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 УДОСКОНАЛЕННЯ 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.

алюмінієвих Розглянута пластичність 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 Спосіб забезпечує можливість корисну модель. випробовування на 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 η, здійснюють вальцювання на клин криволінійного зразка. Для цього вальцювання проводять конічними валками, радіуси яких зростають по мірі вальцювання зразка. При цьому менше здеформована внутрішня бічна поверхня зразка матиме менше значення показника η, а більше здеформована зовнішня поверхня зразка матиме більше значення показника **η**. 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 двохетапним 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 умов розтягу.

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 нестаціонарної 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 деформації 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 ГКМ; 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 параметрів; ïχ геометричних удосконалення процесу формозміни криволінійних заготовок шляхом використання технології двохетапного вальцювання на підприємстві ДП "45 експериментальний механічний завод" (м. Вінниця), що забезпечило підвищення металоощадності технологічного вальцювання 15%, збільшення процесу ДО 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, напруженодеформований стан, 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 forgerolling 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  $\eta$ , 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  $\eta$ , and the more deformed outer surface of the sample will have a larger value of the indicator  $\eta$ . 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 forgerolling, 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 gaves further development to the definition of thermomechanical parameters for hot deformation processes.

An algorithm for automatisation 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. 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.

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

[3] 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.

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

[5] 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 давленим*, Краматорск: ДГМА, №2(27). с.84-88, 2011.

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

[7] С. А. Скрябин, 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 давленим,* № 10, с. 32-36, 2013. Режим доступу: <u>https://www.kshp-omd.ru/ru/archivru/2013/kshp-omd-10-2013/211-</u> 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 давленим*. 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", Т*ехніка, 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, N 47, P.1. c. 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", *МПК G01N 3/08 (2006/01). № 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). № 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)*. № 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. 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 «Наукові дослідження-2010»*, Миколаїв: НУК, 2010, с. 123-125.

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

[20] І. А. Бубновська, "Дослідження процесу вальцювання заготовок з криволінійною віссю" *на Міжнародній науковій інтернет-конференції «Теоретичні і практичні 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: тенденції та інновації,* 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. Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти, Київ Херсон, НТУУ «КПІ» MMI, 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 тиском і якості фахової освіти, Київ-Херсон, НТУУ «КПІ» ММІ, 2017, с. 161-164.

[24] В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, та І. А. Бубновська, "Оцінка деформованості матеріалу заготовок при вальцюванні за схемами в два і більше переходів", *на міжнародній науково-методичній Інтернет-конференції "Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності"*, 2018, с. 246-249. Режим доступу: <u>https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/pmovc/pmovc-</u>2018\_netpub.pdf.

# **3MICT**

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ
ВСТУП
РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ 26
1.1 Аналіз схем і способів технологічних процесів вальцювання
заготовок
1.2 Процеси гарячого вальцювання. Теплофізика процесів гарячого
деформування заготовок із алюмінієвих сплавів 39
1.3 Процеси холодного вальцювання. Аналіз технологічних можливостей,
проблеми розвитку 44
1.4 Дослідження напружено-деформованого стану матеріалу заготовок у
процесах вальцювання
1.4.1 Короткий аналіз аналітичних і експериментально-розрахункових
методів дослідження напружено-деформованого стану (НДС)
заготовок
1.4.2 Аналіз результатів дослідження НДС матеріалу заготовок у
процесах вальцювання 52
1.5 Методи дослідження пластичності і критерії деформовності металів 58
1.5.1 Аналіз пластичності металів. Діаграми пластичності, методики
побудови
1.5.2 Феноменологічні критерії деформовності металів. Визначення
ресурсу пластичності 60
Висновки до розділу 1
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ
ВАЛЬЦЮВАННІ
2.1 Технологічні властивості та галузі застосування алюмінієвих сплавів 67
2.2 Криві зміцнення алюмінієвих сплавів
2.3 Характеристики міцності алюмінієвих сплавів при гарячому
деформуванні75

2.3.1 Криві зміцнення алюмінієвих сплавів при гарячому
деформуванні75
2.3.2 Дослідження опору деформації при вальцюванні заготовок із
алюмінієвих сплавів78
2.4 Пластичність алюмінієвих сплавів при холодному деформуванні
Висновки до розділу 2
РОЗДІЛ З ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ І ТЕРМІЧНИХ
ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ВАЛЬЦЮВАННІ КРУГЛИХ ЗАГОТОВОК З
АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ95
3.1 Дослідження впливу технологічних факторів і параметрів термосилового
навантаження в процесах вальцювання на характер розподілу полів
температур і термічних деформацій в пластичній зоні заготовки
3.1.1 Розроблення математичних моделей досліджуваних процесів 96
3.1.2 Алгоритм проведення обчислювального експерименту 101
3.1.3 Розроблення методики і дослідження процесів теплообміну,
теплового стану, термічних деформацій і переміщень в зоні
деформування при вальцюванні нагрітої заготовки 103
3.2 Дослідження процесу теплообміну між нагрітою заготовкою, калібром
вальцювального штампу і довкіллям 106
3.2.1 Оцінка основних чинників, що впливають на теплообмін нагрітої
заготовки з довкіллям і калібром вальцювального штампу 106
3.2.2 Дослідження впливу плівки оксиду алюмінію, яким вкрита
заготовка, на її теплове поле110
3.3 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
4.1 Теоретичний аналіз напруженого стану матеріалу заготовок при
вальцюванні 128

4.2 Дослідження напружено-деформованого стану заготовок при холодному вальцюванні методом імітаційного моделювання...... 136 4.3 Дослідження напружено-деформованого стану і характеру розподілу температур в зоні деформування при гарячому вальцюванні заготовок методом імітаційного моделювання...... 145 Результати експериментально-аналітичних досліджень 4.4 напруженодеформованого стану матеріалу прямолінійних заготовок при вальцюванні 152 4.5 Дослідження напружено-деформованого стану матеріалу криволінійних Висновки до розділу 4 ..... 167 РОЗДІЛ 5 ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛІВ. РОЗРОБЛЕННЯ І ПРОЦЕСІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВАЛЬЦЮВАННЯ 5.1 Оцінка деформовності матеріалу заготовок при вальцюванні...... 168 5.2 Оцінка деформовності матеріалу заготовок при вальцюванні за схемами в два і більше переходів ...... 173 5.3 Розроблення і дослідження технологічних процесів вальцювання заготовок 5.3.1 Аналіз методів підготовки заготовок під штамповку ...... 183 5.3.2 Штампування вальцьованих заготовок з подовженою віссю ..... 186 Висновки до розділу 5 ...... 194 Б Додаток Блок-схема автоматизованого алгоритму розрахунку Додаток Г Програмний модуль з розрахунку параметрів НДС та оцінки граничного стану ...... 224 

18

# ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- МНТК міжнародна науково-технічна конференція.
- НДР науково-дослідна робота.
- МСЕ метод скінченних елементів.
- ОМТ обробка металів тиском.
- НДС напружено-деформований стан.
- ГКМ горизонтально-кувальна машина.
- КВМ коефіцієнт витрати металу.
- ОД осередок деформування.

#### ВСТУП

Обгрунтування 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 коефіцієнтом дефектів 3 високим використання металу застосовують вальцювання. Для процесу вальцювання характерним є локальне нестаціонарне 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 стан 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 напруженодеформованого 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, напруженодеформованого стану і деформовності металу при формозміненні 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 (ділильних 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 формозмінення, напружено-деформований стан 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 стан 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 одновісного 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 двохетапним 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.); семінарі Міжуніверситетському науково-практичному «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском» (м. Вінниця, 2017 р.); Міжнародній науково-методичній інтернет-конференції «Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності» Вінниця, 2018 (м. p.): Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Від науки до практики» (м. Вінниця, 2019, 2020 р.); розширеного наукового семінару у ВНТУ 2020 р.

Публікації. 3a результатами проведених теоретичних i 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 3 конференції, доповідей міжнародних науково-технічних тези на 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.

#### **РОЗДІЛ 1**

#### СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

# 1.1 Аналіз схем і способів технологічних процесів вальцювання заготовок

Процеси вальцювання, які набули широкого розповсюдження при виготовленні суцільних довгомірних виробів, належать до процесів поздовжнього локального ротаційного деформування (рис. 1.1) [1].



Рисунок 1.1 – Схеми поздовжнього локального ротаційного деформування

Таким чином, вальцювання заготовок (схема 1.3, рис. 1.1) поділяється на такі види: формувальне – для отримання фасонних заготовок під наступне штампування на пресах або молотах; штампувальне – для отримання штампованих поковок (виробництво заготовок лопаток гарячим вальцюванням); калібрувальне – для точного холодного вальцювання деталей замість обробки різанням (виробництво холодним вальцюванням заготовок тонкопрофільованих компресорних лопаток, загострення бурякорізальних ножів).

При вальцюванні заготовка деформується під час обертання валків, на яких закріплені штампи: або на частині кола валків, або по всій довжині. Рівчаки штампів мають відповідні форму та розміри потрібної заготовки [2]. При багаторівчаковому вальцюванні кожний рівчак вирізають на окремому секторі або кільці. Це дозволяє замінювати рівчак залежно від необхідності. Мінімальна ширина секторів-штампів має дорівнювати ширині рівчака плюс 4 – 5 мм.

Приклад способу закріплення секторів при вальцюванні на двохопорних валках показано на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Кріплення інструменту на двохопорних валках 1 – робочий валок, 2 – 5 – штампи; 6 – притискна кришка; 7 – упорне кільце; 8 – притискний болт; 9 – роз'ємне кільце; 10 – шпонка

Робочий інструмент для вальцювання виготовляють зі сталі 5ХНВ, 5ХНТ, 5ХВГ, У7, 7Х3, 40ХН та ін. Зносостійкість секторів-штампів становить у середньому 50000 заготовок.

Процес формувального вальцювання використовується переважно як підготовча операція до об'ємного штампування для цілеспрямованого перерозподілу металу початкової заготовки. При цьому забезпечується: усунення надмірної нерівномірності деформації, неодночасного заповнення металом порожнини штампу, усунення дефектів від незаповнення струмка штампу при штампуванні великогабаритних поковок; досягнення високих ступенів деформації; виготовлення якісних штампованих виробів з високим коефіцієнтом використання металу; виготовлення складних видів профілів, у т.ч. заготовок з криволінійною віссю.

Одним з найпродуктивніших процесів попереднього фасонування заготовок є періодичний прокат, який здійснюється на станах поздовжньої прокатки-волочіння.

Фасонування заготовок здійснюється в калібрах. До основних параметрів, що характеризують процес фасонування заготовок вальцюванням, належать абсолютні та відносні зміни розмірів заготовок.

