рахунок застосування тільки колективних засобів захисту: загальнообмінної (припливно– витяжної) та місцевої вентиляції. Тому в таких випадках необхідно застосовувати засоби індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД).

У перелік обов'язкових засобів, входять: маска, спеціальний костюм, взуття, рукавиці. Додатково можуть використовуватися захисні каски, щитки, протигази, респіратори, навушники, страхові системи [15].

Ефективне застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) залежить від їх правильного вибору і умов експлуатації. Також необхідно враховувати конкретні умови виробництва, вид та тривалість впливу шкідливого чинника і індивідуальні

особливості людини. При застосуванні зварювальних технологій є необхідним використання засобів індивідуального захисту. Існує безліч виробників і різних модифікацій ЗІЗ, які повинні відповідати ДСТУ EN ISO 11611:2016 Одяг захисний для використання під час зварювання та суміжних процесів (EN ISO 11611:2015, IDT; ISO 11611:2015, IDT).

Засоби індивідуального захисту різного функціонального походження, розроблені Фізико-хімічним інститутом захисту навколишнього середовища і людини (ФХІЗНСІЛ) з урахуванням специфіки умов їх експлуатації, вже кілька десятиліть застосовуються при зварюванні металів [16].

Особливої уваги заслуговує комплект засобів індивідуального захисту зварників та робочих суміжних професій від шкідливих виробничих чинників (механічні пошкодження, іскри і бризки розплавленого металу, випромінювання тепла, токсичні гази і пари, аеродисперсні частинки), у складі котрого сезонні костюми зварника (КЗ) і протигазовий гігієнічний комплект (ПГК), адаптовані до мікрокліматичних умов робочої зони; захисний жилет, фартух, рукавиці, краги, замінні рукави, сумісні з рукавицями; газопилозахисні респіратори «Мрія» та «Зварник».

Згадані ЗІЗ відповідають функціональним, експлуатаційним, ергономічним і гігієнічним вимогам. Критерієм досконалості і надійності їх конструкції є анатомічність крою одягу, типізація, уніфікація та мінімізація кількості деталей, застосування сучасних конструкційних матеріалів, які мають відповідні умовам експлуатації товщину, поверхневу щільність, стійкість до стирання, міцність на розрив та роздир, повітря– і паропроникність, гігроскопічність (у випадку ПГК і респіраторів «Мрія» і «Зварник»), крім зазначеного, – захисну ефективність і динамічну поглинальну ємність іонообмінних нетканних матеріалів, фільтруючих і сорбційно-фільтруючих матеріалів, активність низькотемпературного каталізатора на застосування яких у складі ЗІЗ є дозвіл Міністерства охорони здоров'я України).

Фільтруючі ЗІЗОД призначені для очистки повітря від шкідливих речовин у вигляді аеродисперсних частинок різного походження (пил, дим, туман) або/і газів і парів, коли їх концентрація перевищує ГДК. Їх застосування дозволяється, якщо відомі склад та концентрація шкідливих речовин, а також достатня кількість кисню в повітрі робочої зони (не менше ніж 17% об.). Заборонено застосування фільтруючих ЗІЗОД при виконанні робіт у важкодоступних та погано провітрюваних приміщеннях малого об'єму: цистернах, колодязях, трубопроводах.

На даний час в Україні для виробництва фільтруючих респіраторів використовується фільтруючий нетканний матеріал «Елефлен» у вигляді полотна з ультра тонких поліпропіленових волокон. Температурний діапазон його експлуатації – від мінус 30°C до плюс 140°C

Фільтруючі ЗІЗОД не можна застосовувати, якщо невідомий склад і концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони, а також коли газо– чи пароподібна шкідлива речовина не має яскраво

виявлених ідентифікаційних властивостей (смак, запах). У цих випадках необхідно застосовувати ізолюючі ЗІЗОД.

В умовах фізичної напруги, а також підвищеної температури повітря в робочій зоні негативний вплив ЗІЗОД на організм користувача посилюється, зокрема, при використанні безклапанних респіраторів внаслідок намокання півмаски і “цементациї” пилу збільшуються опір диханню та навантаження на серцево-судинну систему. У таких випадках доцільно використовувати фільтруючі респіратори, що споряджені вузлами клапанів видиху, наявність яких значно зменшує опір видиху, перешкоджає утворенню конденсату і сприяє видаленню з підмаскового простору зайвих тепла і вологи.

Данні щодо нормованої тривалості використання фільтруючих респіраторів з різним початковим опором диханню при виконанні роботи різної важкості протягом однієї години робочої зміни наведені у табл. 2.

Таблиця 2 Нормована тривалість використання фільтруючих респіраторів

Важкість роботи	Початковий опір диханню	
	до 100 Па	понад 100 Па
Легка	Не більше 45 хв.	Не більше 30 хв.
Середня	Не більше 30 хв.	Не більше 15 хв.
Важка	Не більше 15 хв.	Не більше 3–5 хв. на кожні півгодини

Час, що залишився повністю або частково до завершення робочої зміни, рекомендується займати більш легкою працею, при виконанні котрої респіратор не потрібен. Робота зварника відноситься до робіт середньої важкості ІІб.

Найпростішим і найдоступнішим засобом захисту органів дихання зварювальника є респіратор [4,7].

