

Вінницький національний аграрний університет
Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БУБНОВСЬКА ІРИНА АНАТОЛІЇВНА

УДК 621.7.016.2

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСБОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВАЛЬЦЮВАННЯ НА ОСНОВІ
МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОЗМІНЕННЯ ЗАГОТОВОК

05.03.05 — процеси та машини обробки тиском

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ (І.А. Бубновська)

Науковий керівник: Гунько Ірина Василівна, кандидат технічних наук, доцент

Вінниця — 2020

АНОТАЦІЯ

Бубновська І. А. Удосконалення процесів вальцювання на основі моделювання формозмінення заготовок. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском». — Вінницький національний аграрний університет, Вінниця. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2020.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальних науково-технічних завдань з удосконалення процесів вальцювання на основі моделювання формозмінення заготовок. Дослідження спрямовані на підвищення ефективності виробництва заготовок, в тому числі для деталей складних профілів, а саме, на підвищення якості виробів із забезпеченням високого коефіцієнту використання металу, економію матеріальних, трудових та фінансових ресурсів.

Метою роботи є підвищення ефективності процесів вальцювання заготовок із алюмінієвих сплавів за рахунок їх удосконалення шляхом розроблення нових схем і режимів вальцювання на основі аналізу формозмінення заготовок, напружено-деформованого стану матеріалу та оцінки його деформовності.

Для дослідження процесів вальцювання використано методи: теоретичні (застосування математичного аналізу) — для дослідження математичних моделей; експериментально-розрахункові (подільних сіток, мікроструктурний) і чисельний (метод скінчених елементів) — для аналізу механіки формоутворення заготовок, напружено-деформованого стану матеріалу, теплових та термомеханічних полів. В основу дослідження деформовності металів покладено методи механіки суцільного середовища, математичної і прикладної теорії пластичності, феноменологічної теорії деформовності. Експериментальні дослідження проводились в лабораторних і промислових умовах на натурних зразках та моделях із застосуванням сучасних приладів, стандартного

обладнання. Обробка експериментальних даних проводилась методами математичної статистики.

В результаті проведеного літературного аналізу визначено, що процеси гарячого вальцювання набули широкого розповсюдження при виготовленні суцільних довгомірних виробів у якості формувальних і штампувальних операцій, проте розширення їх технологічних можливостей, а також розвиток холодного вальцювання обмежується небезпекою руйнування матеріалу і втратою стійкості елементів заготовки в процесі формозмінення. Тому, в роботі значна увага приділяється оцінці деформовності матеріалу та визначенню використаного ресурсу пластичності при вальцюванні заготовок із алюмінієвих сплавів.

Розглянута пластичність алюмінієвих сплавів при холодному деформуванні та проблеми дослідження пластичності металів, що пов'язані із відсутністю способів побудови «єдиної» кривої граничних деформацій через утворення шийки при розтягу зразків та «аномального» підвищення пластичності. Розроблено спосіб випробовування в умовах одновісного розтягу, який полягає у вальцюванні циліндричного зразка на клин валками, радіуси яких зростають в процесі вальцювання, на який було отримано патент України на корисну модель. Спосіб забезпечує можливість випробовування циліндричних зразків при сталому напруженому стані протягом всього процесу вальцювання та дозволяє отримувати значення пластичності в умовах одновісного розтягу. У випадку необхідності отримання за одне випробування двох значень пластичності металу при різних (але постійних в процесі деформування) показниках напруженого стану t_j , здійснюють вальцювання на клин криволінійного зразка. Для цього вальцювання проводять конічними валками, радіуси яких зростають по мірі вальцювання зразка. При цьому менше zdeформована внутрішня бічна поверхня зразка матиме менше значення показника t_j , а більше zdeформована зовнішня поверхня зразка матиме більше значення показника t_j . З використанням даного способу побудовано діаграми пластичності низки алюмінієвих сплавів.

У результаті дослідження механіки формоутворення заготовок при вальцюванні нами розроблено також спосіб виготовлення криволінійних заготовок двоетапним вальцюванням. На першому етапі вальцювання здійснюється на гладку бочку конічними валками, а на другому — заготовка повертається на 90 градусів і вальцюється в калібрах циліндричних валків з керуванням деформованим станом заготовки конічними валками.

За такої умови більш інтенсивно деформуються шари металу на випуклій стороні заготовки, де має місце менша площа плями контакту, що сприяє додатковому викривленню заготовки і забезпечує більш симетричну площу її поперечного перерізу. Цей спосіб надав подальший розвиток процесам вальцювання криволінійних заготовок, забезпечивши отримання значної кривизни та поліпшення якості вироблених деталей із високим коефіцієнтом використання металу. На спосіб було отримано патент України на корисну модель.

Для визначення технологічних можливостей і отримання основних закономірностей напружено-деформованого стану криволінійних заготовок при формуванні вальцюванням проведено імітаційне моделювання в програмному комплексі DEFORM 3D.

В результаті апроксимації отриманих параметрів НДС та переміщень для характерних точок поверхні циліндричної заготовки під час дослідження було отримано аналітичне співвідношення між відносним стисненням заготовки та накопиченою деформацією в середовищі Mathcad, що дає можливість визначення граничної на момент руйнування товщини вальцьованої заготовки та граничних значень інтенсивності деформацій. Таким чином, використання розроблених залежностей в якості оцінки і прогнозування можливості руйнування заготовки підвищує ефективність розроблення технологічних процесів холодного вальцювання.

У результаті проведеної оцінки деформовності алюмінієвих сплавів при холодному вальцюванні, з використанням діаграм пластичності і скалярного критерію деформовності, а також тензорної моделі руйнування, визначено

граничні до руйнування значення інтенсивності деформацій та виявлено низку закономірностей, а саме: для матеріалів із вищим ступенем нелінійності характеру накопичення пошкоджень спостерігається зменшення швидкості накопичення пошкоджень; процес часткового «заліковування» пошкоджень можливий під час безперервної зміни напрямків приростів деформацій на тлі збільшення накопиченої деформації; під час процесу вальцювання на клин гранична пластична деформація в небезпечній зоні заготовки із задовільним ступенем точності може вважатися рівною граничній пластичній деформації за мов [ЭОЗТЯГ].

Розроблена тензорна модель накопичення пошкоджень дала змогу визначати величину використаного ресурсу пластичності при двохетапному вальцюванні, коли на другому етапі спостерігається складне немонотонне деформування.

Для випадків обробки малопластичних матеріалів, коли доцільно використовувати гаряче деформування, була розроблена математична модель процесів теплообміну, тепломасоперенесення і деформованого стану нагрітих заготовок діаметрами 25 мм, 35 мм, 50 мм, 65 мм при вальцюванні за схемами "круг-овал", "овал-ромб", "ромб-квадрат", "овал-квадрат", що надала подальший розвиток визначенню термомеханічних параметрів для процесів гарячого деформування.

Розроблено алгоритм автоматизації розв'язання нестационарної нелінійної задачі тепломасоперенесення і термопружності в середовищі програми ANSYS. На основі обчислювального експерименту визначені закономірності розподілу температур та полів поздовжніх та поперечних термічних деформацій осередку деформацій при вальцюванні заготовок для різних технологічних режимів і величини термічної складової коефіцієнтів розширення та випередження при об'ємній високотемпературній деформації. Встановлено температурний інтервал нагріву валків для отримання рівнозернистої структури матеріалу заготовки та уникнення мікротріщин малопластичних сплавів. Визначено, що

оксидна плівка на поверхні заготовки внаслідок ізолюючих властивостей впливає на рівномірність теплового стану в осередку деформації.