Абсолютні зміни початкової висоти  $H_0$ , ширини  $B_0$ , та довжини  $l_0$  до відповідних значень  $H_1$ ,  $B_1$  та  $l_1$  ділянки вальцьованої заготовки називаються відповідно абсолютним обтисненням  $\Delta H$ , абсолютним розширенням  $\Delta B$  та абсолютним подовженням  $\Delta l$ .

Відносні зміни розмірів заготовки характеризують коефіцієнти деформації

- коефіцієнт обтискання 
$$\frac{1}{\alpha} = \frac{H_0}{H_1};$$
  
- коефіцієнт розширення  $\beta = \frac{B_1}{B_0};$  (1.1)

Об'єм заготовки при вальцюванні залишається постійним, тому

$$H_0 B_0 l_0 = H_1 B_1 l_1.$$

Представивши цей вираз у вигляді

$$\frac{H_1}{H_0}\frac{B_1}{B_0}\frac{l_1}{l_0} = \alpha\beta\lambda = 1,$$

отримаємо рівність, що встановлює зв'язок між коефіцієнтами деформації:  $\frac{1}{\alpha} = \beta \lambda$ .

Крім того, з умови постійності об'єму:

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{H_0}{H_1} \frac{B_0}{B_1} = \frac{F_0}{F_1}, \qquad (1.2)$$

де  $F_0$  та  $F_1$  – відповідно площа поперечного перетину заготовки до і після проходу. При вальцюванні за декілька проходів сумарний коефіцієнт витяжки  $\lambda_{\Sigma} = \frac{F_0}{F_n}$  пов'язаний з коефіцієнтами витяжки на окремих проходах наступним

співвідношенням

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n, \qquad (1.3)$$

де  $\lambda_1 = \frac{F_0}{F_1}$ ;  $\lambda_2 = \frac{F_1}{F_2}$ ;...,  $\lambda_n = \frac{F_{n-1}}{F_n}$  – коефіцієнти витяжки на першому, другому і

так далі проходах. Таким чином, чим більше коефіцієнт витяжки, тим більша міра обтискання заготовки.

Для вальцювання заготовки застосовують овальні, круглі, квадратні, ромбічні та інші калібри. Можлива послідовність таких калібрів показана на рис. 1.3, а їх геометричні елементи – на рис. 1.4.



Рисунок 1.3 – Типові схеми послідовності фасонування заготовок в калібрах

При вальцюванні заготовок не слід перевищувати допустимого, з точки зору стійкості, відношення сторін заготовки  $a_0 = H_0/B_0$  в попередньому по ходу калібрі. Рекомендуються наступні допустимі значення  $a_0$ [1]:

- овальної в круглому калібрі 3,5;
- овальної в овальному калібрі 1,6;
- овальної в ребровому овальному калібрі 4,0;
- овальної в квадратному калібрі 5,0.

Залежно від конфігурації заготовки і загального коефіцієнта витяжки  $\lambda_{\Sigma}$  вальцювання може здійснюватися за один або декілька проходів (рис.1.3). Вибір тієї або іншої схеми вальцювання і числа проходів визначається, головним чином, необхідним коефіцієнтом витяжки, а також вимогами до форми отриманої заготовки.



Рисунок 1.4 – Схеми фасонування і геометричні елементи заготовок: a) – круговал; б) – овал-круг; в) – овал-квадрат; г) – овал-овал; д) – овал-ребровий овал

У роботах [3],[4] отримані криві, що відповідають максимально можливому коефіцієнту витяжки при вальцюванні заготовок за один і два проходи (рис.1.5 – рис.1.7). Використовуючи приведені на рисунках криві, можна вибрати необхідну схему і приблизно необхідне число проходів.

При проєктуванні технологічного процесу вальцювання зазвичай відомий сумарний коефіцієнт витяжки  $\lambda_{\Sigma}$ . Відомими параметрами є також відстань між осями валків  $D_0$  і діаметр початкового прутка  $d_0$ .

Якщо точка перетину прямих знаходиться нижче кривої, що відповідає  $\lambda_{\Sigma}$  або на ній, застосування вибраної схеми вальцювання можливе. Інакше необхідно змінити схему вальцювання або збільшити число проходів. При цьому, знаючи коефіцієнт  $\lambda_{\Sigma}$  за прийнятим набором проходів, повне його значення не складно визначити за співвідношеннями (1.3).



Рисунок 1.5 – Криві для визначення максимально можливого коефіцієнта витяжки при вальцюванні за схемою круг-овал





Рисунок 1.6 – Криві для визначення максимально можливого коефіцієнта витяжки при вальцюванні за схемою круг-овал-круг 1 – вуглецева сталь і титанові сплави; 2 – алюмінієві сплави



Рисунок 1.7 – Криві для визначення максимально можливого коефіцієнта витяжки при вальцюванні за схемою круг-овал-квадрат 1 – вуглецева сталь і титанові сплави; 2 – алюмінієві сплави

В силу відмінності технологічних процесів традиційного та ізотермічного вальцювання абсолютні значення таких параметрів, як коефіцієнт витяжки, розширення, випередження, питоме зусилля будуть різні. У табл. 1.1, 1.2 наведені рекомендовані коефіцієнти витяжки при вальцюванні заготовок в гладких валках і калібрах різних систем, отримані на підставі багаторічного досвіду впровадження процесу вальцювання у виробництво [5].

Технологія вальцювання фасонних заготовок включає не тільки розроблення креслення заготовки; визначення розміру початкової заготовки; визначення загального коефіцієнта витяжки після переходів і вибір системи калібрів; розрахунок калібрів і проєктування вальцювальних штампів після переходів але й вибір термомеханічних режимів деформування заготовок з конкретного сплаву. Таблиця 1.1 – Значення максимально допустимого коефіцієнта витяжки λ

## при традиційному вальцюванні

N⁰	Поперечний перетин	λ	Гладкі валки або система
	заготовки поздовж		калібрів
	стержня		
1.	Постійний або змінний	$\lambda = 2,0$	Гладкі валки
2.	-//-	λ <i>≤</i> 2,2	Калібр плоский або
			однорадіусний
3.	Постійний	$2,2 < \lambda \leq 3,3$	Круг-овал-ромб
	Змінний	$2,2 < \lambda \leq 4,5$	
4.	Постійний	$2,2 < \lambda \leq 3,5$	Круг-овал-квадрат
	Змінний	$2,2 < \lambda \leq 4,7$	
5.	Постійний	$3,7 < \lambda \leq 4,5$	Круг-овал-ромб-квадрат
	Змінний	$3,7 < \lambda \leq 6,2$	
6.	Постійний	$1,8 < \lambda \leq 2,5$	Круг-овал-круг
	Змінний	$2,5 < \lambda \leq 3,9$	
7.	Постійний	$1,8 < \lambda \leq 2,5$	Круг-овал-ромб-круг
	Змінний	$2,5 < \lambda \leq 3,9$	

Таблиця 1.2 – Значення максимально допустимого коефіцієнта витяжки λ при ізотермічному вальцюванні

N⁰	Поперечний	λ	Гладкі валки або	Примітка
	перетин заготовки		система калібрів	
	поздовж стержня			
1.	Постійний або	$\lambda = 2,0$	Круг-овал-ромб	Овал плоский
	змінний			або
				однорадіусний
2.	Постійний	λ <i>≤</i> 2,2	Круг-овал-ромб	-
	Змінний			
3.	Постійний	$2,2 < \lambda \leq 3,3$	Круг-овал-	-
	Змінний	$2,2 < \lambda \leq 4,5$	квадрат	
4.	Постійний	$2,2 < \lambda \le 3,5$	Круг-овал-ромб-	-
	Змінний	$2,2 < \lambda \leq 4,7$	квадрат	
5.	Постійний	$3.7 < \lambda < 4.5$	Круг-овал-круг	_
5.	Змінний	$3,7 < \lambda \leq 6,2$	itpyr obair tipyr	
	JWIIIIIIII	5,7 - 70 - 0,2		
6.	Постійний	$1,8 < \lambda \leq 2,5$	Круг-овал-ромб-	-
	Змінний	$2,5 < \lambda \leq 3,9$	круг	

34

У роботах [6],[7] для забезпечення цих вимог наведені технічні умови і термомеханічні режими деформування алюмінієвих сплавів (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 – Термомеханічні режими кування і штампування алюмінієвих сплавів [6]

	Темпера-	Допустимий ступінь			
Manua annan	турний	деформації, %		Variation	
Марка сплаву	інтервал	Лита	Пресована	устаткуван-	
	деформу-	заготовка	заготовка	ня	
	вання, °С				
АМц, АМг1, АМг2, АВ,	470-300	70	90		
АД31, АД33, АД35, АК6,	470-300	70	90		
АДО, АД1, 01205					
П1 П1- ДП17 1020				Прес	
ДІ, ДІЧ, ВДІ7, 1230, лия	470-370	60	70	гідравлічний	
ΑΚδ	450-350	_	60		
$\Delta V_{4}$ 1 $\Delta V_{4}$ 1.	470-350	60	70	Молот або	
AK4- 1, AK4-14	430-320	—	60	прес	
АМг3, Амг4, АМг5,				механічний	
Амг5П, АМг6, В92, М40,	430-320	60	60		
В92Ц, 1915, 1913	430-300	—	50		
В95, В95пч, В96Ц,					
В96Цпч, В96Ц3	430-350	60	60		
	430-320	_	50		
Д19ч, ВАД1 (1191)					
Д16ч	470-350	60	60		
	430-350	—	50		

У роботі [7] вказані рекомендації для деформування заготовок у напрямі, перпендикулярному осі (по твірній). Значення допустимої деформації, приведені в таблиці 1.3, мають бути знижені для алюмінієвих сплавів на 15 – 25 %, щоб уникнути отримання крупнозернистої структури, внаслідок процесів рекристалізації при куванні та штампуванні. Відзначається, що сплави низької міцності (менше 300 МПа), а також сплав АК6, що належить до середньої міцності, мають високу пластичність, яка практично не залежить від швидкості деформації. Сплави середньої ( $\sigma_{\rm M} = 300 - 450$  МПа) і високої міцності

(σ<sub>м</sub> > 450 МПа) при гарячому деформуванні достатньо пластичні, але із збільшенням швидкості деформування від статичної (до 0,3 м/с) до динамічної (до 8,0 м/с) пластичність цих сплавів знижується на 15 – 20 %, що необхідно враховувати при обробці їх на механічних пресах і молотах.