Респіратор для зварювальника щонайменше має бути класу FFP2, тобто забезпечувати захист до 12 ГДК, з негорючим зовнішнім шаром, клапаном видиху для забезпечення відведення тепла і вологи, досить міцними та зручними для підгонки гумовими ремінцями. Цілковито зайвим буде і додатковий вугільний шар, що фільтрує газову складову зварювального аерозолю. Усі ці властивості характерні для сучасного респіратора, призначеного для зварювальника [4, 7].

Респіратор повинен ефективно захищати органи дихання і не заважати диханню, і обов'язково відповідати ДСТУ EN 149:2003 або ДСТУ EN 405:2003, або ДСТУ EN 1827-2001.

Авторами статті представлена таблиця сучасних респіраторів, які використовуються зварниками (табл. 3).

Таблиця 3 Найбільш поширені сучасні респіратори в Україні для зварників

Марка респіратора	Перелік речовин від яких захищають органи дихання
ФІЛЬТРУЮЧІ ПРОТИПИЛОВІ РЕСПІРАТОРИ (ФП)	
«ЛЕПЕСТОК-210» FFP2 ДСТУ EN 149:2003	Від пилу та аерозолів, але не від парів та газів
«СНІЖОК» FMP2 (ДСТУ EN 149:2003)	Від пилу та аерозолів, але не від парів та газів
«СНІЖОК» К FMP2 (ДСТУ EN 149:2003)	Від пилу та аерозолів, але не від парів та газів
ФІЛЬТРУЮЧІ ГАЗОПИЛОЗАХИСНІ РЕСПІРАТОРИ (ГП)	
«ЗВАРНИК» FFGаз2P2(ДСТУ EN 405:2003)	Кислі гази і озон; тверда складова зварювальних аерозолів
«МРІЯ» FMA1P2 (ДСТУ EN 1827-2001)	Пари органічних сполук, точка кипіння котрих вище 65°C; аеродисперсні частинки
«МРІЯ» FMB1P2 (ДСТУ EN 1827-2001)	Хлор, сірководень, ціаністий водень; аеродисперсні частинки
«МРІЯ» FME1P2(ДСТУ EN 1827-2001)	Кислі гази; тверда складова зварювальних аерозолів
«МРІЯ» FMK1P2 (ДСТУ EN 1827-2001)	Аміак і пари азотомісних органічних основ, аеродисперсні частинки
«СНІЖОК» FMA1P2 (ДСТУ EN 1827-2001)	Пари органічних сполук, точка кипіння котрих вище 65°C; аеродисперсні частинки
«СНІЖОК» FMB1P2 (ДСТУ EN 1827-2001)	Хлор, сірководень, ціаністий водень; аеродисперсні частинки
«СНІЖОК» FME1P2(ДСТУ EN 1827-2001)	Кислі гази і пари кислот; аеродисперсні частинки
«СНІЖОК» FMK1P2 (ДСТУ EN 1827-2001)	Аміак і пари азотомісних органічних основ; аеродисперсні частинки
«СНІЖОК» FMГаз2P2(Ш) (ДСТУ EN 1827-2001)	Кислі гази і пари кислот, аміак і пари азотомісних органічних основ, озон, пари органічних сполук; аеродисперсні частинки

На ринку України широко представлені і моделі респіраторів іноземного виробництва, такі як:

1. 3М 9925 респіратор для зварювання FFP2, клас 2, виробник – 3М (США). Він забезпечує захист від пилу, озону, диму, аерозолів, туманів, органічних парів
2. 3М 9928 клас захисту – FFP2, виробник – 3М (США).

Він забезпечує захист від пилу, озону, диму, органічних парів.

Сфера застосування респіратора тієї чи іншої марки визначається головним чином хімічним та дисперсним складом аерозолі, а також концентрацією речовини в повітрі робочої зони. Раніше при електродуговому зварюванні часто застосовували респіратор марки "Лепесток-200". Однак істотним недоліком респіраторів типу "Лепесток", стосовно захисту органів дихання від шкідливих речовин, які утворюються при зварюванні, є те, що ці респіратори (за своїм призначенням – тип ФП) не можуть очищати повітря від шкідливих газоподібних речовин (монооксиду вуглецю, оксидів азоту, озону, фтористого водню та тетрафтористого кремнію). Тому для захисту органів дихання зварників більш доцільно застосовувати респіратори типу "Снежок-ГП". Ці респіратори, крім протиаерозольного фільтра з матеріалу типу ФП, мають додатковий протигазовий фільтр з комбінованого волокнистого сорбційно-фільтруючого матеріалу, а також клапан видихання. Останній полегшує дихання, причому фільтруюча тканина зсередини не запотіває. Це дозволяє тривалий час користуватися респіратором без заміни фільтруючого елемента. [4,7].

Усім вимогам, які ставляться до респіраторів при зварюванні та споріднених процесах, відповідає респіратор «Сніжок», розроблений і виготовлений Фізико-хімічним інститутом захисту оточуючого середовища і людини Міністерства освіти і науки України та Національної Академії Наук України (Одеса).

Для захисту органів дихання при зварюванні покритими електродами, особливо з покриттям, що містить фтористий кальцій, а також порошковими дрютами і під флюсами, коли повітря забруднюється газоподібними фтористими сполуками, повинні застосовуватися респіратори марок "Сніжок ГП-В" та "Сніжок ФГП-В". При аргон дуговому зварюванні кольорових матеріалів, сплавів та високолегованих сталей, коли в повітрі робочої зони у великих кількостях присутній озон, необхідно користуватися респіраторами марок "Сніжок ГП-озон" та "Сніжок ФГП-озон". [4].