Експериментально встановлено, що застосування процесу вальцювання заготовок як підготовчої операції до об'ємного штампування замість: підготовки заготовок на кувальних молотах (операція протягування); операцій, виконуваних набором потовщень на ГKM; при штампуванні поковок подовженої форми забезпечує зниження норми витрати початкової заготовки на 10 — 25%; трудомісткості на 15 — 35%; збільшення стійкості штампів на 25 — 35%; підвищення міцності заготовок на 9 — 12% і пластичності на 13 — 38%, поліпшення якості поверхні і структури металу заготовок під штампування.

Результати роботи впроваджені в розроблення технологічного процесу вальцювання у вигляді обґрунтування температурних режимів гарячого вальцювання в процесі формоутворення; визначення граничної до руйнування інтенсивності деформації при холодному вальцюванні заготовок в залежності від їх геометричних параметрів; удосконалення процесу формозміни криволінійних заготовок шляхом використання технології двохетапного вальцювання на підприємстві ДП "45 експериментальний механічний завод" (м. Вінниця), що забезпечило підвищення металоощадності технологічного процесу вальцювання до 15%, збільшення кривизни заготовки при двохетапному вальцюванні до 10%, підвищення рівномірності та рівнозернистості структури матеріалу заготовки під час гарячого вальцювання.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень використовуються в програмах навчання студентів інженерно-технологічного факультету з дисциплін "Моделювання технологічних процесів і систем" та "Автоматизація інженерних розрахунків".

Ключові слова: вальцювання, пластичність, конічні валки, напружено-деформований стаї, деформовність, накопичена пластична деформація, гранична деформація до руйнування, ступінь обтиснення, тензорна модель накопичення пошкоджень, термомеханічні параметри.

ABSTRACT

Bubnovska I. A. Improving forge-rolling processes based on the modeling of the mechanics of shape change of blanks. — Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.03.05 «Processes and machines for pressure treatment" - Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, 2020. — Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of actual scientific and technical problems on improvement of forge-rolling processes on the basis of modeling of shape change of blanks. Research is aimed at improving the efficiency of production of blanks, including for parts of complex profiles, namely the quality of products with a high rate of metal utilisation, saving material, labor and financial resources.

The aim of the work is to improve the forge-rolling processes of blanks of aluminum alloys by developing new schemes and modes of forge-rolling based on the analysis of shape change of blanks, stress-strain state of the material and evaluation of its deformability.

The following methods were used to study the forge-rolling processes: theoretical (application of mathematical analysis) - to study mathematical models; experimental-calculated (dividing grids, microstructural) and numerical (finite element method) - for the analysis of the mechanics of forming blanks, stress-strain state of the material, thermal and thermomechanical fields. The study of the deformability of metals is based on the methods of solid medium mechanics, mathematical and applied theory of plasticity, phenomenological theory of deformability. Experimental studies were conducted in laboratory and industrial conditions on field samples and models using modern devices, standard equipment. Processing of experimental data was performed by methods of mathematical statistics.

As a result of the literature analysis it was determined that the processes of hot forge-rolling are widespread in the manufacture of solid long products as molding

and stamping operations, but the expansion of their technological capabilities and the development of cold forge-rolling is limited by the risk of material destruction and loss of stability. Therefore, considerable attention in the work is paid to the assessment of the deformability of the material and to the determination of the used resource of plasticity during forge-rolling of blanks from aluminum alloys.

The plasticity of aluminum alloys during cold deformation and the problems of studying the plasticity of metals related to the lack of ways to construct a "single" curve of boundary deformations due to the formation of the neck during tensile specimens and "abnormal" increase in plasticity are considered. A method of testing in uniaxial tensile conditions has been developed, which consists in forge-rolling a cylindrical specimen on a wedge by rolls whose radii increase during the forge-rolling process, for which a Ukrainian patent for a utility model has been obtained. The method provides the ability to test cylindrical samples at a constant stress state throughout the forge-rolling process and allows to obtain values of plasticity under uniaxial tension. If it is necessary to obtain for one test two values of plasticity of the metal at different (but constant in the process of deformation) indicators of the stress state σ_j , forge-rolling on a wedge of a curved pattern carries out. This forge-rolling is carried out by conical rolls, the radii of which increase as the sample rolls. In this case, the less deformed inner side surface of the sample will have a lower value of the indicator σ_j , and the more deformed outer surface of the sample will have a larger value of the indicator σ_j . Using this method, the plasticity diagrams of a number of aluminum alloys are constructed.

As a result of the study of the mechanics of forming blanks during forge-rolling, we also developed a method of manufacturing curved blanks by two-stage forge-rolling.

In the first stage, forge-rolling is carried out on a smooth barrel with conical rolls, and in the second - the workpiece is rotated 90 degrees and rolled in the calibers of cylindrical rolls with control of the deformed state of the workpiece by conical rolls.

Under this condition, the metal layers are more intensively deformed on the convex side of the workpiece, where there is a smaller area of the contact spot, which contributes to additional curvature of the workpiece and provides a more symmetrical cross-sectional area. This method has given further development to the forge-rolling processes of curved blanks, ensuring obtaining a significant curvature and improving the quality of manufactured parts with a high rate of metal utilization. Ukrainian's patent for a utility model was obtained for the method.

To determine the technological capabilities and obtain the basic laws of the stress-strain state of curved blanks during forge-rolling simulation in the DEFORM 3D software package was performed.

As a result of approximation of the obtained stress-strain state parameters and displacements for the characteristic points of the cylindrical workpiece surface during the study, an analytical relationship between the relative compression of the workpiece and the accumulated deformation in Mathcad medium was obtained, which allows to determine limiting thickness of the rolled workpiece and the limit values at the intensity of deformations at the time of destruction. Thus, the use of the developed dependences as an assessment and prediction of the possibility of destruction of the workpiece increases the efficiency of the development of technological processes of cold forge-rolling.

As a result of the evaluation of the deformability of aluminum alloys during cold forge-rolling, using plasticity diagrams and scalar deformation criterion, as well as the tensor model of fracture, the values limiting to the destruction of deformation intensity were determined and a number of regularities were revealed, namely for materials with a degree of higher nonlinearity of the nature of the accumulation of damage there is a deceleration of accumulation of damage; the process of partial "healing" of damage is possible during the continuous change of the directions of deformation increments against the background of increasing the accumulated deformation; during the wedge forge-rolling process, the ultimate plastic deformation in the danger zone of the workpiece with a satisfactory degree of

accuracy can be considered equal to the ultimate plastic deformation under tensile conditions.

The developed tensor model of damage accumulation made it possible to determine the value of the used plasticity resource during two-stage forge-rolling, when a complex nonmonotonic deformation is observed at the second stage.

For the cases of processing of low-plastic materials, when it is expedient to use hot deformation, a mathematical model of heat transfer, heat and mass transfer and deformed state of heated blanks with diameters of 25 mm, 35 mm, 50 mm, 65 mm during forge-rolling according to "circle-oval", "oval-rhombus", "rhombus-square", "oval-square" was developed, which gives further development to the definition of thermomechanical parameters for hot deformation processes.