Розглянемо роль і місце вальцювання на прикладі технологічних процесів виготовлення лопаток компресора газотурбінних двигунів [8]. Різноманіття технологічних процесів виготовлення лопаток розрізняються способами отримання заготовок і видами остаточних формотворчих операцій. Розрізняють сім основних методів, що застосовуються на етапі отримання заготовок: 1) лиття; 2) сортовий прокат; 3) поковка на молотах; 4) поковка на ГКМ або пресах; 5) поковка в кувальних вальцях; 6) періодичний прокат поздовжній; 7) періодичний прокат поперечний.

Серед остаточних формотворчих та фінішних операцій виділяють п'ять способів: 1) шліфування розмірне; 2) шліфування безрозмірне; 3) холодне вальцювання; 4) обробка кульками; 5) електрохімічна обробка.

У результаті техніко-економічного аналізу технологічних процесів для лопаток з довжиною пера до 250 мм в умовах масового виробництва виявлено, що в більшості випадків найефективнішими є варіанти технологічних процесів, засновані на використанні холодного вальцювання лопаток як остаточної формотворної операції пера [9]. У цьому випадку виключається фрезерування і шліфування пера, підвищується продуктивність праці, забезпечується стабільність розмірів і форми, зменшується хвилястість пера, збільшується коефіцієнт використання металу і майже повністю виключається ручна доробка пера.

У результаті узагальнення досвіду роботи підприємств авіаційної промисловості, головними інститутами галузі рекомендовані декілька схем типових і перспективних технологічних процесів, які забезпечують кращі техніко-економічні показники при обробці лопаток, подібних за своїми конструктивно-технологічними характеристиками [7]. Основними відмінними ознаками процесів за встановленими схемами є: величина гарантованого
припуску, габаритні розміри, матеріал, методи попереднього та остаточного фасонування і механічної обробки.

Залежно від марки матеріалів, габаритних розмірів і конструктивних особливостей лопаток можливе холодне вальцювання за один або кілька переходів з проміжною термообробкою.

Зокрема схема, що представлена на рис. 1.8 охоплює виготовлення одно- і двозамкових лопаток довжиною до 250 мм з припуском по перу 0,8...1,2 мм на сторону під електрохімічну обробку на гвинтових пресах із застосуванням інших видів обладнання на попередніх операціях.



Рисунок 1.8 – Схема технологічного процесу виготовлення одно- і двозамкових лопаток довжиною до 250 мм з припуском по перу 0,8...1,2 мм на сторону

Згідно науково-дослідних робіт, 3 результатами 3 урахуванням технологій, головними авіаційної перспектив розвитку інститутами промисловості були розроблені комплексні перспективні технологічні процеси виготовлення лопаток довжиною до 250 мм. Схема з використанням процесів деформування в ізотермічних умовах для отримання точних заготовок одно- і двозамкових лопаток з припуском по перу на шліфування з подальшим поліруванням профілю представлена на рис. 1.9.

Таким чином, гаряче вальцювання є однією із перспективних операцій формоутворення точних та надійних виробів, у т.ч. лопаток компресорів газотурбінних двигунів.



Рисунок 1.9 – Схема перспективного технологічного процесу виготовлення однозамкових лопаток довжиною до 250 мм без припуску по перу на лезову

Основна необхідність застосування гарячого вальцювання, порівняно з холодним, це потреба зниження характеристик міцності і підвищення характеристик пластичності оброблюваних металів. При цьому істотний вплив на пластичність, характеристики міцності і структуру готових поковок і штамповок чинять режими деформування – температура, швидкість і ступінь деформації. Вагомий внесок у такі дослідження зробили О.А. Кайбишев, Ю. Г. Калпін, В. Ф. Пушкарьов, М.Х. Рабінович, С. О. Скрябін, В. С. Смірнов, Ф.Г. Тріфонов, А. І. Целіков та ін. В технологічних процесах обробки металів тиском термомеханічні режими деформації повинні забезпечувати достатню пластичність, однорідну структуру і високі механічні властивості.

### **1.2** Процеси гарячого вальцювання. Теплофізика процесів гарячого деформування заготовок із алюмінієвих сплавів

Процеси вальцювання були запроваджені у виробництво як попередня ковальська операція. Для поліпшення пластичності металу істотну роль у технологічному процесі виготовлення якісних вальцьованих заготовок займає їх нагрівання до необхідної температури та теплообмін між поверхнею вальцьованої заготовки та довкіллям. При цьому повинна забезпечуватися мінімальна хімічна дія атмосфери нагрівального пристрою на поверхню металу (окислення, насичення воднем тощо), завершення структурних перетворень, мінімальне зростання зерна і збереження цілісності металу (відсутність можливості появи внутрішніх тріщин та інших недоліків). Ці вимоги виконуються при дотриманні режимів нагріву сплаву, які визначаються температурою робочого простору нагрівального пристрою, часом витримки, швидкістю нагріву, а також проміжними витримками при тій або іншій температурі та часі витримки при остаточній температурі нагрівання [6].

Нагрівання заготовок з алюмінієвих сплавів проводять в електричних печах опору з екранованими нагрівальними елементами і примусовою

циркуляцією повітря для інтенсивнішої передачі теплоти на поверхню заготовок і забезпечення рівномірності температури робочого простору.

Перепад температур в робочій зоні не повинен перевищувати 15-25 °С після досягнення піччю температурного інтервалу гарячого деформування конкретного сплаву.

Печі мають бути обладнані автоматичними регулюючими і самописними приладами, температура атмосфери печі повинна контролюватися в кожній зоні впродовж усього процесу нагріву. Оскільки алюмінієві сплави мають високу температуропровідність (у 3-4 рази більшу, ніж температуропровідність сталі) і малий коефіцієнт поглинання (0,11-0,18), заготовки можна завантажувати в електричну піч холодними, без зниження температури печі для їх попереднього підігрівання, не побоюючись порушення їх цілісності при нагріванні.

При дослідженні теплообміну між поверхнею металу та довкіллям приймають ряд припущень. Це дозволяє використовувати при аналізі процесу теплопровідності феноменологічний підхід, який ґрунтується на встановленні деяких загальних співвідношень між параметрами, що визначають зазначений процес загалом.

Схематично комплекс явищ теплоперенесення при обробці металів тиском здійснюється таким чином. Витягнута з нагрівальної печі заготовка охолоджується за рахунок променистого і конвективного теплообміну з довкіллям, а також за рахунок контактного теплообміну.

При подачі заготовки у вальцювальні штампи відбувається охолодження заготовки в результаті теплопередачі штампам та нагрівання внаслідок дисипації механічної енергії пластичного формозмінення. А також за рахунок роботи проти зовнішніх сил тертя. Вийшовши з осередку деформування, метал знову піддається променистому і конвективному теплообміну з довкіллям [10].

Інтенсивність охолодження заготовки тим більше, чим більше відношення її поверхні до об'єму. Міра охолодження заготовки залежить від її розмірів і числа переходів при обробці. Тому при великій кількості переходів вводять додаткове нагрівання заготовок, яке збільшує цикл технологічного процесу, знижує якість деталей і напівфабрикатів. При цьому збільшується витрата енергії та час нагріву заготовок, погіршується структура металу, його пластичність і міцність.

Зазвичай при розрахунку втрат тепла через поверхню металу, що деформується, за час паузи (перенесення заготовки з печі в штамп та ін.) використовують формулу

$$Q = aFt(T_n - T_c), \qquad (1.4)$$

де Q – тепло, втрачене матеріалом за час паузи, кал.;

*a* – коефіцієнт тепловіддачі між поверхнею металу і навколишнім середовищем; *F* – контактна площа, мм<sup>2</sup>;

*t* – тривалість паузи, с;

 $T_n$  – середня температура поверхні, °С;

 $T_n$  – середня температура навколишнього середовища, °С.

Сумарне значення коефіцієнта тепловіддачі a між поверхнею вальцьованого металу та навколишнім середовищем обумовлено променистою  $(a_n)$ , конвективною  $(a_k)$  і контактною  $(a_k')$  складовими, тобто

$$a = a_n + a_k + a_k^{T}. \tag{1.5}$$

Розглянемо способи визначення кожної складової.

Променистий теплообмін.

Питомий тепловий потік, що проходить через поверхню металу, внаслідок теплообміну випромінювання, визначається за законом Стефана-Больцмана

$$q_{n} = c_{npus.} \left[ \left( \frac{T_{n}}{100} \right)^{4} - \left( \frac{T_{c}}{100} \right)^{4} \right],$$
(1.6)

де  $T_n$  – температура поверхні,  $T_c$  – температура середовища,  $C_{npue}$  – коефіцієнт випромінювання системи «прокатуваний метал – навколишнє середовище» визначається за формулою

$$C_{npus.} = \frac{\varphi_{12} \cdot c_0}{1 + \varphi_{12} \left[ \frac{1}{\xi_1} - 1 + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\xi_2} - 1 \right) \right]},$$
(1.7)

де  $\phi_{12}$  – коефіцієнт випромінення поверхні заготовки в навколишнє середовище;

*c*<sub>0</sub> – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

 $\xi_1$  – ступінь чорноти поверхні;

ξ<sub>2</sub> – ступінь чорноти навколишнього середовища;

 $F_1$  – випромінююча поверхня заготовки, мм<sup>2</sup>;

 $F_2$  – поверхня теплопоглинального середовища, мм<sup>2</sup>.

Оскільки  $F_1/F_2 < 1$ , то  $c_{npue} = \xi_1 c_0$ , а коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою

$$a_{n} = \frac{\xi_{1} \cdot c_{0} \left[ \left( \frac{T_{n}}{100} \right)^{4} - \left( \frac{T_{c}}{100} \right)^{4} \right]}{T_{n} - T_{c}}.$$
(1.8)

Конвективний теплообмін.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією залежить від безлічі чинників, зокрема від форми поверхні, швидкості руху і температури навколишнього середовища. Тому для різних видів обробки тиском, вказаний коефіцієнт матиме різні значення. Зокрема:

а) поперечний перетин металу, що деформується, близький до круглого або відношення b/h наближено до одиниці (b – ширина, мм; h – висота заготовки, мм).

Визначення *a<sub>k</sub>* для подібної форми заготовки може бути розраховане за формулою

$$a_k = \frac{Nu \cdot \lambda_n}{d},\tag{1.9}$$

де  $Nu = 0,18 \text{Re}^{0.62}$   $(10^3 \le \text{Re} \le 2 \cdot 10^5)$  – критерій Нуссельта;

 $\lambda_{_{\rm I\!I}}$  – коефіцієнт теплопровідності повітря в приміщені;

Re =  $\frac{wd}{v}$  – критерій Рейнольдса;

$$d = \frac{4r}{p}$$
 – приведений діаметр поперечного перетину заготовки, мм;

*F* – площа поперечного перетину заготовки, мм<sup>2</sup>;

р – периметр, мм;

w – швидкість переміщення потоку повітря відносно поверхні заготовки, мм/с;

v – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря;

 $\phi$  – функція кута атаки (для даного випадку  $\phi \approx 0.5$ ).