Проте, на жаль, як засвідчує практика, зварювальники, особливо старшого віку, доволі рідко користуються респіраторами, навіть незважаючи на знання про шкоду зварювального аерозолі. Та їх можна зрозуміти – бо щоб вдихнути повітря, потрібно подолати опір фільтруючого шару, а це, своєю чергою, додаткові енерговитрати людини, що працює в надзвичайно напруженому режимі [7].

Шлангові та автономні ізолюючі маски зварника з примусовою подачею повітря в зону дихання мають ряд переваг перед фільтруючими респіраторами. В їх конструкції передбачена подача повітря в лицеву частину маски (100...200 л/хв), що забезпечує постійний надлишковий тиск, який виключає

підсмоктування в зону дихання забрудненого повітря. При цьому обличчя працюючого омивається струменем чистого повітря потрібної температури, що при високих температурах на робочому місці забезпечує необхідні мікрокліматичні умови для запобігання перегрівання. Відпрацьоване повітря виходить назовні через щілини. На відміну від респіраторів у підмасковому просторі таких ЗІЗОД відсутній опір диханню, а вміст вуглекислого газу в повітрі, що вдихається, невеликий. Подача свіжого повітря запобігає запотіванню скла маски. Період дії цих засобів захисту нічим не обмежується, крім фізіологічних можливостей працюючих з ними.

Конструктивні особливості масок зварника з системою очищення та подачі повітря в зону дихання визначені необхідністю захисту органів дихання від шкідливих речовин, а очей від випромінювання. Складовими частинами таких пристроїв є захисна маска зварника, фільтруючий елемент, елемент подачі повітря та з'єднувальний шланг.

Маска повинна мати світлофільтр, що захищає очі від випромінювання зварювальної дуги; причому в її конструкції слід передбачати можливість спостереження за підготовчими операціями при виконанні зварювання без піднімання маски, оскільки це призведе до розгерметизації зони дихання. Залежно від цього розроблені маски зі світлофільтрами на рідких кристалах (з автоматичним затемненням) або зі звичайним світлофільтром (постійної оптичної густини), що відкривається.

Широкого поширення дістали маски зі світлофільтрами з автоматичним затемненням і системою очищення та подачі повітря в зону дихання "Speedglas Fresh Air" фірми "Hörnell Speedglas Inc." (США), "Ainstream" фірми "Racal" (Великобританія), "Fresh Air Vnit" фірми "Nederman" (Швеція) та інші, що забезпечують надійний захист очей, обличчя та органів дихання зварника [4].

Але на українському ринку вони достатньо дорого коштують. Наприклад, маска зварника «хамелеон 3М Speedglas 9100Air V з турбоблоком ADFLO Li-Ion» станом на 2019 рік коштує 47784.96 грн. Її основне призначення це роботи в умовах обмеженої вентиляції з вмістом кисню не менше 19,5% і рівнем забруднення повітря не більше 50 ГДК. Маска з системою примусової вентиляції оснащена спеціальними електронними пристроями, безперервно контролюючих і регулюючих подачу повітря в залежності від потреб. При потребі застосовують проти аерозольний фільтр.

Маска зварника «хамелеон speedglas 9002v з fresh-air» коштує 29 918, 96 грн. (Ціни наведено Інтернет-магазин «ВІКО») Система ідеально підходить для роботи в замкнутих просторах і інших не вентиляваних приміщеннях, де неможливе застосування фільтруючих засобів індивідуального захисту. Застосовують для роботи в закритих приміщеннях при високій концентрації димів, аерозолів і газів.

Сучасні маски успішно захищають зварника від багатьох неприємностей, адже, крім захисного скла, в них вставляється світловий фільтр. Розроблено кілька типів масок: традиційні (світлофільтр у фіксованому

стані); з підйомним світлофільтром; маски «хамелеон» – автоматичного типу. Перші два типи являють собою, так звані, «пасивні» маски. Такі маски не завжди справляються зі своїм основним завданням – захистом очей від шкідливих випромінювань. «Активні» маски типу «хамелеон» змінюють ступінь свого затемнення автоматично в залежності від імпульсу світла зварювальної дуги і дозволяють контролювати процес зварювання без шкоди для зору.

Щодо системи подачі чистого повітря під маску, то найбільшого розповсюдження за кордоном дістали портативні автономні системи, що розташовуються на поясі зварника. Такі системи складаються з електричного збудувача тяги, який подає повітря під маску, фільтруючого блока для очищення забрудненого повітря, що забирається з робочої зони зварника, та гнучких шлангів, які з'єднують систему очищення та подачі повітря із захисною маскою. Схема і пристрій цих масок компактні, мають незначну вагу, не заважають проведенню зварювальних робіт та звільняють руки зварника.

Широко застосовуються також маски, до яких повітря надходить від внутрішньо цехової компресорної системи. Комплект складається з герметичної маски; фільтра з активованим вугіллям для очищення повітря від домішок; редуктор, приєднаний до магістралі зі стиснутим повітрям; запобіжний клапан, що спускає повітря з-під маски при його надмірному тиску; індикаторний пристрій, який дозволяє визначати ступінь забруднення активованого вугілля у фільтрі; поясний ремінь, на якому змонтовано всі перелічені елементи.