An algorithm for automatization the solution of the nonstationary nonlinear problem of heat and mass transfer and thermoelasticity in the ANSYS program environment has been developed. Based on the computational experiment, the regularities of temperature and field distribution of longitudinal and transverse thermal deformations of the deformation center during forge-rolling of blanks for different technological modes and the value of the thermal component of expansion and advance coefficients at volumetric high-temperature deformation are determined. The temperature interval of heating the rolls to obtain an even-grained structure of the workpiece material and to avoid microcracks of low-plastic alloys is established. It is determined that the oxide film on the surface of the workpiece due to the insulating properties affects the uniformity of the thermal state in the deformation center.

It is experimentally established that the use of the process of forge-rolling blanks as a preparatory operation for volumetric stamping instead of preparation of blanks on forging hammers (drawing operation); operations performed by a set of thickenings on horizontal forging machines; when stamping forgings of the extended form provides reduction of a norm of an expense of initial blank by 10 — 25 %; labor intensity by 15 — 35 %; increase in stability of stamps by 25 — 35 %; increase of durability of blanks by 9 — 12 % and plasticity by 13 — 38 %, improvement of quality of a surface and structure of metal of blanks under stamping.

The results of the work are implemented in the development of the technological process of forge-rolling in the form of substantiation of temperature regimes of hot forge-rolling in the process of forming; determination of the maximum pre-fracture intensity of deformation during cold forge-rolling of blanks depending on their geometric parameters; improvement of the process of deformation of curved blanks by using the technology of two-stage forge-rolling at the enterprise "45 Experimental Mechanical Plant" (Vinnytsia), which increased the metal savings of the forge-rolling process to 15%, increasing the curvature of the blanks during two-stage forge-rolling to 10% increasing the uniformity of the structure of the workpiece material during hot forge-rolling.

The results of theoretical and experimental researches are used in the curricula of students of the Faculty of Engineering and Technology in the disciplines "Modeling of technological processes and systems" and "Automation of engineering calculations".

Keywords: forge-rolling, plasticity, conical rolls, stress-strain state, deformation, accumulated plastic deformation, ultimate deformation to failure, degree of compression, tensor model of damage accumulation, thermomechanical parameters.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] С. О. Скрыбин, І. В. Гулько, та І. А. Бубновська, "Визначення поля температур у зоні контакту вальцьованих заготовок", *Вісник ВІННІЦЬКОГО політехнічного інституту*, № 3, с. 108-112, 2010.

[2] С. А. Скрыбин, І. В. Гулько, и І. А. Бубновская, "Теплообмен между поверхностью деформируемого металла и окружающей средой", *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія. Технічні науки*, Вип. № 4, с. 60-65, 2010.

[3] С. А. Скрыбин, І. В. Гулько, Д. С. Чайка, и І. А. Бубновская, "Исследование сопротивления деформации при вальцовке заготовок", *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія. Технічні науки*, Вип. № 6, с. 101-107, 2011.

[4] С. А. Скрыбин, І. В. Гулько, и І. А. Бубновская, "Методы подготовки под штамповку заготовок из алюминиевых сплавов и всесторонний анализ качества изготовленных из них штампованных поковок", *Технологические системы*, № 2, с. 70-77, 2011.

[5] С. А. Скрыбин, Н. Г. Крищук, І. В. Гулько, и І. А. Бубновская, "Исследование тепловых процессов и термических деформаций при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах", *Обработка материалов давлением*, Краматорск: ДГМА, №2(27). с.84-88, 2011.

[6] С. А. Скрыбин, І. В. Гулько, и І. А. Бубновская, "Распределение скоростей перемещения металла по сечениям вальцуемой заготовки", *Технологические системы*, № 2, с. 46-49, 2012.

[7] С. А. Скрыбин, и І. А. Бубновская, "Исследование нестационарных тепловых процессов и термических деформаций при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах", *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 10, с. 32-36, 2013. Режим доступа: <https://www.kshp-omd.ru/ru/archivru/2013/kshp-omd-10-2013/211-soderzhanie>.

[8] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, "Моделювання температурних і деформаційних полів заготовки в процесі гарячого вальцювання за схемою «круг-овал»", *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА, № 1(40), с. 35-39, 2015.

[9] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, "Аналіз схем технологічного процесу виготовлення компресорних лопаток із застосуванням операції гарячого вальцювання", *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. Вінниця. № 3 (95), с. 160-165, 2016.

[10] І. В. Севостьянов, Ю. В. Добранюк, та І. А. Бубновська, "Розвиток процесів вальцювання криволінійних заготовок із алюмінієвих сплавів", *Вісник машинобудування та транспорту, ВНТУ*, № 2 (6), с. 150-157, 2017. Режим доступу: <https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/issue/view/7>.

[11] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, "Оцінка деформованості матеріалу криволінійних заготовок при холодному вальцюванні", *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, Вінниця, № 4 (99), с. 92- 96, 2017.

[12] І. А. Бубновська, "Аналіз напруженого стану заготовок при вальцюванні", *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. Вінниця. № 2 (105), с. 80-85, 2019.

[13] І. А. Бубновська, "Дослідження напружено-деформованого стану заготовок при вальцюванні" *The scientific heritage*, Budapest, Kossuth Lajos utca 84,1204, № 47, P.1. с. 31-37, 2020.

[14] В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, та І.А. Бубновська, "Спосіб визначення пластичності металів вальцюванням циліндричних зразків на клин", *М/ТА G01N 3/08 (2006/01). No 109984*, Верес.26, 2016.

[15] В. А. Матвійчук, О. О. Рубаненко, та І. А. Бубновська, "Спосіб виготовлення криволінійних заготовок вальцюванням", *МПК G01N 3/08 (2006/01). No 120472*, Листоп. 10, 2017.

[16] В. А. Матвійчук, О. О. Рубаненко, та І. А. Бубновська, "Спосіб оцінки технологічних можливостей плющення циліндричних заготовок

вальцюванням", *МПК G01N 3/08 (2006/01), B21B1/22(2006.1). No 122547*, Січ.10,2018.

[17] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, и И. А. Бубновская, "Изготовление профилей сложного поперечного сечения в условиях изотермического деформирования", *на XI міжнародній науково-технічній конференції 'І. Прогресивна техніка і технологія 2010*, Київ, 2010, с. 54-55.

[18] И.В. Гунько, Л. В. Швец, и И. А. Бубновская, "Коэффициенты вытяжки для вальцовки заготовок из алюминиевых сплавов традиционным и изотермическим деформированием", *на всеукраїнській науково-практичній конференції 'і' «Наукові дослідження-2010»*, Миколаїв: НУК, 2010, с. 123-125.

[19] І. В. Гунько, та І. А. Бубновська, "Штамування поковок із алюмінієвих сплавів з подовженою віссю", *на міжнародній науково-технічній конференції 'і'*, Вінниця: ВНТУ, 2011, с. 178-180.

[20] І. А. Бубновська, "Дослідження процесу вальцювання заготовок з криволінійною віссю" *на Міжнародній науковій інтернет-конференції 'І' «Теоретичні і прикладні проблеми теорії пластичності та обробки металів тиском»*, Вінниця, ВНТУ, 16 жовтня 2013 р., Режим доступу: http://omdconf.vntu.edu.ua/tezu/2013/tezu_bubhovska.pdf

[21] В.А. Матвійчук, та І.А. Бубновська, "Розширення технологічних можливостей процесу вальцювання виробів", *на Всеукр. наук.-практ. конф. Сучасні агротехнології 'і'. тенденції 'і' та інновації 'і'*, Вінниця: РВВ ВНАУ, 2015, с. 59 — 61.