б) поперечний перетин металу, близький до прямокутного, відношення b/h значно більше одиниці.

У цьому випадку застосовують формули, отримані для теплообміну при русі потоку вздовж плоскої стінки

$$Nu = 0,66 \operatorname{Re}^{0.5} (\operatorname{Re} \le 10^5),$$
 (1.10)

$$Nu = 0,032 \,\mathrm{Re}^{0.8} \quad (\mathrm{Re} > 10^5).$$
 (1.11)

Для турбулентного режиму обтікання повітрям смуги рекомендується формула

$$a_k = 5,04 \frac{w^{0.8}}{l^{0.2}},\tag{1.12}$$

де *l* – довжина поверхні тепловідачі заготовки за напрямом вальцювання, мм.

Контактний теплообмін.

У процесі обробки тиском метал протягом пауз піддається контактному теплообміну з деякими елементами технологічного устаткування. Зважаючи на невеликий час контакту і невисокі значення теплових втрат, контактну складову коефіцієнта тепловіддачі між поверхнею металу і навколишнім середовищем не беруть для розрахунку. Отже, сумарний коефіцієнт тепловіддачі протягом пауз визначається за формулою

$$a = a_n + a_k. (1.13)$$

Тепловий баланс при деформуванні складається з прибуткових і витратних статей.

До прибуткових статей теплового балансу належать:

- нагрівання заготовок в печі, Q<sub>1</sub>;

– нагрівання заготовки в осередку деформування в результаті пластичного деформування, Q<sub>2</sub>;

нагрівання заготовки в осередку деформування за рахунок роботи проти сил тертя, Q<sub>3</sub>.

Витратні статті теплового балансу складаються із втрат тепла:

 в результаті перенесення заготовки від печі до вальцювальних штампів,
 за рахунок теплообміну між поверхнею заготовки і навколишнього середовища (променистої – Q<sub>4</sub>; конвективної – Q<sub>5</sub>; контактної – Q<sub>6</sub> складових теплообміну).

У результаті тепловий баланс в осередку деформування матиме вигляд:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6 . (1.14)$$

## 1.3 Процеси холодного вальцювання. Аналіз технологічних можливостей, проблеми розвитку

Процес холодного вальцювання отримав розвиток у якості калібрувальної операції при виготовленні компресорних лопаток газотурбінних двигунів

(ГТД), а також для формування леза складнопрофільованих бурякорізальних ножів. Процес полягає в деформуванні заготовки між двома валками із закріпленим на них профільним інструментом у напрямі від перерізу поблизу замка лопатки, до кінця пера, на спеціальному устаткуванні – установці або стані для вальцювання. Холодне вальцювання лопаток має низку переваг, порівняно з холодним об'ємним штампуванням. Так, локалізований осередок деформування дозволяє істотно понизити потрібні зусилля формозмінення, що дає можливість здійснювати процес холодного деформування навіть для матеріалів, що мають високі механічні характеристики (з границею текучості  $\sigma_s > 1000$  МПа) і отримувати деталі з високою точністю розмірів і низькою шорсткістю поверхні.

Процес холодного вальцювання лопаток умовно можна розділити на три стадії [11]. Перша стадія – початок вальцювання. На цій стадії відбувається втискування секторів у заготовку, формування радіуса переходу від замка до пера (галтель) і формоутворення кореневого перерізу пера. При цьому площа осередку деформування, питомі зусилля і загальні зусилля зростають від нуля до робочих величин. Перша стадія може здійснюватися за однією з двох схем: зближення валків силовим приводом без їх обертання; зближення робочих поверхонь секторів з поміщеною між ними заготовкою за рахунок їх розвороту. При цьому заготовка лопатки навантажується осьовим зусиллям, необхідним для утворення галтелі.

Друга стадія – вальцювання пера між профільними секторами при їх обертанні. Цей, основний період формоутворення пера лопатки, також не є стаціонарним процесом внаслідок змінних, як по ширині так і довжині, товщини заготовки і готової лопатки, а отже і осередку деформації, що змінюється. Схема напружено-деформованого стану матеріалу заготовки та шляхів деформування різних її частин неоднакові [12],[3],[13].

На цій стадії процесу холодного вальцювання до заготовки через вільні частини, що не знаходяться в осередку деформування, на вході і виході можуть прикладатися зовнішні навантаження у вигляді осьових стискаючих або розтягуючих зусиль, які додатково змінюють схему напруженого стану в осередку деформування.

Внаслідок Третя стадія кінець вальцювання. нерівномірного \_ деформування (подовжень) кінець пера лопатки має неправильну форму і має бути обрізаний за розміром. Заготовка, що звільнилася з валків, під дією залишкового напруження деформується – змінює форму пера відносно замку (викривлення). Для попередження або значного зменшення викривлення пера лопатки, устаткування для вальцювання може бути оснащене спеціальними пристроями, при допомозі яких вже під час вальцювання до заготовки прикладаються крутні та згинальні моменти. Прикладання цих моментів дозволяє компенсувати внутрішні залишкові напруження, що викликають викривлення пера лопатки після виходу з валків [14].

Вітчизняними підприємствами накопичений значний досвід з дослідження, розробки і впровадження процесу холодного вальцювання. При цьому методологічно використовувався як аналітичний, так і емпіричний підхід до розробки технологічних процесів і створення спеціалізованого устаткування.

Враховуючи, що холодне вальцювання є чистовою операцією, що формує якість лопаток, розроблялися науково обґрунтовані рекомендації, як для проектування заготовок і визначення режимів технологічного процесу, так і для вдосконалення устаткування.

Основні напрями вивчення процесу – оцінка деформовності матеріалів при холодному вальцюванні і дослідження залежності якості виробів від технологічних параметрів процесу. Під якістю лопаток слід розуміти цілий комплекс експлуатаційних властивостей, що характеризується показниками: точністю розмірів і шорсткістю поверхні, рівнем фізико-механічних властивостей матеріалу, зокрема, втомною і статичною міцністю, корозійною стійкістю тощо. При цьому якість лопаток має первинне значення, оскільки підвищення якості деталей часто рівнозначно зростанню їх кількості, але досягається, як правило, меншими витратами у виробництві. Розробленню і дослідженню процесів холодного вальцювання лопаток приділялася значна увага, про що свідчить велика кількість робіт [9], [15], [16], [17], [18]. При цьому зусилля дослідників спрямовані, головним чином, на аналіз напруженого стану, вивчення кінематики процесу і характеру формоутворення, дослідження силових параметрів процесу і експлуатаційної надійності лопаток.

Разом з дослідженням процесу вальцювання зроблені також усебічні дослідження якості деформованого матеріалу, величини залишкових напружень і експлуатаційної надійності лопаток ГТД [12], [19],[20].

1.4 Дослідження напружено-деформованого стану матеріалу заготовок у процесах вальцювання

### 1.4.1 Короткий аналіз аналітичних і експериментальнорозрахункових методів дослідження напружено-деформованого стану (НДС) заготовок

При розробленні та вдосконаленні процесів вальцювання особливо важливою є інформація про НДС матеріалу заготовок і вплив на нього різних технологічних параметрів. На підставі такої інформації можна визначати силові параметри процесу, проводити оцінку деформовності матеріалу заготовок і стійкості інструментального оснащення, цілеспрямовано розширювати технологічні можливості процесу, що розробляється, прогнозувати службові характеристики виробів. Найбільш об'єктивними є результати дослідження НДС матеріалу заготовок, отримані із застосуванням різних методів досліджень.

Інженерний метод базується на сумісному вирішенні рівнянь рівноваги і пластичності [21],[22].

Метод розробляли вітчизняні та зарубіжні учені І. С. Алієв, С. І. Губкін, М. Закс, Е. Зібель, Т. Карман, Е. А. Попов, Л. Л. Роганов, М. В. Сторожев, Е. П. Унксов, ін. Згідно з поданим методом розглядається низка гіпотез

(гіпотеза плоских перетинів, Хаара-Кармана, радіальної течії матеріалу і ін.) і завдання зводиться до статично визначного. При цьому не розглядається кінематика процесів деформування.

Цей метод дозволяє вирішувати низку технологічних завдань, у т.ч. здійснювати аналіз силових чинників. Разом з тим він не дозволяє визначати в локальних зонах заготовки НДС з точністю, необхідною для оцінки деформовності металів.

Через складність механіки формоутворення заготовок при вальцюванні, внаслідок впливу численних чинників, для аналізу НДС матеріалу найдоцільніше використовувати різні експериментально-розрахункові методи.

Метод вимірювання твердості отримав розвиток завдяки працям Г. Д. Деля, В. А. Огороднікова та ін. В основу методу покладена залежність між твердістю деформованого металу і інтенсивністю напружень при пластичному деформуванні. Дослідженнями встановлено [23], що твердість пов'язана з максимальною за всю історію пластичного деформування інтенсивністю напружень  $\sigma_u$  залежністю, єдиною для різних напружених станів та історій деформування. Встановлено також, що пружне розвантаження, у разі циклічного деформування металів, не приводить до зміни твердості. Отже, визначення  $\sigma_u$  за твердістю можливо лише для випадків пластичного формозмінення. Таким чином, для процесів обробки тиском за наслідками вимірювання твердості можна визначити в пластичній зоні інтенсивність напружень  $\sigma_u$ , та, з урахуванням гіпотези про єдину криву текучості, інтенсивність деформацій  $e_u$ . Вимірювання твердості є ефективним методом дослідження НДС внутрішніх зон заготовок при обробці тиском, без попереднього їх розділення.

При дослідженні вальцьованих заготовок найбільш прийнятним для вимірювання твердості є спосіб Віккерса, що забезпечує мінімальну пластичну зону навколо відбитку. Використання методу вимірювання твердості передбачає наявність градуювального графіка «інтенсивність напружень – твердість – інтенсивність деформацій» ( $\sigma_u - HV - e_u$ ).

Градуювальні графіки металів будують за результатами вимірювання твердості на твердомірі «Віккерс» в перетинах циліндричних зразків, осаджуваних в умовах лінійного напруженого стану. Зразки осаджують на гідравлічному пресі до різних ступенів (15-20 зразків на один градуювальний графік). При цьому за результатами вимірювання розмірів зразків і зусилля визначають величини інтенсивностей напружень і деформацій за формулами

$$\sigma_{u} = \frac{4P}{\pi d^{2}}; \ e_{u} = \ln \frac{h_{0}}{h}, \qquad (1.15)$$

де: Р – деформуюче зусилля;

*d* – діаметр зразка, що деформується;

 $h_0$  і h – висота зразка до і після деформування.