При роботі в умовах з нормальними параметрами мікроклімату згідно ДСН 3.3.6.042-99 розглянуті ЗІЗОД практично задовольняють поставлені вимоги. Але при зварюванні в умовах знижених або підвищених температур, що нерідко буває характерним для зварювального виробництва, дані ЗІЗОД непридатні, оскільки в них не передбачено регулювання температури повітря в зоні дихання. Тому за таких умов необхідно застосовувати ЗІЗОД, які забезпечують очищення і подачу під маску зварника повітряного потоку з заданою температурою від зовнішнього джерела. Такі апарати, крім системи очищення і подачі повітря під маску, мають спеціальний пристрій кондиціонування повітря. Стиснуте повітря, що надходить від промислової мережі або персонального компресора, очищується у фільтрах попередньої та тонкої очистки, подається у вихрову трубку, де відбувається розподіл повітря на охоложене і нагріте. Підготовлене повітря надходить до повітророзподільного блока, що монтується на масці зварника. Температура повітря регулюється дросельним вентиляем в межах $\pm 12^{\circ}\text{C}$ відносно температури навколишнього повітря [4].

Іншим засобом захисту зварника від зварювальних аерозолів є установка місцевої вентиляції. Але цей варіант доречний тоді, коли зварник має стаціонарне місце роботи, при цьому захищається не тільки зварник, але й ті, хто працюють поруч. Однак цей засіб має досить суттєве обмеження. Ефективність роботи місцевого відсмоктування залежить від відстані до джерела диму, і при відстані

понад 70 см, фільтрується не більше 20 % забрудненого повітря. А коли зварнику необхідно обварити досить велику конструкцію, то він, далеко не завжди, тягатиме за собою «хобот» відсмоктування до кожного місця зварювання, не кажучи вже про те, що іноді це фізично неможливо. Те саме можна зазначити і щодо напівавтоматичного зварювання протяжних швів.

Але існує засіб захисту зварника, позбавлений усіх перелічених вище недоліків. Це комплексний засіб індивідуального захисту, куди входить зварювальний щиток з автономним блоком подавання повітря. Зварювальний щиток з автоматичним затемненням світлофільтра забезпечує зварнику постійний захист очей та контроль за робочим місцем, як при запаленій дузі, так і за її відсутності. Автономний блок подавання повітря закріплюється на поясі зварника і постійно захищає його органи дихання

Комплексний засіб індивідуального захисту зварника включає в себе фільтр і мікророзподільник, що працює від акумуляторної батареї, яка забезпечує час безперервної роботи не менше 8 годин, тобто повну робочу зміну. Забруднене повітря проходить три стадії очищення: через металеву сітку, передфільтр грубого очищення й аерозольний фільтр тонкого очищення, який забезпечує коефіцієнт захисту цього засобу захисту 50. Це означає, що під маскою зварника повітря буде в 50 разів чистіше, ніж зовні. При цьому після аерозольного фільтра можна вставити додатковий фільтр від запаху (протигазовий фільтр до 1 ГДК) або універсальний протигазовий фільтр АВЕК1 [4]. Далі чисте повітря, через шланг подавання повітря, подається під зварювальний щиток. Але не спрямованим потоком, а через розподільник повітря, який рівномірно розділяє повітря під зварювальним щитком, унеможливаючи обдування гайморових пазух, розташованих в лобовій частині голови, що істотно знижує ризик застудити їх. Для вимкнення підсмоктування нефільтрованого повітря зварювальний щиток забезпечений лицьовим ущільненням з вогнестійкого матеріалу. Електронна схема «інформує» світловим і звуковим сигналом про необхідність заміни фільтра. Таким чином, у зварника нема потреби стежити за станом свого аерозольного фільтра, за нього це зробить електроніка. До того ж аерозольний фільтр неможливо очистити. Спроба «продути» його може призвести до утворення мікророзривів матеріалу фільтра. При цьому зварник вважатиме, що йому вдалося почистити фільтр, а насправді він дихатиме вже неочищеним повітрям, що спрямовується через ці мікророзриви. Отже, робота з таким «фільтром» завдасть шкоди здоров'ю зварника і передчасно виведе з ладу автономний блок. А ось металеву сітку і передфільтр, навпаки, необхідно час від часу чистити для збільшення терміну служби основного фільтра.

При роботі з фільтруючими засобами захисту треба пам'ятати, що жоден з них не додає кисень у повітря, що вдихається. Скажімо, коли концентрація інших газів у робочій зоні буде настільки великою, що змінить вміст кисню до менш як 18%, використання фільтрувальних засобів захисту заборонено [4]. Така ситуація може виникнути при зварюванні в

замкненому, не вентиляваному приміщенні з використанням захисних інертних газів. А тому в таких випадках рекомендується застосовувати ізолюючі засоби індивідуального захисту. Особливу увагу треба звернути на захист від чадного газу (CO), який може утворюватися в замкненому просторі, це питання не достатньо вивчено. Варто нагадати, що середній термін життя чоловіків в Україні становить 60 років, і для збільшення цього терміну, зокрема працівників, зайнятих на електрозварювальних роботах, необхідно застосовувати сучасні засоби індивідуального захисту органів дихання.