[22] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, "Розвиток процесів холодного вальцювання криволінійних заготовок із алюмінієвих сплавів", *на VII Міжнародній науково-технічній конференції 'f'. Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти*, Київ Херсон, НТУУ «КПІ» ММІ, 2016, с. 26-29.

[23] В. А. Матвійчук, та І.А. Бубновська, "Оцінка деформованості матеріалу криволінійних заготовок при вальцюванні в умовах складного двоетапного деформування", *на VIII Міжнародній науково-технічній*

Конференції; *Теоретичні та практичні проблеми в Обробці матеріалів ІТІСКОШ І 9КОСІТІ фаХО8Оі' освітл*, КИЇВ-Херсон, НТУУ «КПІ» ММІ, 2017, с. 161-164.

[24] В. А. МдТВійчух, В. М. МихалеВич, Тd І. А. БубНоВGi•Кfi, "ОЦІНКfI деформОВdНОСТІ МаТеріалу заГОТОВОК При ВальцюВанНі За схеМаМи В ДВfт І більше перехопіВ", *на міжнародній науКово-методичній Інтернет-Конференції' "ПроблеМи виИфО'І' МатеМатичНОf ОС8ІТПІІ: виКЛНКи с учасності"*, 2018, с. 246-249.
РежиМ доСтупу: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/pmovc/pmovc-2018_netpub.pdf.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	26
Аналіз схем і способів технологічних процесів вальцювання заготовок.....	26
Процеси гарячого вальцювання. Теплофізика процесів гарячого деформування заготовок із алюмінієвих сплавів.	39
Процеси холодного вальцювання. Аналіз технологічних можливостей, проблеми розвитку.	44
Дослідження напружено-деформованого стану матеріалу заготовок у процесах вальцювання.	47
Короткий аналіз аналітичних і експериментально-розрахункових методів дослідження напружено-деформованого стану (НДС) заготовок.	47
Аналіз результатів дослідження НДС матеріалу заготовок у процесах вальцювання.....	52
Методи дослідження пластичності і критерії деформовності металів.....	58
Аналіз пластичності металів. Діаграми пластичності, методики побудови.....	58
Феноменологічні критерії деформовності металів. Визначення ресурсу пластичності.....	60
Висновки до розділу 1	65
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ВАЛЬЦЮВАННІ.....	67
Технологічні властивості та галузі застосування алюмінієвих сплавів	67
Криві зміцнення алюмінієвих сплавів	71
Характеристики міцності алюмінієвих сплавів при гарячому деформуванні....	75

Криві зміцнення алюмінієвих сплавів при гарячому деформуванні..	75 ¹⁷
Дослідження опору деформації при вальцюванні заготовок із алюмінієвих сплавів	78
Пластичність алюмінієвих сплавів при холодному деформуванні	88
Висновки до розділу 2.....	93
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ І ТЕРМІЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ВАЛЬЦЮВАННІ КРУГЛИХ ЗАГОТОВОК З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ	95
Дослідження впливу технологічних факторів і параметрів термосилового навантаження в процесах вальцювання на характер розподілу полів температур і термічних деформацій в пластичній зоні заготовки	95
Розроблення математичних моделей досліджуваних процесів	96
Алгоритм проведення обчислювального експерименту	101
Розроблення методики і дослідження процесів теплообміну, теплового стану, термічних деформацій і переміщень в зоні деформування при вальцюванні нагрітої заготовки	103
Дослідження процесу теплообміну між нагрітою заготовкою, калібром вальцювального штампу і довкіллям	106
Оцінка основних чинників, що впливають на теплообмін нагрітої заготовки з довкіллям і калібром вальцювального штампу.....	106
Дослідження впливу плівки оксиду алюмінію, яким вкрита заготовка, на її теплове поле	110
Визначення термічної складової коефіцієнтів нерівномірності деформацій і оцінка точності отриманих результатів.....	122
Висновки до розділу 3.....	126
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК ПРИ ВАЛЬЦЮВАННІ	128
Теоретичний аналіз напруженого стану матеріалу заготовок при вальцюванні	128
Дослідження напружено-деформованого стану заготовок при холодному вальцюванні методом імітаційного моделювання.....	136

Дослідження напружено-деформованого стану і характеру розподілу температур в зоні деформування при гарячому вальцюванні заготовок методом імітаційного моделювання.....	18 145
Результати експериментально-аналітичних досліджень напружено-деформованого стану матеріалу прямолінійних заготовок при вальцюванні	152
Дослідження напружено-деформованого стану матеріалу криволінійних заготовок.....	159
Висновки до розділу 4.....	167
РОЗДІЛ 5 ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛІВ. РОЗРОБЛЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВАЛЬЦЮВАННЯ ЗАГОТОВОК.....	168
Оцінка деформовності матеріалу заготовок при вальцюванні.....	168
Оцінка деформовності матеріалу заготовок при вальцюванні за схемами в два і більше переходів.....	173
Розроблення і дослідження технологічних процесів вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів.....	183
Аналіз методів підготовки заготовок під штамповку.....	183
Штампування вальцьованих заготовок з подовженою віссю.....	186
Висновки до розділу 5.....	194
ВИСНОВКИ.....	196
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	200
ДОДАТКИ.....	211
Додаток А Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	212
Додаток Б Блок-схема автоматизованого алгоритму розрахунку термомеханічного стану осередку деформації.....	217
Додаток В Термомеханічний стаи осередку деформування.....	218
Додаток Г Програмний модуль з розрахунку параметрів НДС та оцінки граничного стану.....	224
Додаток Д Акти впровадження.....	241

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МНТК — міжнародна науково-технічна конференція.

НДР — науково-дослідна робота.

МСЕ — метод скінченних елементів.

ОМТ — обробка металів тиском.

НДС — напружено-деформований стап.

ГКМ — горизонтально-кувальна машина.

КВМ — коефіцієнт витрати металу.

ОД — осередок деформування.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Ефективність виробництва є нагальною вимогою сучасного машинобудування, в якому удосконалення процесів виготовлення заготовок здійснюється ще на стадії первинного формоутворення деталей. Максимальна економія матеріальних, трудових та фінансових ресурсів може відбуватися за рахунок мінімальних розбіжностей між геометричними параметрами заготовок та розмірами готових деталей за умови забезпечення необхідних фізико-механічних властивостей.

У номенклатурі штампованих заготовок значний обсяг займають деталі складних видів профілів. Як підготовчу операцію перед об'ємним штампуванням таких деталей з метою рівномірного перерозподілу металу початкової заготовки, усунення надмірної нерівномірності деформації, досягнення високих ступенів деформації, виготовлення якісних виробів без дефектів з високим коефіцієнтом використання металу застосовують вальцювання. Для процесу вальцювання характерним є локальне нестационарне деформування, що дозволяє отримувати складно профільні заготовки при значних степенях деформації. Для низки пластичних металів цей процес доцільно здійснювати в умовах холодного деформування.