Потім зразки розрізають у меридіональному напрямі, розміщують в обойму і заливають епоксидною смолою. Після твердіння зразки в обоймі шліфують з використанням набору шліфувальних шкірок, полірують і в 10-15 точках перетину вимірюють твердість. За усередненими значеннями твердості і розрахованими величинами будують градуювальні графіки.

При дослідженні вимірюванням твердості НДС пластичної зони заготовок, отриманих методами вальцювання, їх розрізають і підготовлюють поверхню аналогічно поверхні градуювальних зразків. Потім з кроком, що виключає накладення пластичних зон відбитків індентора, проводять вимірювання твердості. За результатами вимірювання твердості деформованої зони і з використанням градуювальних графіків отримують ізолінії розподілу інтенсивності напружень та інтенсивності деформацій. При необхідності точність отриманих результатів на окремих ділянках (як правило, поблизу вільної поверхні заготовки) перевіряють методом сіток.

Метод ліній ковзання використовується для визначення НДС при вирішенні плоских задач, в яких рівняння рівноваги і пластичності утворюють замкнуту систему диференціальних рівнянь гіперболічного типу [24],[25]. За допомогою методу, на основі побудови поля ліній ковзання, що відповідає статичним і кінематичним граничним умовам, визначається розподіл швидкостей деформацій, величина накопиченої по лініях течії інтенсивності деформацій, показник напруженого стану. Отримані результати дослідження НДС дозволяють знаходити енергосилові параметри процесу, величину використаного ресурсу пластичності металу, параметри якості продукції. Метод полів ліній ковзання був розвинений для умов дослідження процесів прокатки завдяки працям М. Я. Бровмана, В. Ф. Потапкіна [26],[27] та інших дослідників.

Метод сіток належить до найбільш поширеного експериментальнорозрахункового методу визначення НДС заготовок, що деформуються. Зміни координатно-ділильних сіток дозволяють встановити компоненти деформації на різних стадіях процесу деформування. Співвідношення для розрахунку деформацій по спотворених квадратних ділильних сітках вперше отримані Е. Зібелем [28]. І. П. Ренне узагальнив метод на випадок, коли початковий осередок має форму паралелограма [29]. З використанням даної методики дослідження можуть проводитися шляхом поетапного вимірювання координат вузлів, тобто визначення полів зсувів за певний проміжок часу, з подальшим визначенням полів швидкостей деформацій. Напружений стан визначається за співвідношеннями теорії течії. Методика [30] заснована на скінченорізницевому представленні рівняння рівноваги, що ускладнює її використання в областях зі складною геометрією. Напружений стан розраховується за деформованим станом з використанням співвідношень теорії пластичності. При цьому поле напружень повинно задовольняти рівнянням рівноваги, умовам пластичності, закону течії та граничним умовам. До недоліків перерахованих методик відносяться трудомісткість вимірювань та їх недостатня точність за наявності малих деформацій і викривленні сторін осередку сітки.

Найчастіше використовується підхід, згідно з яким завдання розрахунку кінематики деформування за відомими координатами вузлів спотвореної ділильної сітки зводиться до апроксимацій  $X(X_0,Y_0,t)$ ,  $Y(X_0,Y_0,t)$  координат вузлів сітки  $\tilde{X}_{l,n}; \tilde{Y}_{l,n}$  (де  $X_0,Y_0$  – змінні Лагранжа, пов'язані з недеформованим зразком) та їх похідних по координатах і часі. При такому підході важливу роль відіграє вид використовуваних апроксимацій. Широкого поширення набув підхід, при якому для апроксимації і диференціювання використовуються сплайн-функції одного аргументу або поєднання сплайнів одного аргументу (за часом) і сплайнів двох аргументів (за координатами на кожному етапі) [31]. При цьому ефективнішим з погляду точності апроксимації є підхід, при якому спочатку обчислюються похідні від координат вузлів за часом (тобто швидкості течії частинок матеріалу), а потім їх похідні за координатами.

При дослідженні методом сіток процесів вальцювання необхідно враховувати два різнорідні види вхідної інформації – аналітичну і геометричну. Аналітична інформація – це диференціальні та алгебраїчні рівняння, яким повинні задовольняти шукані функції в пластичній ділянці і на її межах. Геометрична – інформація про форму меж цієї ділянки.

Метод скінчених елементів (МСЕ) є узагальненням варіаційного методу і належить до ефективних сучасних методів, що дозволяють визначати НДС неоднорідних середовищ [32]. Використання скінчено-елементної дискретизації дозволяє вибирати координатні функції у вигляді кусково-лінійних функцій і застосовувати варіаційні методи для визначення не тільки інтегральних, але і локальних характеристик процесів. Введення дискретизації середовища дозволяє зводити краєві задачі для складних систем диференціальних рівнянь до систем алгебри, які в більшості випадків можуть бути вирішені точними або наближеними методами.

В основу МСЕ покладено розбиття суцільного середовища (зокрема об'єму тіла, що деформується) на безліч простих геометричних елементів. Елементи в цілому, і кожен вузол зокрема, володіють певними мірами свободи, а кожен елемент володіє властивостями матеріалу середовища. Для пружнопластичних матеріалів це передусім механічні властивості середовища, що деформується. Основні співвідношення МСЕ, стосовно процесів обробки металів тиском (ОМТ), засновані або на теорії пластичної течії, або на деформаційній теорії пластичності. Системи рівнянь МСЕ, як правило, будуються на основі варіаційних принципів теорії пластичності і пружності. Коректна модель в МСЕ максимально наближена до реального фізичного процесу і дозволяє враховувати тонкі фізичні ефекти.

На сучасному етапі існує багато спеціалізованих і загальноінженерних пакетів скінченно-елементного аналізу. Для моделювання і дослідження процесів вальцювання доцільно використовувати програмні пакети ANSYS, LS-DYNA. При цьому важливим є питання про достовірність отриманих з використанням МСЕ результатів. Багато пакетів скінченно-елементного аналізу тривалий час 3 успіхом застосовують В самих різних областях: автомобілебудуванні, виробництві космічних апаратів, атомній енергетиці. Скінченно-елементні пакети проходять сертифікацію згідно загальносвітовим стандартам якості і надійності.

При дотриманні певних умов (коректна постановка завдання, досягнення збіжності процесу розрахунку і т. д.) фірми виробники гарантують достовірність отриманого результату. У комплекти постачання входять, як верифікацій, правило, завдання лля отримано рішення яких або експериментально, або за допомогою теоретичних методів, з яким можна порівняти результати чисельного аналізу в звичайно-елементному пакеті і ухвалити рішення про достовірність. Основною складністю при застосуванні пакетів, які використовують МСЕ-аналіз, є постановка завдання адекватного фізичній природі досліджуваного процесу. Це положення повною мірою належить і до дослідження пластичного деформування В процесах вальцювання.

## 1.4.2 Аналіз результатів дослідження НДС матеріалу заготовок у процесах вальцювання

Процес вальцювання в своїй основі є процесом поздовжньої прокатки, теоретичні аспекти якого до теперішнього часу достатньою мірою розроблені. Проте процес вальцювання не є стаціонарним, що не дозволяє для його

відомі математичного моделювання застосувати аналітичні залежності, характерні прокатки. Геометрична складність і нестаціонарність для пластичного деформування при холодному вальцюванні зміцнюваного матеріалу дозволяє використовувати класичні вирішення теорії прокатки тільки як методологічну основу при дослідженні процесу.

Кінематику плинності та НДС металу при вальцюванні досліджено В. І. Омельченко [12], [33]. З використанням енергетичного методу автором отримані поля швидкостей течії, деформацій і напружень. Запропонована і використана методика визначення середнього напруження (гідростатичного тиску) шляхом розв'язання рівняння Пуассона методом скінчених елементів. Проте при цьому використовувалося ряд припущень, які спрощують розв'язання, але впливають на точність. Так, складна конфігурація поперечного перетину пера лопатки замінена симетричним профілем, утвореним двома переміщення параболами. Горизонтальна складова швидкості металу приймалася рівною нулю, тобто для кожної матеріальної точки осередку пластичного деформування приймалася схема плоскої деформування, а вертикальна складова швидкості течії – лінійно залежною від координати. Матеріал заготовки вважався жорсткопластичним, вплив сил тертя в системі валок-заготовка на НДС матеріалу в теоретичному аналізі не розглядався. В результаті отримані аналітичні залежності компонент тензора швидкостей деформацій визначаються лише геометричними характеристиками осередку пластичного деформування і швидкістю переміщення матеріалу на виході з осередку, незалежно від фізико-механічних властивостей матеріалу, що деформується, наявності зони випередження і відставання і т. д.

У роботі [3] проведено аналіз швидкості деформування при прокатці у валках із змінним радіусом з урахуванням випередження металу і відхилення перетину виходу від лінії центрів. Отримана формула для визначення кута нейтрального перетину у разі формування не лише перової, але і замкової частини лопатки. Проте результати авторів засновані на розв'язку, отриманому на основі розглядання лише рівнянь рівноваги і кінематичних співвідношень. Проведений аналіз літературних джерел показав, що до теперішнього часу є часткові рішення задачі визначення НДС і кінематики течії матеріалу заготовки, отримані зі значними спрощуючими припущеннями. Такий підхід дозволяє достатньо точно визначати силові параметри процесу вальцювання. Проте він неприйнятний для визначення небезпечних, з точки зору руйнування, зон заготовок і оцінки деформовності металів при вальцюванні.

Важливим при оцінці напруженого стану і особливо оцінці деформовності матеріалів є визначення показників напруженого стану. При цьому найбільшого поширення набуло представлення залежності пластичності від показника напруженого стану, запропонованого Г. О. Смірновим-Аляєвим [34]

$$\eta = I_1(T_{\sigma}) / \sqrt{3I_2(D_{\sigma})}, \qquad (1.16)$$

де  $I_1(T_{\sigma})$  – перший інваріант тензора напруження;

 $I_2(D_{\sigma})$  – другий інваріант девіатора напружень. Показник η не враховує вплив третього інваріанта тензора напружень, тому діаграму пластичності в координатах « $e_u - \eta$ » не можна вважати за єдину для всіх можливих видів напруженого стану.