Висновки. Проаналізовані основні зварювальні процеси, які надали пояснення щодо причин виникнення шкідливих та небезпечних виробничих чинників під час зварювального процесу, запропоновано їх класифікацію відповідно до різних процесів зварювання, зроблено аналіз професійних захворювань зварників та наведено способи та засоби захисту зварників від шкідливих чинників які присутні у робочій зоні.

Виконані дослідження з аналізу наукових досліджень щодо забезпечення безпеки зварювальних робіт, показали що на сьогоднішній день недостатньо досліджені засоби захисту від чадного газу який утворюється у процесі зварювання, особливо враховуючи склад електродів. Цим дослідженням будуть присвячені наступні роботи.

Список літератури

- Корнієнко О. М. Становлення та розвиток зварювального виробництва в Україні у світовому контексті (70-ті роки XIX ст. – 50-ті роки XX ст.): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. іст. наук:[спец.] 07.00.07 «історичні науки і техніки»/ Центр досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки ім. Г.М.Доброва НАН України.Київ, 2009.
- Марків Б. Умови праці зварників. Вплив шкідливих виробничих факторів.//<http://te.dsp.gov.ua/umovy-pratsi-zvarnykiv-vplyv-shkidlyvyh-vyrobnychyh-faktoriv/> 10 травня 2018
- Вредные условия производства при выполнении сварочных работ, рекомендации и меры повышения безопасности // www.nisa.net.ua
- Левченко О.Г. Гігієна праці та виробничя санітарія у зварювальному виробництві. навч. посіб. Київ: «Основа», 2004. 98 с.
- Демчина М. Вплив компонентів зварювального аерозолі на здоров'я людини.//<https://cityadm.lviv.ua/news/society/emergency/233003-vplyv-komponentiv-zvariuvalnogo-aerозolu-na-zdorovia-liudyny>. 24.06.2016
- Биховський О.Г., Лазуткін М.І., Охорона праці при виробництві конструкцій з кольорових металів і сплавів // Вестник НТУ «ХПІ». 2012. №1.
- Захист органів дихання під час зварювальних робіт// <http://oppb.com.ua/articles/zahyst-organiv-dyhannya-pid-chas-zvariuvalnyh-robot> 27.04.2018
- Левченко О. Г., Демецька О.В., Лук'яненко А. О. Цитотоксичність зварювальних аерозолів, що утворюються під час зварювання покритими електродами // Український журнал з проблем медицини праці. 2016. № 3. С. 30–35
- ISO 15011-1: 2008. 2011, Health protection and safety in welding and related processes. A laboratory method for sampling aerosols and gases, generated in arc welding. Part 1. Determination of emission levels and sampling for analysis of aerosol microparticles. [Effective as of 15.08.2008]. Kyiv : Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 8 p. (in Ukrainian).
- Технічна енциклопедія Tech Trend // <http://techtrend.com.ua/index.php?newsid=15962>
- ISO 15011-1: 2008. 2011, Health protection and safety in welding and related processes. A laboratory method for sampling aerosols and gases, generated in arc welding. Part 1. Determination of emission levels and sampling for analysis of aerosol microparticles. [Effective as of 15.08.2008]. Kyiv : Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 8 p. (in Ukrainian).
- Шкідливі речовини при зварюванні і навіщо потрібно фільтровентиляційне обладнання// http://sammit.dp.ua/articles/svarka_vred.htm/ 2017
- Энциклопедия по охране и безопасности труда //<http://base.safework.ru/iloenc>
- Дозвіл на початок виконання робіт підвищеної небезпеки //<http://registrio.com.ua/dozvil-na-pochatok-vikonannya-robot-pidvishhen%D1%97-nebezpeki>
- Левченко О.Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навч. посіб. для практичних робіт з охорони праці для студентів зварювальних спеціальностей. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 181 с.
- Каталог засобів індивідуального захисту. Фізико-хімічний інститут захисту навколишнього середовища і людини Міністерства освіти і науки України та Національної академії наук України (ФХІЗНСІЛ). Одеса. 2017.
- Отруєння цинком: симптоми передозування, лікування наслідків. <https://diagnoz.in.ua> > ШКТ. 3 січня 2019
- Симптоми отруєння чадним димом і правила надання першої допомоги // nastanova.com > Здоров'я
- Види зварювання металу. Основні види зварювання. //учебно-технічний центр //<http://www.dytic.com.ua/index.php/ua/vidy-svarki-metalla-osnovnyye-vidy-svarki-ukr>
- Энциклопедия международной организации труда //<http://prombezpeka.com/enciklopediya-mizhnarodno%D1%97-organizacii%D1%97-praci/>
- Стан виробничого травматизму в Україні у 2014 році за даними Держгірпромнагляду України //Охорона праці і здоров'я: www.fpsu.org.ua
- Международная организация труда //<http://www.ilo.org/Search5/search.do>
- Welding and metal work//Occupational safety and health: електрон. версія журн.: http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---americas/---ro-lima/---sro-port_of_spain/documents/presentation/wcms_250195.pdf
- Техніка безпеки при виконанні зварювальних робіт <https://www.ozon.com.ua/ua/news/tehnika-bizpeku-pru-vukonani-zvariuvalniuh-robot.html>
- Отравление монооксидом углерода (угарным газом)/ под ред. Зобнина Ю. В. 2011.
- Трушкова Е. А., Ладная Е. В. Особенности профессиональных заболеваний электросварщиков при выполнении сварочных работ на производстве // Молодой ученый. 2016. №18.1. С. 25–27. <https://moluch.ru/archive/122/33781/>
- Демецька, О. В. Нанорозмірні фракції твердої складової зварювальних аерозолів, що утворюються під час зварювання покритими електродами зі знизимим вмістом хрому (VI) / О. В. Демецька, І. М. Андрусичина, Т. Ю. Ткаченко, А. О. Лук'яненко, Ю. О. Полукаров // Технічні науки та технології. – 2017. – № 1 (7). – С. 79–86.
- Биковський О.Г., Лазуткін М.І., Охорона праці при виробництві конструкцій з кольорових металів і сплавів // Безопасность жизнедеятельности
- Биковський О.Г. Зварювання та різання кольорових металів. К.: Основа. 2011. – 389 с.
- Костюк І. Ф., Капустник В. А. Професійні хвороби: Підручник. – 2-е вид., переробл. і доп. – К.: Здоров'я, 2003. 636 с.
- Сварка в среде углекислого газа. Полуавтоматическая сварка в среде CO₂ //Технология, процессы и виды сварки//<http://taina-svarki.ru/sposoby-svarki/svarka-v-srede-zashchitnyh-gazov/svarka-v-srede-uglekislogo-gaza.php>