Останнім часом вивченню питань розвитку процесів холодного пластичного деформування металів на основі оцінки їх деформовності присвячена значна кількість робіт. В основному, це роботи з калібрувального холодного вальцювання важкодеформованих титанових та хромонікелевих сплавів. В машинобудуванні, особливо в авіабудуванні, виробляється значна кількість складно профільних деталей із алюмінієвих сплавів. Разом з тим, широке застосування холодного вальцювання алюмінієвих сплавів, особливо при виробництві криволінійних деталей, обмежується недостатнім розвитком розрахункового апарату оцінки деформовності матеріалу заготовок, величини використаного ресурсу пластичності для запобігання їх руйнуванню, а також недосконалістю існуючих способів виготовлення заготовок значної кривизни.

Тому розроблення нових схем і режимів вальцювання на основі аналізу формозмінення заготовок є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи відповідає «Стратегії розвитку вітчизняної авіаційної промисловості на період до 2020 року», схваленої розпорядженням Кабінету міністрів України від 27. 12. 2008 р., за № 1656-р. Робота виконана в рамках науково-дослідних робіт на інженерно-технологічному факультеті Вінницького національного аграрного університету (№ 0112U006703, № 0117U006830. Автор була виконавцем відзначених НДР.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення ефективності процесів вальцювання заготовок із алюмінієвих сплавів за рахунок їх удосконалення шляхом розроблення нових схем і режимів вальцювання на основі аналізу формозмінення заготовок, напружено-деформованого стану матеріалу та оцінки його деформовності.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати стаї розвитку технології вальцювання, можливість використання як гарячого так і холодного вальцювання для виробництва деталей на підставі класифікації за міцністю, пластичністю, фізичними властивостями алюмінієвих сплавів. Розробити метод експериментального дослідження пластичності металів для забезпечення сталих значень показників напруженого стану;

- провести аналіз існуючих та встановити нові закономірності процесу формоутворення заготовок вальцюванням для керування течією матеріалу і отримання заготовок заданої форми;

- дослідити процеси теплообміну, тепломасоперенесення і деформованого стану нагрітих заготовок при вальцюванні в умовах контактної взаємодії з валками;

- дослідити моделі контактної взаємодії інструменту з заготовкою та формоутворення заготовок залежно від параметрів процесу вальцювання;

розробити методику оцінки деформовності матеріалу заготовок при холодному вальцюванні з урахуванням особливостей зміни напружено-деформованого стану при різних схемах формоутворення;

- узагальнити результати теоретичних і експериментальних досліджень процесів вальцювання для практичного застосування і впровадити у практику промислового виробництва.

Об'єкт дослідження. Процеси вальцювання заготовок.

Предмет дослідження. Закономірності пластичної течії, напружено-деформованого стану і деформовності металу при формозмінненні заготовок з алюмінієвих сплавів в процесі вальцювання.

Методи дослідження. Для дослідження процесів вальцювання використано методи: теоретичні (застосування математичного аналізу) — для розроблення математичних моделей; експериментально-розрахункові (ділільних сіток, мікроструктурний) і чисельний (метод скінчених елементів) — для аналізу механіки формоутворення заготовок, напружено-деформованого стану матеріалу, теплових та термомеханічних полів. В основу дослідження деформовності металів покладено феноменологічну теорію деформовності. Експериментальні дослідження проводились у лабораторних і промислових умовах на натурних зразках та моделях із застосуванням сучасних приладів. Обробка експериментальних даних здійснювалась методами математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше встановлені закономірності впливу активних сил тертя, викликаних зміною діаметра валка в осьовому напрямі та його поворотом, на кінематику формозміннення, напружено-деформований стаи і деформовність заготовок в процесі холодного вальцювання, що дозволило керувати течією матеріалу і отримувати криволінійні заготовки під штампування;

- вперше на основі розробленої моделі контактної взаємодії інструменту з заготовкою побудована залежність між відносним стисненням заготовки та накопиченою деформацією на її вільній бічній поверхні, що дало можливість

контролювати граничну до руйнування товщину заготовки;

- отримав подальшого розвитку метод визначення пластичності металів, який, на відміну від існуючих, забезпечує можливість випробовування циліндричних зразків при сталому напруженому стані та отримання двох значень показника пластичності на різних бічних поверхнях заготовки за одне випробування шляхом вальцювання заготовок на клин;

- отримала подальший розвиток модель накопичення пошкоджень матеріалу заготовки, яка, на відміну від існуючої, надає можливість визначати величину використаного ресурсу пластичності за однопрохідного холодного та немонотонного двохетапного вальцювання зі складним деформуванням на другому етапі;

- розвинуто теорію теплових процесів за рахунок використання математичної моделі процесів теплообміну, тепломасоперенесення і термічних деформацій при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів, за допомогою якої оцінено внесок температурної складової в коефіцієнти розширення та випередження, вплив оксидної плівки на тепловий стаи в осередку деформації та встановлено рекомендований температурний інтервал нагріву валків.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено спосіб вальцювання циліндричної заготовки на клин за допомогою валків із зростаючим радіусом, що забезпечує можливість випробовування циліндричних зразків при сталому напруженому стані та дозволяє отримувати значення пластичності алюмінієвих сплавів в умовах однобічного розтягу.

2. Отримана залежність між відносним стисненням та накопиченою деформацією на вільній бічній поверхні циліндричної заготовки, що дозволяє наперед визначати граничну до руйнування товщину заготовки і скоротити терміни підготовки виробництва та забезпечити належну якість виробів через обмеження величини використаного ресурсу пластичності.

3. Розроблено спосіб виготовлення криволінійних заготовок двохетапним вальцюванням, який полягає у вальцюванні конічними валками з наступним

кантуванням на 90 градусів, що дозволяє отримувати заготовки значної кривизни. Новизну технічних рішень захищено патентами України.

4. Результати роботи впроваджено на підприємстві ДП «45 експериментальний механічний завод» (м. Вінниця) та в навчальний процес Вінницького національного аграрного університету.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертаційної роботи здобувачем отримано особисто. Постановку задач, розробку методичних підходів до виконання досліджень, аналіз і трактування отриманих результатів виконано спільно з науковим керівником.

Здобувачем проведено розрахунково-теоретичне дослідження теплових процесів та напружено-деформованого стану при гарячому вальцюванні заготовок [1]-[3],[5]-[9]. Запропоновано спосіб визначення пластичності металів при вальцюванні на клин [14], спосіб виготовлення криволінійних заготовок двоетапним вальцюванням (вальцювання конічними валками з наступним кантуванням на 90 градусів в калібрах циліндричних валків [15], проведено оцінку деформовності матеріалу заготовок при деформуванні [11],[12],[13]. Апроксимована залежність між відносним стисненням та накопиченою деформацією на вільній бічній поверхні заготовки [10],[16]. Проаналізовано переваги вальцювання, як попередньої операції для штампування та проведено експериментальні дослідження вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів [4]. У технічних рішеннях частка всіх співавторів однакова.

Апробація матеріалів дисертації.

Основні результати роботи доповідались на конференціях та наукових семінарах: XI Міжнародній науково-технічній конференції (МНТК) «Прогресивна техніка і технологія» (м. Київ, 2010 р.); МНТК «Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та авто технічних експертиз» (м. Вінниця, 2011 р.); XIV, XVIII МНТК «Досягнення та проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 2011, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Формування

конкурентоспроможної економіки: теоретичні, методичні та практичні засади» (м. Тернопіль, 2012 р.); VII, VIII МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (м. Херсон 2016, 2017 р.); Міжуніверситетському науково-практичному семінарі «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском» (м. Вінниця, 2017 р.); Міжнародній науково-методичній інтернет-конференції «Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності» (м. Вінниця, 2018 р.); Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Від науки до практики» (м. Вінниця, 2019, 2020 р.); розширеного наукового семінару у ВНТУ 2020 р.