Для об'єктивної оцінки деформовності металів у різних технологічних необхідно мати в своєму розпорядженні «єдину» діаграму процесах пластичності, що описує пластичність при різних схемах напруженого стану. Випробування металів на пластичність в камері високого тиску різними методами показали різні результати, відповідні одним і тим же значенням напруженого Зокрема В. Л. Колмогоровим [35] показника стану η. встановлено, що при розтягуванні в умовах  $\eta = 0$  пластичність вища, ніж при крученні. О. О. Богатов і ін. показали, що результат випробувань виходить різний, при цьому яка характеристика більша, залежить від марки металу [36]. В. А. Огородніков встановив [37], що при крученні, у разі створення в камері

високого тиску умов з рівними значеннями показника напруженого стану, пластичність буде нижча, ніж при стискуванні.

Для виключення можливих розбіжностей при оцінці деформовності металів необхідно, щоб в досліджуваному технологічному процесі та експериментах з побудови діаграм пластичності дотримувалися умови ідентичності параметра Надаї-Лоде, що характеризує вид девіатора

$$\mu_{\sigma} = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}.$$
(1.17)

Залежність пластичності від схеми напруженого стану може бути описана шляхом побудови повної поверхні пластичності в координатах « $e_u - \eta - \mu_{\sigma}$ ». Вказана залежність запропонована С. І. Губкіним [38], однак її побудова пов'язана з цілою низкою труднощів експериментального характеру.

Вибір і обґрунтування інваріантів напруженого стану при вирішенні завдань механіки матеріалів розглянуто в роботі О. О. Лєбєдєва, В М. Михалевича [39].

В. А. Огородніков встановив [40], що в умовах спільного кручення та розтягу на фоні високого гідростатичного тиску ( $\eta = const$ ) діаграма пластичності не є єдиною. У роботі [41] В. А. Огородніковим запропоновано від діаграми пластичності в координатах  $e_p - \eta$  перейти до діаграми в координатах  $e_p(\eta, \chi)$  шляхом введення поправки на плоскі діаграми без проведення дослідів в камері високого тиску, де  $\chi$  – показник, що враховує третій інваріант тензора напружень

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_{\sigma})}}{\sqrt[3]{I_2(D_{\sigma})}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3}}{\sigma_u}.$$
(1.18)

Поверхню пластичності, побудовану в координатах « $e_u - \eta - \chi$ », можна визначити як об'ємну діаграму пластичності. Перетин поверхні площиною, перпендикулярною осі  $\chi = 0$ , приводить до отримання діаграми пластичності в координатах  $e_* = e_*(\eta)$ . Для побудови діаграм пластичності по даній методиці необхідно проводити трудомісткі випробування в камері високого тиску. Це унеможливлює випробування пластичних матеріалів на стиск, а випробування зразків на розтяг приводять до спотворення результатів внаслідок появи шийки.

I. О. Сиваком розроблена методика побудови поверхонь  $e_*(\eta, \mu_{\sigma})$  шляхом простих випробувань на розтяг, стиск, чистий зсув і випробувань на осаджування циліндричних зразків в пластичних оболонках різної товщини [42], [43], [44], [45].

Аналіз наявних методик випробування металів на пластичність і побудови діаграм пластичності, проведений В. А. Матвійчуком [46], дозволив виявити їх недоліки, обумовлені несталістю показника напруженого стану. За результатами досліджень отримано рівняння для визначення приросту пластичності в залежності від відношення радіусу кривизни шийки до її діаметру, яке дозволяє враховувати ефект «аномального» підвищення пластичності у випадку утворення шийки при розтягуванні.

Аналіз напруженого стану при фасонуванні заготовок прокаткою проведений експериментально-розрахунковим методом [13]. За результатами досліджень побудовані епюри зміни показника напруженого стану на поверхні заготовок (рис. 1.10).

Приведені на рис. 1.10 епюри ілюструють закономірності зміни показника η по контуру перерізу заготовки. На вільній поверхні (по роз'єму калібру) спостерігається найбільш жорстка схема напруженого стану, відповідна розтягу. На ділянці контакту валків із заготовкою переважають напруження стиску.

При дослідженні НДС пера лопаток при холодному вальцюванні в роботах Матвійчука В. А. [1], [17], [18], [46] була застосована методика, що заснована на методах ліній течії, функцій напружень і теорії *R*-функцій.



Рисунок 1.10 – Розподіл показника напруженого стану η на поверхні заготовки при прокатці за схемою круг-овал: а) A = 19; a<sub>k</sub> = 4,5; 1/α = 2,38
б) A = 14,8; a<sub>k</sub> = 2,5; 1/α = 1,67 в) A = 32; a<sub>k</sub> = 6,28; 1/α = 3,6

Для вдосконалення процесу вальцювання важливо також знати величину середнього за прохід показника  $\eta_c$  в зоні деформування, під якою розуміють таку величину, для якої ресурс пластичності, обчислений за критерієм Г. О. Смірнова-Аляєва (без урахування історії деформування), збігатиметься з ресурсом, визначеним за критерієм В. А. Огороднікова, що враховує вплив історії деформування. Очевидно, що  $\eta_c$  залежить також від діаграми пластичності і у роботі [1] він становив  $\eta_c = -1, 2... -1, 5$ , причому більші по абсолютній величині значення відповідають діаграмам із слабкою залежністю пластичності від показника  $\eta$ .

Таким чином, при зміні форми припуску при калібрувальному вальцюванні або зміни форм калібрів при формувальному вальцюванні, показник напруженого стану матеріалу найбільш небезпечної зони заготовки змінюватиметься. При цьому показник напруженого стану змінюється від η ≈1 на вході заготовки в контакт з валками, до η = -4... - 5 під валками.

#### 1.5 Методи дослідження пластичності і критерії деформовності металів

## 1.5.1 Аналіз пластичності металів. Діаграми пластичності, методики побудови

Під пластичністю розуміють здатність металів до незворотного формозмінення без руйнування. Як правило, така здатність є обмеженою, оскільки деформування металів супроводжується збільшенням щільності лінійних і точкових дефектів, появою і збільшенням мікропор і мікротріщин, що приводить до розрихлення металу, утворення магістральної тріщини і руйнування.

Пластичне деформування супроводжується зростанням залишкових деформацій. Деформований стан в точці можна описати симетричним тензором другого рангу  $\dot{\varepsilon}_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$  – тензором швидкостей деформацій. Компоненти тензора швидкостей деформацій пов'язані з полем швидкостей  $U_i(i = 1, 2, 3)$  співвідношенням Коші

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \tag{1.19}$$

де  $x_i(i=1,2,3)$  – координати Ейлера.

За міру швидкостей деформацій в точці приймають один з варіантів тензора швидкостей деформацій – інтенсивність швидкостей деформації  $\dot{\varepsilon}_u$ , яка є скалярною позитивною величиною.

Мірою деформації в матеріальній точці служить накопичена деформація

$$e_{u} = \int_{0}^{t_{\kappa}} \dot{\varepsilon}_{u} dt \quad , \tag{1.20}$$

де  $t_{\kappa}$  – час закінчення процесу деформування.

За міру пластичності приймають накопичену до моменту руйнування пластичну деформацію [47]

$$e_* = \int_0^{t_p} \dot{\varepsilon}_u dt \,, \tag{1.21}$$

де  $t_p$  – час деформування до руйнування.

При простому деформуванні, коли зберігається знак головних деформацій і постійність положень головних осей відносно матеріальних волокон, накопичена деформація дорівнює інтенсивності логарифмічних деформацій [48]

$$e_{u} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\left(e_{1} - e_{2}\right)^{2} + \left(e_{2} - e_{3}\right)^{2} + \left(e_{3} - e_{1}\right)^{2}}, \qquad (1.22)$$

де *e*<sub>1</sub>,*e*<sub>2</sub>,*e*<sub>3</sub> – головні логарифмічні деформації.

Пластичність залежить від марки і стану металу; виду напруження, визначаючого знак головних деформацій і постійність положення головних осей відносно матеріальних волокон; показника напруженого стану; стану поверхні зразка, що деформується, і масштабного фактору; градієнтів деформованого стану і пошкодженості металу; інтенсивності зміни напрямів площини ковзання і ін. Головним фактором, що впливає на пластичність металів в умовах холодного деформування, є схема напруженого стану. Залежність пластичності від параметрів, що характеризують схему напруженого стану, називають діаграмою пластичності.

Найбільшого поширення набуло представлення залежності пластичності від показника напруженого стану  $\eta$  і параметра Надаї-Лоде  $\mu_{\sigma}$ , описаних вище. При цьому проблемними залишаються суперечливі значення пластичності, отримані при різних видах випробувань. І до основного з таких протиріч слід віднести «аномальне» підвищення пластичності при утворенні шийки у разі розтягування зразка.

Аналіз напруженого стану матеріалів заготовок при вальцюванні показав, що показник напруженого стану  $\eta$  в небезпечній зоні знаходиться в межах  $-2 \le \eta \le 1$ , а параметр Надаї-Лоде –  $0 \le \mu_{\sigma} \le 1$  [1]. Пластичність матеріалів при цьому може бути визначена за результатами випробування циліндричних зразків на осаджування, кручення, розтяг, а також шляхом реалізації вказаних вище видів випробувань в камері високого тиску. Проте при таких випробуваннях часто виникають проблеми, пов'язані зі складністю дотримання заданої схеми напруженого стану, однорідної по перерізу зразка, а також дотримання умов  $\eta = const$  впродовж всього часу випробування.

#### 1.5.2 Феноменологічні критерії деформовності металів. Визначення ресурсу пластичності

Для оцінки пластичності стану при великих пластичних деформаціях було розроблено низку критеріїв, які подані в роботах С. І. Губкина, Г. О. Смірнова-Аляєва, В. Л. Колмогорова, В. А. Огородникова, Г. Д. Деля та ін. [23], [34], [37], [38], [40], [41], [43], [48], [49]. Для розрахунку використаного за операцію ресурсу пластичності в одноперехідних процесах обробки металів тиском, як запобігання пошкодженням використовують деяку скалярну характеристику граничної деформації. Запропонований Г. О. Смірновим-Аляєвим [47] критерій використовується для оцінки граничного пластичного деформування

$$e_i = \int_{0}^{t_0} \varepsilon_i d\tau \le e_p(\eta), \qquad (1.23)$$

який можна записати у вигляді

$$\psi = \frac{e_u}{e_p(\eta)} \le 1, \tag{1.24}$$

де  $e_p(\eta)$  – гранична деформація у момент появи перших тріщин, які виявляються візуально;  $\psi$  – використаний ресурс пластичності, який під час деформування без руйнування, менше одиниці.

У критерії (1.23) величина  $e_p$  залежить від температури випробувань, швидкості деформацій і показника напруженого стану  $\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}$  (по

В. А. Бабічкову), якому відповідає момент руйнування матеріалу. При оцінці величини  $e_p$  по Г. О. Смірнову-Аляєву нехтують впливом історії деформування; граничну деформацію, при якій відбувається руйнування, визначають лише показником  $\eta$ .