References (transliterated)

- Korniyenko O. M. Stanovlennya ta rozvytok zvariuvaln'noho vyrobnytstva v Ukraini u svitovomu konteksti (70-ti roky KhKh st. – 50-ti roky KhKh st.): avtoref. dys. na zbuttya nauk. stupenya dokt. ist. nauk:[spets.] 07.00.07 «istorychni nauky i tekhniky»/ Tsentr doslidzhen' naukovo-tekhnichnoho potentsialu ta istoriyi nauky im. H.M.Dobrova NAN Ukrainy.Kyiv, 2009.
- Markiv B. Umovy pratsi zvarnykiv. Vplyv shkidlyvykh vyrobnychykh faktoriv.//<http://te.dsp.gov.ua/umovy-pratsi-zvarnykiv-vplyv-shkidlyvyh-vyrobnychyh-faktoriv/> 10 travnya 2018
- Vrednye usloviya proizvodstva pri vypolnenii svarochnykh robot, rekomendatsii i mery povysheniya bezopasnosti // www.nisa.net.ua

4. Levchenko O.H. Hihiyena pratsi ta vyrobnycha sanitariya u zvaryuval'nomu vyrobnytstvi. navch. posib. Kyiv: «Osнова», 2004.98 p.
5. Demchyna M. Vplyv komponentiv zvaryuval'noho aerolyu na zdorov'ya lyudyny. // <https://city-adm.lviv.ua/news/society/emergency/233003-vplyv-komponentiv-zvaryuvalnoho-aerolyu-na-zdorovia-liudyiny>. 24.06.2016
6. Bykhovskyy O.H., Lazutkin M.I., Okhorona pratsi pry vyrobnytstvi konstruksiy z kol'orovykh metaliv i splaviv // Vestnyk NTU «KPI». 2012. No 1.
7. Zakhyst orhaniv dykhannya pid chas zvaryuval'nykh robit // <http://oppb.com.ua/articles/zakhyst-organiv-dykhannya-pid-chas-zvaryuvalnykh-robit> 27.04.2018
8. Levchenko O. H., Demets'ka O.V., Luk'yanenko A. O. Tsyotoksychnist' zvaryuval'nykh aerolyiv, shcho utvoryuyut'sya pid chas zvaryuvannya pokrytymy elektrodamy // Ukrayins'kyi zhurnal z problem medytsyny pratsi. 2016. No 3, 30–35.
9. ISO 15011-1: 2008. 2011, Health protection and safety in welding and related processes. A laboratory method for sampling aerosols and gases, generated in arc welding. Part 1. Determination of emission levels and sampling for analysis of aerosol microparticles. [Effective as of 15.08.2008]. Kyiv : Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 8 p. (in Ukrainian).
10. Технічна енциклопедія Tech Trend // <http://techtrend.com.ua/index.php?newsid=15962>
11. ISO 15011-1: 2008. 2011, Health protection and safety in welding and related processes. A laboratory method for sampling aerosols and gases, generated in arc welding. Part 1. Determination of emission levels and sampling for analysis of aerosol microparticles. [Effective as of 15.08.2008]. Kyiv : Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 8 p. (in Ukrainian).
12. Shkidlyvi rehovyny pry zvaryuvanni i navishcho potribno fil'troventylyatsiyne obladnannya // http://sammit.dp.ua/articles/svarka_vred.htm/ 2017
13. Entsiklopediya po okhrane i bezopasnosti truda // <http://base.safework.ru/iloenc>
14. Dozvil na pochatok vykonannya robit pidvyshchenoyi nebezpeky // <http://registrio.com.ua/dozvil-na-pochatok-vikonannya-robit-pidvishcheno%D1%97-nebezpeki>
15. Levchenko O.H. Okhorona pratsi u zvaryuval'nomu vyrobnytstvi: Navch. posib. dlya praktychnykh robit z okhorony pratsi dlya studentiv zvaryuval'nykh spetsial'nostey. Kyiv: KPI im. Ihorya Sikors'koho, 2018. 181.