Публікації. За результатами проведених теоретичних і експериментальних досліджень опубліковано 13 наукових праць, у тому числі: 9 статей — у спеціалізованих фахових виданнях України; 2 статті — в іноземних виданнях, 2 — в збірниках, виданих за матеріалами науково-технічної конференції, 3 тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях, отримано 3 патенти на корисну модель України.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел, 5 додатків. Повний обсяг дисертації становить 242 сторінки, з них 160 основної частини, 93 рисунка і 22 таблиці. Список використаних джерел містить 102 найменування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] В. А. Матвийчук, та И. С. Алиев, *"Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов. Монография. Краматорск: ДГМА, 2009.*
- [2] В. А. Матвийчук, та І. А. Бубновська, "Аналіз схем технологічного процесу виготовлення компресорних лопаток із застосуванням операції гарячого вальцювання", *Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця. № 3 (95). с. 160-165, 2016.*
- [3] В. К. Смирнов, Ш. Д. Кошаев, С. В. Харитонин, та А. А. Жилкин, *Фасонирование заготовок лопаток на ковочных вальцах. М.: Военное издательство, 1982.*
- [4] Ш. Д. Кошаев, К. И. Литвинов, В. К. Смирнов, та С. В. Харитонин, "Методика расчёта поперечных размеров заготовок из титановых и жаропрочных сплавов при вальцовке по схеме круг—овал", *Кузнечно-штамповочное производство, № 10. с. 29—31, 1978.*
- [5] И.В. Гунько, Л. В. Шве́ц, и И. А. Бубновская, "Коэффициенты вытяжки для вальцовки заготовок из алюминиевых сплавов традиционным и изотермическим деформированием", *Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Наукові дослідження-2010», Миколаїв: НУК, 2010, с. 123-125.*
- [6] С. А. Скрыбин, *Технология горячего деформирования заготовок из алюминиевых сплавов на ковочных вальцах. Винница: УІУ О. Власюк, 2007.*
- [7] С. А. Скрыбин, *Изготовление поковок из алюминиевых сплавов горячим деформированием. К: Квіц, 2004.*
- [8] Н. Г. Евланов, К. И. Зудин, М. Я. Карпов и др. "Определение оптимальных вариантов технологических процессов изготовления лопаток компрессора ГТД", *Проблемы технологии изготовления лопаток компрессора ГТД. М.: НИАТ. с. 13-16, 1982.*
- [9] К. Н. Богоявленский, О. К. Бадыров, Ю. И. Егоров и др., "Технологические процессы и оборудование для холодного вальцевания

лопаток“, *Вальцевание и прокатка при изготовления лопаток ГТД*. М.: НИАТ, с. 9-12, 1977.

[10] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, и И. А. Бубновская, "Теплообмен между поверхностью деформируемого металла и окружающей средой", *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія. Технічні науки*, Вип. № 4, с. 60-65, 2010.

[11] В. С. Головчанский, "Расчёт заготовок под вальцовку", *Авиационная промышленность*, № 5, с. 21-24, 1981.

[12] В.И. Омельченко, А.Б. Ройтман, О. Ф. Замшев, и Н. Н. Гнутенко, "Определение напряжённого состояния при вальцовке компрессорных лопаток", *Лавадпоння промышленность. Прилож*, № 3, с. 43-46, 1976.

[13] В. К. Смирнов [и др.]. "Методика оценки деформируемости металла на поверхности заготовок лопаток при однопроходной вальцовке по схеме круг-овал", *Авиационная промышленность*, № 5, с. 18-21, 1982.

[14] В. П. Егоров, И. Ф. Корнет, и В. А. Фомичёв, "Усовершенствование конструкций установок для холодного вальцевания", *Вальцевание и прокатка при изготовлении лопаток ГТД*, М.: НИАТ, с. 52-54, 1977.

[15] В. А. Матвийчук, И. Ф. Корнет, и В. Д. Покрас, "Совершенствование процесса холодной штамповки вальцовкой компрессорных лопаток на основе анализа деформируемости материалов", *Кузнечно-штамповочное производство*, № 5, с. 6-10, 1992.

[16] Ш. Д. Кошаев, "Состояние и перспективы производства лопаток компрессора без припуска по перу с применением холодной вальцовки на заводах отрасли", *Авиационная промышленность*, № 5, с. 1-3, 1981.

[17] В. А. Матвийчук, "Разработка процессов изготовления компрессорных лопаток с заданными служебными характеристиками", *Вісник Донбасько'ї державно'ї машинобудівно'ї академі'ї. Збірник наукових праць*, № 1 (3), с. 32-36, 2006.

[18] В. А. Матвийчук, и И. Ф. Корнет, А. с. 1600899 СССР, МКИ В 21 К3/04. "Способ изготовления лопаток", № 4381437/31-27; заявл. 22.02. 88; опубл. 23.10.90. бюл. № 39.

[19] В. М. Капралов, и В. П. Егоров, "Выносливость лопаток осевого компрессора, изготовленных прокаткой", *Авиационная промышленность*, № 1, с. 20-22, 1977.

[20] С. И. Пудков, "Повышение надёжности лопаток компрессора ГТД с помощью упрочняющей обработки микрошариком", *Авиационная промышленность*, № 7, с. 21-22, 1980.

[21] Н. В. Сторожев, и Е. А. Попов, *Теория обработки металлов давлением*. М.: Высш. шк. 1971.

[22] Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров, и В. А. Огородников, *Теорияковки и штамповки*. М.: Машиностроение, 1992.

[23] У. Д. Дель, *Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости*. М: Машиностроение. 1971.

[24] Р. Хилл, *Математическая теория пластичности*. М.: ГИТТЛ, 1956.

[25] Л.М. Качанов, *Основы теории пластичности*. М.: Наука, 1969.

[26] М.Р. Бровман, *Применение теории пластичности в прокатке*. М.: Металлургиздат. 1965.

[27] В. Ф. Потапкин, "Метод полей линий скольжения в исследовании процессов прокатки", *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії "і" і машинобудуванні*, Тематич. зб. наук. пр., Краматорськ. с. 145-165, 2002.

[28] Э. Зибель, *Обработка металлов в пластическом состоянии*. М. Л.: ОНТИ, 1934.

[29] И. У. Ренне, "Обобщение метода обработки результатов искажения делительной сетки, предложенного П. О. Пашковым, для исследования процессов сложного деформирования", *Исследования в области*

пластических деформаций и обработки металлов давлением, Сб. Технология машиностроения. Вып. 1. Тула, Приокское изд-во, 1967.

[30] Tomita Masakaru, *Analysis of forward extrusion by grld method. Appllcation of lagrange's method of undermined multipliers*, ISME Int. J, №30, p. 242-247, 1987.

[31] В.Д. Покрас, и В.А. Огородников, “*Пакет прикладных программ для расчёта деформаций по делительным сеткам (на базе сплайн-аппроксимации)*”, Математическое моделирование технологических процессов обработки металлов. Тезисы научно-технической конференции. Пермь, с. 97-98, 1987.

[32] О. Зенкевич, и К. Морган, *Конечные элементы и аппроксимация*. М.: Мир, 1986.