Критерій деформування В. Л. Колмогорова (1.25), отриманий з використанням гіпотези про «пропорційну залежність між накопиченням пошкодженності і приростом деформації» у вигляді

$$\psi = \int_{0}^{t_{p}^{*}} E(t-\tau) \cdot B(\tau) \frac{\dot{\varepsilon}_{u}(\tau)}{e_{p}(\eta(\tau))} \cdot d\tau \leq 1, \qquad (1.25)$$

де  $\dot{\varepsilon}_u$  – інтенсивність швидкості деформацій;  $B(\tau)$  – величина, що враховує швидкість розвитку тріщин та їх заліковування при холодному деформуванні;  $E(t-\tau)$  – коефіцієнт, що враховує заліковування дефектів при високих температурах, монотонно зменшується від 1 до 0 із збільшенням аргументу.

Практичне використання критерію, записаного у вигляді (1.25) ускладнено, оскільки в літературі не наводяться дані про значення коефіцієнтів  $E(\tau)$  і  $B(\tau)$  при різних процесах пластичного деформування. Тому ці коефіцієнти зазвичай приймаються рівними одиниці

$$\Psi = \int_{0}^{e_{p}^{*}} \frac{de_{u}}{e_{p}(e_{u})} \le 1.$$
(1.26)

При навантаженнях, близьких до простих, критерій (1.26) зводиться до критерію (1.24), якщо покласти в критерії (1.25)  $B(\tau)=1$ ; при  $\eta_1 = const$ . У загальному випадку за заданою функцією  $e_i(\eta)$  та діаграмою пластичності можна встановити залежність  $e_p(e_i)$  і, виконавши інтегрування в (1.26), провести оцінку деформування.

У роботах [40], [41] В. А. Огородніковим досліджена залежність граничної деформації від схеми напруженого стану, історії деформування і градієнта пластичних деформацій. Ним, спільно з Г. Делем, запропонований критерій деформування, що враховує нелінійне накопичення пошкоджень і різні шляхи навантаження металу

$$\Psi = \int_{0}^{e_{u}^{*}} \left( 1 + a \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_{u}} \right) \cdot \frac{e_{u}^{a \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_{u}}}}{\left[ e_{p} \left( \eta(e_{u}) \right) \right]^{1 + a \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_{u}}}} de_{u} \leq 1, \quad (1.27)$$

Застосування критерію (1.24) для процесів, в яких шлях деформування і швидкість зміни показника  $\eta(d\eta/de_u)$  істотно змінюються, приводить до

розбіжності розрахункових і експериментальних даних. Критерій (1.27) у зазначеному випадку дає точніші результати. Що стосується порівняння результатів розрахунку граничних деформацій за критеріями (1.25) і (1.26), то розходження залежить від кривизни траекторії деформування  $d\eta/de_u$ . У випадку якщо  $d\eta/de_u > 4$ , розрахунок за критерієм (1.27) дає результати ближчі до експериментальних даних.

Використання критерію (1.27) можливе і в тих випадках, коли відома об'ємна діаграма пластичності в координатах  $e_p(\eta; \chi)$ . У таких випадках пропонується критерій у вигляді [37]

$$\Psi = \int_{0}^{e_{p}^{*}} \left( 1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_{u}} \right) \cdot \frac{e_{u}^{0.2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_{u}}}}{\left[ e_{p}\left(\eta, \chi\right) \right]^{1+0.2 \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_{u}}}} de_{u} \leq 1.$$
(1.28)

Для процесів обробки металів тиском, де реалізується об'ємний напружений стан пропонується критерій у вигляді [37]

$$\Psi = \int_{0}^{e_{p}^{*}} \left( 1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{d\eta}{de_{u}} + \frac{d\chi}{de_{u}}\right) \right) \cdot \frac{e_{u}^{0.2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{d\eta}{de_{u}} + \frac{d\chi}{de_{u}}\right)}}{\left[e_{p}\left(\eta(e_{u}), \chi(e_{u})\right)\right]^{1+0.2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{d\eta}{de_{u}} + \frac{d\chi}{de_{u}}\right)}} \leq 1.$$
(1.29)

У багатьох випадках спостерігається слабкий вплив властивостей матеріалу на шлях деформування частинок матеріалу в небезпечній зоні деформованих заготовок  $\eta = \eta(e_i)$ . Цей факт, підтверджений експериментально для процесів осадки в осьовому і радіальному напрямах, поперечного витискування, холодної висадки, розкочування заготовок в торець, радіального кування і ін., що описано в роботах В. А. Огороднікова та В. А. Матвійчука [40], [41], [1]. Отже, для розрахунку граничних технологічних параметрів процесів обробки тиском, можна скористатися залежностями, знайденими на моделі з іншого матеріалу.

У розглянутих вище умовах передбачається, ЩО накопичення пошкоджень в деформованому металі підлягає скалярному опису, однак у разі, коли розглядаються багатоперехідні операції ОМТ (навантаження не є однорідним, з розвантаженням, зміною напряму деформування, з проявом відзначається розбіжність i ефекту Баушингера) розрахункових експериментальних даних. У цьому випадку слід застосовувати критерії руйнування, в яких за міру пошкоджень надано тензор другого рангу, тобто в загальному випадку критерій руйнування повинен враховувати направлений характер пошкоджень. Таким чином, подальшим кроком у розвитку теорії деформування є надання накопичення пошкодження у вигляді тензора другого рангу.

Цей напрям для великих пластичних деформацій розвинули О. А. Ільюшин, Г. Д. Дель, В. М. Михалевич і ін. [49],[50],[51],[52].

Ідеї врахування направленого характеру пошкоджень за допомогою тензора пошкоджень належать О. А. Ільюшину. Г Д. Дель [23] знайшов конкретний вид підінтегральної функції тензора пошкоджень і запропонував тензорно-лінійну модель накопичення пошкоджень при холодному пластичному деформуванні тіл, які мають в вихідному стані ізотропію граничних деформацій. У [49] приведений критерій деформування у вигляді

$$\Psi_{ij} = \int_{0}^{e_u} \left( 1 - a + 2a \frac{e_u}{e_*(\eta)} \right) \cdot \beta_{ij} \frac{de_u}{e_*(\eta)}, \qquad (1.30)$$

де  $\beta_{ij} = \frac{2}{3} \cdot \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_i}$  – направляючий тензор швидкостей деформацій, а = const. Постійна *а* підбирається так, щоб задовольнити умову руйнування

$$\Psi_{ij} \cdot \Psi_{ij} = 1. \tag{1.31}$$

У роботах А. А. Мішуліна, В. М. Михалевича [51], [52] розроблена тензорно-нелінійна модель накопичення пошкоджень

$$\Psi_{ij} = \int_{0}^{e_u} \left( A\beta_{ij} + B\left(\beta_{ik}\beta_{kj} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\right) \right) de_u, \qquad (1.32)$$

де *А* і *В* – деякі функції;

 $\beta_{ik}\beta_{ki}$  – квадрат тензора  $\beta_{ij}$ ;

 $\delta_{ij}$  – одиничний тензор:  $\delta_{ij} = 1$  при i = j і  $\delta_{ij} = 0$  при  $i \neq j$ .

При простому деформуванні (β<sub>ij</sub> = *const*) співвідношення (1.32) набуває вигляду

$$\Psi_{ij} = a\beta_{ij} + b\left(\beta_{ik}\beta_{kj} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\right), \qquad (1.33)$$

де параметри моделі a і b – первісні функції A і B, які виражаються через монотонно зростаючу функцію накопичення пошкоджень в матеріалі при пластичному деформуванні. Зазначений підхід є особливо ефективним при оцінці деформовності матеріалу в процесах з немонотонним деформуванням.

#### Висновки до розділу 1

1. Процеси гарячого вальцювання набули широкого розповсюдження при виготовленні суцільних довгомірних виробів як формувальні і штампувальні операції, проте розширенню їх технологічних можливостей, а також розвитку холодного вальцювання заважає небезпека руйнування матеріалу і втрата стійкості елементів заготовки в процесі формозмінення. Тому одним із вальцювання є розроблення нових схем і напрямів розвитку процесів режимів аналізу формозмінення заготовок, на основі напруженодеформованого стану матеріалу та оцінки його деформовності;

2. На сьогодні відсутня методика побудови «єдиної» діаграми пластичності, а використання існуючих технологічних способів випробування металів призводить до розбіжностей в значеннях пластичності. Тому

актуальним є розроблення нового методу випробувань, який дозволяє забезпечити постійність напруженого стану протягом всього процесу деформування;

3. Відсутні ефективні методики оцінки деформовності металів при холодному вальцюванні, зокрема для двохетапного немонотонного деформування, коли на кінцевому етапі спостерігається складне деформування;

4. Відсутній підхід обґрунтованого переходу від холодного вальцювання до гарячого, встановлення температурних полів деформованої зони заготовки та вплив на їх розподіл технологічних параметрів;

5. Для розвитку процесів вальцювання необхідне проведення подальших досліджень, спрямованих на вивчення характеру течії металу залежно від параметрів процесу, характеру розподілу в матеріалі заготовки НДС і величини використаного ресурсу пластичності, поліпшення характеристик якості вальцьованих заготовок.

### РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПРИ ВАЛЬЦЮВАННІ

# 2.1 Технологічні властивості та галузі застосування алюмінієвих сплавів

Завдяки високим технологічним властивостям алюмінієвих сплавів, широкого розповсюдження набуло виробництво з них напівфабрикатів і готових виробів. При питомій вазі 2,7 г/см<sup>3</sup>, алюмінієві сплави мають високу питому міцність, високу теплопровідність, електропровідність, відбивні властивості, здатність до утворення міцних захисних декоративних плівок, задовільну корозійну стійкість і при цьому добре підлягають обробці як в гарячому, так і в холодному стані. Це сприяє їх широкому використанню в різних галузях народного господарства.

Зокрема, алюміній та його сплави широко застосовують в електрохімічній і машинобудівній промисловості (електричні дроти, теплообмінники, радіатори тощо). Широкого застосування алюмінієві сплави набули в авіації (60 – 70%), оскільки це один з основних конструкційних матеріалів, який має високі характеристики міцності (границю міцності, границю текучості, опір зрізу), задовільну пластичність і термомеханічні характеристики.

Властивості виробів з алюмінієвих сплавів в основному визначають способи їх виробництва, які поділяються на наступні основні групи:

- ливарне виробництво виготовлення фасонних відливок як заготовок, так і готових деталей;
- обробка тиском виготовлення листів, плит, профілів, поковок, штампувань, труб та ін.;
- обробка різанням виготовлення деталей переважно в одиничному та малосерійному виробництві.