16. Kataloh zasobiv indyvidual'noho zakhystu. Fyzyko-khimichnyy instytut zakhystu navkolyshn'oho seredovyscha i lyudyiny Ministerstva osvity i nauky Ukrayiny ta Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny (FKhIZNSIL). Odesa. 2017.
17. Otruyennya tsynkom: symptomy peredozuvannya, likuvannya naslidkiv. <https://diagnoz.in.ua> > ShKT. 3 sichnya 2019
18. Symptomy otruyennya chadnym dymom i pravyla nadannya pershoi dopomohy // nastanova.com > Zdorov'ya
19. Vidy zvaryuvannya metalu. Osnovni vydy zvaryuvannya. // <http://www.dytc.com.ua/index.php/ua/vidy-svarki-metalla-osnovnye-vidy-svarki-ukr>
20. Entsiklopediya mizhnarodnoyi orhanizatsiyi pratsi <http://prombezpeka.com/enciklopediya-mizhnarodno%D1%97-organizaci%D1%97-praci/>
21. Stan vyrobnychoho travmatyzmu v Ukrayini u 2014 rotsi za danymy Derzhzhirpromnahlyadu Ukrayiny // Okhorona pratsi i zdorov'ya: www.fpsu.org.ua
22. Mezhdunarodnaya organizatsiya truda // <http://www.ilo.org/Search5/search.do>
23. Welding and metal work/Occupational safety and health: elektron.versiya zhurn.: http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/--americas/--ro-lima/--sro-port_of_spain/documents/presentation/wcms_250195.pdf
24. Tekhnika bezpeky pry vykonanni zvaryuva'nykh robit <https://www.ozon.com.ua/ua/news/tehnika-bizpeku-pru-vukonani-zvaruvalniuh-robit.html>
25. Zobnena monooksidom ugleroda (ugarnym gazom)/ pod red. Zobnina Yu. V. 2011.
26. Trushkova E. A., Ladnaya E. V. Osobennosti professional'nykh zabolevaniy elektrosvarshchikov pri vypolnenii svarochnykh robot na proizvodstve // Molodoy uchenyy. 2016. No 18.1, 25–27. <https://moluch.ru/archive/122/33781/>
27. Demets'ka, O. V. Nanorozmirmi fraktsiyi tverdoyi skladovoyi zvaryuval'nykh aerolyiv, shcho utvoryuyut'sya pid chas zvaryuvannya pokrytymy elektrodamy zi znyzhenym vmistom khromu (VI) / O. V. Demets'ka, I. M. Andrusyshyna, T. Yu. Tkachenko, A. O. Luk'yanenko, Yu. O. Polukarov // Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi. – 2017. – No 1 (7), C. 79-86.
28. Bykhovskyy O.H., Lazutkin M.I., Okhorona pratsi pry vyrobnytstvi konstruksiy z kol'orovykh metaliv i splaviv // Bezopasnost' zhyznedeyatel'nosty
29. Bykhovskyy O.H. Zvaryuvannya ta rizannya kol'orovykh metaliv. Kyiv: Osнова. 2011, 389.
30. Kostyuk I. F., Kapustnyk V. A. Profesiyni khvoroby: Pidruchnyk. – 2-e vyd., pererobl. i dop. – Kyiv: Zdorov'ya, 2003, 636.
31. Svarka v srede uglekislogo gaza. Poluavtomaticheskaya svarka v srede SO2 // Tekhnologiya, protsessy i vidy svarki // <http://taina-svarki.ru/sposoby-svarki/svarka-v-srede-zashchitnyh-gazov/svarka-v-srede-uglekislogo-gaza.php>

Надійшла (received).22.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Березуцький Вячеслав Володимирович (Березуцький Вячеслав Владимирович, Berezutsky Vyacheslav Vladimirovich) – докт. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Охорона праці і навколишнього середовища», e-mail: viaberezuk@gmail.com

Хондак Інна Іванівна (Хондак Инна Ивановна, Hondak Inna) – старший викладач, ХНУРЕ, Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра охорони праці, e-mail: d_os@nure.ua