[33] В. И. Омельченко, и В. В. Кононов, “Влияние технологических факторов на точность и стабильность геометрических параметров пера вальцуемых лопаток в условиях серийного производства”, *Вальцевание и прокатка при изготовлении лопаток ГТД*, М.: НИАТ, с. 16-24, 1977.

[34] У. А. Смирнов-Аляев, *Механические основы пластической обработки металлов*. М.: Машиностроение, 1968.

[35] В.Л. Колмогоров, *Пластичность и разрушение*. М.: Металлургия, 1977.

[36] А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, и С. В. Смирнов, *Ресурс пластичности при обработке давлением*. М.: Металлургия, 1984.

[37] В. А. Огородников, *Оценка деформируемости металлов при обработке давлением*. Киев: Вища школа, 1983.

[38] С. И. Губкин, *Пластическая деформация металлов. Физико-механические основы пластической деформации*. М: Металлургиздат. 1961.

[39] А. А. Лебедев, и В. М. Михалевич, “О выборе инвариантов напряжённого состояния при решении задач механики материалов”, *Проблемы прочности*, № 3, с. 5-14, 2003.

[40] Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров, В. А. Огородников и др. *Теорияковки и штамповки. Учеб.пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов и др.* М.: Машиностроение, 1992.

[41] В. А. Огородников, А. В. Грушко, и И. А. Деревенько, “Моделирование процессов обработки давлением на основе гипотезы о силовом и кинематическом подобии параметров деформирования”, *Обработка металлов давлением*, Краматорск: ДГМА, № 4 (34), с. 46-52, 2012.

[42] И. О. Сивак, “Поверхность предельной пластичности”, *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тематич. зб. наук. пр., Краматорськ*, 9-15, 1999.

[43] В. А. Огородников, В. Б. Киселёв, и И. О. Сивак, *Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы)*. Монография, Винница: УНІВЕРСУМ, 2005.

[44] И. О. Сивак, Е. И. Сивак, и С. И. Сухоруков, “Оценка пластичности металлов при холодной пластической деформации“, Неа. *Тул. ГУ. Серия. Механика твёрдого деформируемого тела и обработка металлов давлением*, Тула: Тул. ГУ, вып. 2, с. 114-121, 2004.

[45] И. О. Сивак, и Е. И. Коцюбивская, “Пластичность металлов при объёмном напряжённом состоянии”, *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тематич. зб. наук. пр.*, Краматорськ, с. 73-76, 2007.

[46] В. А. Матвийчук, и И. Г. Савчинский, “Анализ повреждённости металла и оценка качества компрессорных лопаток, изготовленных холодной вальцовкой”, *Металлообработка*, № 4(40), с. 26-29, 2007.

[47] У.А. Смирнов-Аляев, *Сопrotивление материалов пластическому деформированию. Инженерные расчеты процессов конечного формoизменения материалов*. Л.: Машиностроение. 1978.

[48] В. А. Огородников, *Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формoизменении*. К.: УМК ВО, 1989.

- [49] У. р. Дель, *Пластичность при немономном деформирования*. 10 с, Деп. В ВИНТИ 1982, № 1813-82.
- [50] А. А. Ильюшин, *"Об одной теории длительной пластичности"*, Изв.АН СССР, Механика твердого тела, № 3, с. 21-35, 1967.
- [51] А. А. Мишулин, и В.М. Михалевич, *"Совершенствование технологииковки на основе описания деформационной анизотропии пластичности"*, *Оптимизацияковки на автоматизированных ковочных комплексах*, № 173, с. 144-161, 1982.
- [52] В. М. Михалевич, *Тензорні моделі накопичення пошкоджень*. Вінниця: «УНІВЕРСУМ Вінниця», 1998.
- [53] В. М. Корнеев, В. М. Аржаков, Б. Г. Бормашенко [и др.], *Ковка и штамповка цветных металлов*. Справочник, М.: Машиностроение, 1972.
- [54] В.И. Анурьев, и И.Н. Жестковой, *Справочник конструктора-машиностроителя*: в 3 т. М.: Машиностроение, 2006.
- [55] У. С. Писаренко, и А. А. Лебедев, *Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии*. К.: Наукова думка, 1976.
- [56] Ю. Г. Калпин, В.И. Перфилов, П. А. Петров и др., *Сопротивление деформации и пластичность металлов. учебное пособие по курсу " Теория обработки металлов давлением"*. МГТУ МАМИ, 2007.
- [57] О. В. Грушко, *Развитие феноменологических основ создания карт металов и сплавов применительно к процессам их холодной обработке давлении*. Винница: ВНТУ, 2015.
- [58] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, Д. С. Чайка, и И. А. Бубновская, *"Исследование сопротивления деформации при вальцовке заготовок"*, *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія. Технічні науки*, Вип. № 6, с. 101-107, 2011.
- [59] А.И. Целиков, и В. В.Смирнов, *Прокатные станы*. 1958.
- [60] В. Ф. Пушкарев, *"К вопросу о влиянии внешних зон на сопротивление деформации при прокатке"*, *Сб. Прокатные станы и технология прокатки*, М.: Машгиз, № 84, с. 92 — 96, 1958.

[61] С.А. Скрябин, "Научное обоснование, исследование, разработка и внедрение малоотходных технологических процессов вальцовки заготовок из алюминиевых и титановых сплавов, дисс. д. т. наук, М.: МАТИ, 1990.

[62] А. И. Целиков, и А. И. Гришков, *Теория прокатки*. М.: Metallurgy, 1980.

[63] QForm3D конечно-элементная программа для расчета процессов пластической деформации металлов и сплавов, 31991-2017, ООО «КванторФорм» [Электронный ресурс]. Доступно: www.qform3d.com.

[64] В.Л. Колмогоров, и Б.А. Мигачёв, "Прогнозирование разрушения металлов в процессе горячей пластической деформации", Неа. *АН СССР. Металлы*, № 3, с. 124-128, 1991.

[65] А. А. Харламов, А. П. Латаев, В. В. Галкин и П. В. Уланов, «Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса DEFORM», *САПР и графика*, № 5, 2005. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://sadr.ru/article/7366>

[66] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, "Моделювання температурних і деформаційних полів заготовки в процесі гарячого вальцювання за схемою «круг-овал»", *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА, №1(40), с.35-39, 2015.

[67] В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк, та І.А. Бубновська, "Спосіб визначення пластичності металів вальцюванням циліндричних зразків на клин", *МПК G01N 3/08 (2006/01). No 109984*, Верес.26, 2016.

[68] С. А. Скрябин, Н. Г. Крищук, И. В. Гунько, и И. А. Бубновская, "Исследование тепловых процессов и термических деформаций при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах", *Обработка материалов давлением*, Краматорск: ДГМА, № 2(27). с. 84-88, 2011.

[69] М. В. Ильюшкин, *Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA (осадка цилиндрической заготовки)*. Учебно-методическое пособие. Ульяновск, РФ: УлГУ, 2013.

[70] С. А. Скрыбин, и И. А. Бубновская, “Исследование нестационарных тепловых процессов и термических деформаций при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах“, *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 10, с. 32-36, 2013.

[71] А. Д. Коваленко, *Введение в термоупругость*. Київ, Наукова думка. 1965.

[72] В. С. Авдеевский, *Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнения Навье Стокса*. Москва, Изд-во «Наука», 1987.

[73] У. Джонсон, и Меллор УИ, *Теория пластичности для инженеров*. М., Машиностроение, 1979.

[74] Р.М. Охрименко, В. А. Тюрин, *Теория процессовковки*. Учебное пособие для вузов. М., Высшая школа, 1977.

[75] М. А. Михеев, и И. М. Михеева, *Краткий курс теплопередача*. Госэнергоиздат, 1960.

[76] А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, и Н. Б. Пономарев, *SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике*. СПб, РФ: БХВ — Петербург, 2005.

[77] О. С. Цибенко, и М.У. Крищук, *Системы автоматизованого проектування та інженерного аналізу в машинобудування*. Навчальний посібник, НТУУ «КПІ», 2008.

[78] В. Ф. Очков *MathCAD 14 для студентов, инженеров и конструкторов*. СПб.: БХВ-Петербург, 2007.

[79] К. Баммерт, “Теплоотдача при обтекании реактивных лопаток, охлаждаемых изнутри“, *Вопросы ракетной техники*, № 6 (18), 1953.

[80] Ю. П. Шлыков, и Е. А. Ганин, *Контактный теплообмен, теплопередача между соприкасающимися металлическими поверхностями*. Госэнергоиздат, Москва, Ленинград, 1963.

[81] С. О. Скрябін, І. В. Гунько, та І. А. Бубновська, "Визначення поля температур у зоні контакту вальцьованих заготовок", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с.108-112, 2010.

[82] І. А. Бубновська, "Аналіз напруженого стану заготовок при вальцюванні", *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. Вінниця. № 2 (105), с. 80-85, 2019.

[83] Н. Н. Малинин, *Прикладная теория пластичности и ползучести*. М.: Машиностроение, 1975.

[84] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, "Розвиток процесів вальцювання криволінійних заготовок із алюмінієвих сплавів", *Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти»*, Київ Херсон, НТУУ «КПІ» ММІ, 2016, с. 26-29.

[85] В. А. Матвійчук, О. О. Рубаненко, та І. А. Бубновська, "Спосіб оцінки технологічних можливостей плющення циліндричних заготовок вальцюванням", *МПК G01N 3/08 (2006/01), B21B1/22(2006.1). No 122547*, Січ.10,2018.

[86] С. А. Скрябін, І. В. Гунько, и І. А. Бубновская, "Распределение скоростей перемещения металла по сечениям вальцуемой заготовки", *Технологические системы*, № 2, с. 46-49, 2012.

[87] В. А. Матвійчук, та І.А. Бубновська, "Оцінка деформованості матеріалу криволінійних заготовок при вальцюванні в умовах складного двоетапного деформування", *Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти»*, Київ-Херсон, НТУУ «КПІ» ММІ, с. 161 -164, 2017.

[88] І. В. Севостьянов, Ю. В. Добранюк, та І. А. Бубновська, "Розвиток процесів вальцювання криволінійних заготовок із алюмінієвих сплавів", *Вісник машинобудування та транспорту, ВНТУ*, № 2 (6), с. 150-157, 2017.

[89] І.А. БубНoВсьха, "ДoслiджеННя НапружеНo-дефoрMoВaНОГО СтaНу ЗаГОТoВoК П]зи ВдЛьцЮВaННi", *The scientffic heritage*, Budapest, Kossuth Lajos utca 84,1204, № 47, P.1. с. 31-37, 2020.

[90] В. А. МaТВiйчук, Та І. А. БубНoВГьКа, "OцiНхa дефoрMoВaНОГТi МaТepiалу хривoЛНiЙНих ЗаГОТoВoК П]зи ХoЛoдНoМу ВaЛi•ЦIoВ£тННi", *ТехнiKa, енергетiКo, транспорт АПК*, ВiННiИЯ, № 4 (99), с. 92- 96, 2017.

[91] В. М. МихaлeВич, "АпП]ЭoКГиМaЦия К]зИВьИх предельНoЙ пeфoрMации СПЛaЙН-фунКцИфiМИ", *ОбрaбoТка МeТaЛЛoВ ДaВлeНиеМ: СБo]ЗНИК НаучНьИх ТрудoВ*, КраМaТoРСК: Q,ГМА, № 3(24), с. 3-10, 2010.

[92] В. А. МiТВiйчук, О. О. РубaHeНхo, Та І. А. БубНoВCi•Kd, "Спociб ВигoТoВлeННя К]ЭИВoЛiНiЙНих ЗаГОТoВoК ВдЛьПoВaННяМ", *МПК GOIN 3/08 32006/011. No 120472*, ИСТОП. 10, 2017.

[93] V. M. Mikhalevich , "Plasticity with cyclic hot working ", *Strength of Materials*. № 26 (6) , pp. 407-412, 1994.

[94] V. M. Mikhalevich , "Tensor models of rupture strengh. Report no. 1. Steade koading of initially isotropic and anisotropic bodies", *Strength of Materials*, № 27 (8) , pp. 482-492, 1995.

[95] В. А. МaТВiйчук, В. М. МихaлeВич, TO І. А. БубНoВCьKa, "OцiНKa пeфoрMoВaНОCTi МaТepiалу сaГОТoВoК П]зи ВaЛi•ЦIoВфiННi За сХeМaМИ В Q,Вfi 1 бiлi•шe пeрeХoдiВ" *На мiжнaрoднiй науКoвo-Мeтoдичнiй Интepнeт-Кoнфepeнцiї 'Прoблeми вищo'i "мaтeмaтичHo "i" oсвiти. виКЛiЛКи сучacнoстi"*, 2018, с. 246-249. Рeжим дoстyпу: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/pmovc/pmovc-2018_netpub.pdf.

[96] V. M. Mikhalevich , "Tensor models of rupture strength. report no. 3. criterional relations for loading with a change in stress state and the directions of the principal stresses", *Strength of Materials* , № 28 (3), pp. 238-246, 1996.

[97] A. A. Lebedev, V. M. Mikhalevich "On the Choice of Stress Invariants in Solving Problems of Mechanics", *Strength of Materials*, № 35 (3), *Plenum Publishing Corporation (USA)*, pp.. 217-224, May - June, 2003.

[98] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, и И. А. Бубновская, "Методы подготовки под штамповку заготовок из алюминиевых сплавов и всесторонний анализ качества изготовленных из них штампованных поковок", *Технологические системы*, № 2, с. 70-77, 2011.

[99] І. В. Гунько, та І. А. Бубновська, "Штамування поковок із алюмінієвих сплавів з подовженою віссю", *на міжнародній науково-технічній конференції* 'і', Вінниця: ВНТУ, 2011, с. 178-180.

[100] С. О. Скрябін, та І. В. Гунько, "Вальцювання заготовок із алюмінієвих сплавів для наступного штампування поковок першої групи класифікації", *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія. 'Технічні науки. Вип. 9. с. 25-29, 2011.*

[101] Н. И. Корнеев, В. М. Аржаков, Б. Г. Бормашенко и др., ОСТ 1.90073-85. *Отраслевой стандарт по штамповкам и поковкам из алюминиевых сплавов. Технические условия.* Введ. 01.11.85М.: Изд-во стандартов, 1989.

[102] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, И. А. Бубновская, и Д. С. Чайка, "Изготовление на ковочных вальцах заготовок из алюминиевых сплавов первой группы классификатора", *Фузнично-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 8, с. 18-20, 2011.