ЗМІСТ

Ахлестин А. В., Левченко В. Н. Особенности технологии изготовления тонкостенной балки коробчатой формы с наклонными гофрами на боковых стенках.....	3
Ашкелянец А. В., Коноводов Д. В., Андреев В. В., Бондаренко О. В. Дослідження формозміни та напруженого стану при вільному куванні заготовок із алюмінієвого сплаву з питомою міцністю більше 120 м ² /с ²	8
Бондаренко А. Ю., Ключник И. И., Бембель А. Д. Переходные характеристики пирозлектрических детекторов.....	13
Дитиненко С. О., Крюк А. Г., Новіков Ф. В. Обгрунтування умов підвищення продуктивності, точності та якості обробки при алмазному шліфуванні.....	18
Дмитрик В. В., Глушко А. В., Туренко М. И., Кантер А. Г., Скульский В. Ю. Моделирование сварочного нагрева изготавливаемых соединений энергетического оборудования.....	24
Миронова Т. М., Ашкелянец А. В., Чухліб В. Л., Петруша А. А. Дослідження впливу розмірних параметрів чавунних заготовок та режимів деформування на формування структури в процесі кування.....	30
Обдул В. Д., Широкобоков В. В., Матюхін А. Ю. Диференційоване притискування фланцю заготовки під час витягування.....	36
Паламарь Д. Г., Воробей С. А., Раздобреев В. Г., Приходько И. Ю. Исследование влияния режимов прокатки на эффективность проработки центральных зон сечения раската.....	40
Плеснецов С. Ю. Нові методи контролю твердості поверхневих шарів зміцнених металовиробів.....	45
Плеснецов Ю. А., Сучков Г. М. Исследование влияния деформированного состояния металла подгибаемых элементов на качество перфорированных гнутых профилей.....	50
Полещук В. М., Бровкин В. Л. Моделирование процесса деформации слитка в технологическом канале криволинейной МНЛЗ.....	56
Середа Б. П., Палехова И. В., Середа Д. Б. Упрочнение деталей прокатного оборудования многокомпонентными титановыми покрытиями с помощью инновационной СВС-технологии.....	61
Ткачук М.А., Ищенко О. А., Дьоміан. А., Ткачук М. М., Грабовський А. В., Шеманська В. В., Васильченко Д. Р. Контактна взаємодія елементів штампкового оснащення.....	67
Тришевський О. І., Салтавець М. В. Інженерна методика проектування прогресивного технологічного процесу гарячої прокатки листа.....	77
Федотьев А. М., Шкель С. В. Економічна оцінка технологічної собівартості процесу гомогенізації алюмінієвих сплавів методом пластичної деформації гвинтовою екструзією.....	81
Шипковский Е. В., Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г., Левченко Р. В. Изменение конструкции оборудования и оснастки для предварительного профилирования и штамповки заготовок дисков колес транспортных средств.....	85
Березуцький В. В., Хондак І. І. Зварювання металевих виробів та безпека.....	91

CONTENT

Akhlestin O. V., Levchenko V. M. The features of the technology of manufacturing thin-wall box-shaped beam with tilted corrugations on side walls.....	3
Ashkelianets A. V., Konovodov D. V., Andreiev V. V., Bondarenko O. V. Investigation of form change and stress state in the free forging of aluminum alloy billet with a specific strength more than 120 m ² /sec ²	8
Bondarenko O. Yu., Klyuchnyk I. I., Bembel O. D. Transient processes in a pyroelectric detector.....	13
Ditinenko S. A., Kryuk A. G., Novikov F. V. Justification of conditions for increasing productivity, accuracy and quality of processing during diamond grinding.....	18
Dmytryk V. V., Glushko A. V., Tyrenko M. I., Kanter A. G., Skulskiy V. Yu. Modeling of welded heating of manufactured compounds of energy equipment.....	24
Myronova T. M., Ashkelianets A. V., Chuhlib V. L., Petrusha A. A. Investigation of the effect of cast iron workpiece size factors and deformation modes at form changes in the forging process.....	30
Obdul V. D., Shirokobokov V. V., Matiukhin A. U. Differentiated compression flange clamp during extraction.....	36
Palamar D. G., Vorobii S. A., Razdobreev V. G., Prikhodko I. Y. Investigation of the effect of rolling modes on the efficiency of processing central zones cutting zones.....	40
Plesnetsov S. Yu. New hardness testing methods for surface layers of strengthened metal products.....	45
Plesnetsov Yu. A., Suchkov G. M. Research of the effect of a deformed state of a metal of flexible elements on the quality of perforated born profiles.....	50
Polyeshchuk V. M., Brovkin V. L. Modeling the process of deformation of the ingot in the technological channel of the curvilinear CCM.....	56
Sereda B. P., Palekhova I. V., Sereda D. B. Strengthening of rolling equipment items with multicomponent titanium coatings with the help of innovative SHS-technology.....	61
Tkachuk M.A., Ishchenko O.A., Diomina N.A., Tkachuk M.M., Grabovskiy A.V., Shemanska V. V., Vasilchenko D. R. Contact interaction elements stamping tool.....	67
Trishevsky O. I. , Saltavets M.V. Engineering method of projecting progressive +technological process of hot line sheet.....	77
Fedotiev A. M., Shkel S. V. Economic assessment of the technological costs of the gomogenization process of aluminum alloys by the method of deformation by screw extrusion.....	81
Shchipkovskiy Y. V., Dragobetskii V. V., Puzyr R. H., Levchenko R. V. Modification of equipment design and tooling for preliminary profiling and stamping of cutters wheels vehicles.....	85
Berezuckyi V., Hondak I. Welding of metal products and safety.....	91

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».
СЕРІЯ: ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ
У МАШИНОБУДУВАННІ ТА МЕТАЛУРГІЇ**

Збірник наукових праць

№ 41 (1317) 2018

Наукові редактори: Марченко А.П., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна,
Плєснецов Ю.О., канд. техн. наук, ст. н. с., НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: Курандо О.С., інженер I категорії, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск Шайда В. П., канд. техн. наук

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра обробки металів тиском
Тел.: (057) 707-60-40; e-mail: omd.conf@gmail.com

Обл.-вид. № 41-18.

Підп. до друку 25.11.2018 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. RISO-друк. Гарнітура Таймс.
Ум. друк. арк. 9.2. Обл.-вид. арк. 9,4.
Наклад 100 прим. Зам. № 19. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р..
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Віддруковано у ТОВ «Оберіг»
61140, м. Харків, проспект Гагаріна, 62, к. 97.
Свідоцтво про реєстрацію видавничої
діяльності ДК № 3045 від 07.12.2007 р.