Особливості структури алюмінієвих сплавів залежать від технології виробництва напівфабрикатів, яка обумовлює: тривалість нагріву і температуру деформації; схеми, ступінь, швидкість і тривалість деформації. Тому деформовані напівфабрикати (листи, профілі, штампування та ін.), отримані з одного сплаву, після однакової кінцевої термічної обробки можуть суттєво відрізнятися за механічними та іншими параметрами.

Алюмінієві сплави щодо здатності до обробки тиском умовно поділяються на сплави високої, середньої і низької технологічної пластичності. Оскільки пластичність є важливою технологічною характеристикою, яка можливість виготовлення деталей належної визначає якості холодним деформуванням (при гарячому деформуванню вона переважно не € обмежуючим технологічним фактором), то в подальшому у роботі наведені характеристики пластичності низки алюмінієвих сплавів.

Запропонована класифікація алюмінієвих сплавів за міцністю і пластичністю подана авторами в роботі [53] (таблиця 2.1).

До характеристик міцності належать такі величини, як границя міцності  $\sigma_M$  і границя текучості  $\sigma_T$ . Ці характеристики використовується переважно у розрахунках на міцність конструктивних елементів машин і споруд. Вони є величинами довідковими і для низки алюмінієвих сплавів, що підлягають деформуванню, подані у таблиці 2.2.

У якості характеристик пластичності матеріалів в літературі широко представлені два показники – відносне подовження і відносне звуження.

Відносне подовження

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\%, \tag{2.1}$$

де  $l_0$  і l – початкова і кінцева (в момент руйнування) довжина зразка, що випробовується на розтяг.

Група	Міцність і	Сплав	Механічні властивості		
	пластичність	Сплав	σ <sub>м</sub> , МПа	δ, %	
Ι	М'які, пластичні	АД, АВ, АМЦ, АМг1, АМг2, АД31, АД33	Менше 300	5-22 (залежно від міри нагартовки)	
П	Середня міцність і пластичність	Д1, АК2, АК4, АК4- 1, АК6, АК6- 1, ВД17, АМг6	300-450	10-15	
III	Висока міцність зі зниженою пластичністю	АК8, В98, В95, В96, ВАД23	Більше 450	5	

Таблиця 2.1 – Класифікація за міцністю і пластичністю алюмінієвих сплавів

Таблиця 2.2 – Характеристики міцності алюмінієвих сплавів у стані постачання або відпалених

Марка сплаву	$\sigma_{_M}$ , МПа				$\sigma_{_T}$ , МПа	
	прес. профіль	прес. пруток	лист	поло- са	прес. профіль	прес. Пруток
АД0, АД1	60		60	60		
АМц	170	≥100	90	90		
АД33Т	180				110	
ΑΜΓ2	150		170		60	
АМг3	260	180	200	100	130	80
АМг5			280			
AB	180		150			
Д1М, Д16М	≤300					
Д1Т	340	380			190	220
B95			250			

$$\psi_{u} = \frac{F_0 - F}{F_0} \cdot 100\%, \qquad (2.2)$$

де *F*<sub>0</sub> і *F* – початкова і кінцева (найменша в момент руйнування) площа поперечного перерізу зразка, що випробовується на розтяг.

Більш універсальною характеристикою пластичності є логарифмічна деформація

$$e = ln \frac{F_0}{F}.$$
(2.3)

Перевагою якої є її адитивність, що дозволяє додавати логарифмічні деформації

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0. (2.4)$$

Із цієї умови витікає зв'язок між логарифмічною деформацією і відносним звуженням

$$e = ln \frac{1}{1 - \psi_u}.$$
(2.5)

Значення показників δ і ψ [54] для низки алюмінієвих сплавів, що підлягають деформуванню, подані у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Характеристики пластичності алюмінієвих сплавів у стані постачання або відпалених

Magua	δ,%				$\Psi_{u}$ , %	
марка сплаву	прес.	прес.	лист	поло-	прес.	прес.
	профіль	пруток		ca	профіль	пруток
АДО, АД1, А5, А6,	20	25	28	28		
A7						

20 АМц 22 18 16 АД33Т 15 ΑΜΓ2, ΑΜΓ3 13 13 18 80 АМг5, АМг6 15 15 15 60 AB 14 14 Д1М, Д16М 10 10 12 **Д1**Т B95 10 6 10 12 АК6

Як видно із таблиць 2.3 і 2.4, механічні характеристики алюмінієвих сплавів залежать від способу отримання з них того чи іншого профілю. Слід також відзначити, що приведено характеристики для відпалених сплавів, або отриманих у стані постачання після гарячого деформування.

#### 2.2 Криві зміцнення алюмінієвих сплавів

Пластичні деформації металів та сплавів, у разі одновісного розтягу або стиску, виникають при умові досягнення границі текучості. При складному напруженому стані початок появи пластичних деформацій описується умовами пластичності Тріска-Сен-Венана

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T \tag{2.6}$$

чи Мізеса

$$\sigma_{\mu} = \sigma_{T}, \qquad (2.7)$$

де  $\sigma_1, \sigma_3$  – екстремальні головні напруження;

σ<sub>т</sub> – границя текучості;

 $\sigma_u$  – інтенсивність напружень.

При холодній обробці тиском із збільшенням міри деформації підвищуються усі показники міцності металу: границя пружності, границя пропорційності, границя текучості [55].

продовження табл. 2.3

Зміцнення супроводжується підвищенням твердості металу, що дозволяє шляхом виміру твердості визначати пластичну ділянку і характер розподілу в ній характеристик міцності. Основною причиною зміцнення є лавиноподібний розвиток і скупчення дислокацій – дефектів кристалічної решітки металу, ліній ковзання, та наступне їх застрягнення перед різноманітними перешкодами, що утворюються в процесі деформування або існували до нього. Таким чином, в процесі деформування значення границі текучості металів зростає. Ефект зміцнення при цьому має затухаючий характер, оскільки із збільшенням щільності дислокацій збільшується і число їх анігіляцій. Істинне напруження, що має місце при пластичній деформації, називають напруженням текучості або опором деформації. З урахуванням умови Тріска-Сен-Венана (2.6), його часто замінюють поняттям максимального дотичного напруження:  $\tau_{13}$ , а з урахуванням умови Мізеса (2.7) – поняттям інтенсивності напружень  $\sigma_u$ .

Вважається, що при холодному деформуванні напруження текучості повністю описується кривими зміцнення.

Криві зміцнення зазвичай будують за результатами випробувань зразків на розтяг, стиск, кручення або з використанням комбінованих способів. Гіпотеза про "єдину" криву текучості, що дозволяє переносити результати експериментів з лінійним напруженим станом на випадки складного напружено-деформованого стану, отримала підтвердження при багатократних експериментальних перевірках. При цьому деякі дослідники [56] все ж віддають перевагу умовам пластичності Тріска-Сен-Венана.

Криві зміцнення алюмінієвих сплавів будували в координатах  $\sigma_u = f(e_u)$ за результатами випробувань циліндричних зразків на осаджування в умовах одновісного стиску. Як мастило використовували прокладки з фольги свинцю в комбінації з машинним маслом і графітом. Осаджування проводили поетапно із заміною прокладок. На деяких етапах прокладки продавлюються по контуру торцевих поверхонь зразків. У результаті на торцевих поверхнях утворюються увігнуті лунки, краї яких починають контактувати з інструментом. Для виключення такого контакту, який перешкоджає дотриманню лінійного
напруженого стану зразка, крайки лунок слід поетапно шліфувати або осаджувати без прокладок при зусиллях, що не перевищують 80% від сили деформування на попередньому етапі. Це дозволяє виключати утворення бочки і досягати умови одновісного стиску при значних деформаціях.

На рис. 2.1 приведені криві зміцнення сплавів АМц, АД1 і АД31.



Рисунок 2.1 – Криві зміцнення різних алюмінієвих сплавів

Випробуванням стандартних зразків на розтяг визначали, додатково до випробувань на осаджування, по дві точки на кривій зміцнення, які відповідають початку пластичної деформації і руйнуванню.

Для аналітичного опису кривих зміцнення можна використовувати такі відомі апроксимації:

1) ступеневі

$$\sigma_u = \sigma_0 + A e_u^n \tag{2.8}$$

$$\sigma_u = A \left( e_0 + e_u \right)^n; \tag{2.9}$$

$$\sigma_u = A e_u^n \tag{2.10}$$

2) експоненціальні

$$\sigma_u = \sigma_0 + (\sigma_{np} - \sigma_0) [1 - exp(-ce_u)]; \qquad (2.11)$$

$$\sigma_u = \sigma_{np} - c_1 e^{-e_u} - c_2 e^{-Ne_u} , \qquad (2.12)$$

де  $\sigma_0, A, n, \sigma_{np}, c, c_1, c_2, N$  – коефіцієнти.

Оскільки побудова кривих зміцнення є достатньо трудомісткою операцією, то Грушко О. В. [57] розробив методику їх побудови за значеннями границь міцності і текучості, використовуючи апроксимацію П. Людвіга

$$\sigma_i = A e_i^n. \tag{2.13}$$

При апроксимації кривої зміцнення по П. Людвігу вираз містить дві невідомі величини

$$\begin{cases} \sigma_{0,2} = A \cdot 0,002^n \\ \sigma_{i\beta} = Aexp(-n) \cdot n^n \end{cases}$$
(2.14)

де 0,002 – допуск на пластичну деформацію.

Показник зміцнення з цієї системи можна знайти шляхом чисельного рішення трансцендентного рівняння

$$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{\theta}} - exp(n) \cdot \left(\frac{0,002}{n}\right)^n = 0$$
(2.15)

У запропонованому методі ці точки пов'язані з границями текучості і міцності при розтягу. Основним питанням при цьому є визначення логарифмічних деформації, які відповідають вказаним напруженням [57]. 2.3 Характеристики міцності алюмінієвих сплавів при гарячому деформуванні

## 2.3.1 Криві зміцнення алюмінієвих сплавів при гарячому деформуванні

При гарячому деформуванні разом з ефектом зміцнення відбувається процес знеміцнення металу. При цьому характер кривих зміцнення суттєво залежить від температури та швидкості деформування. Нижче приведені криві зміцнення алюмінієвих сплавів при підвищених температурах.



Рисунок 2.2 – Криві деформаційного зміцнення алюмінію. Температура, °С; швидкість деформування, с<sup>-1</sup>: 1 – 200; 6; 2 – 200; 6·10<sup>-2</sup>; 3 – 300; 6·10<sup>-1</sup>; 4 – 300; 6·10<sup>-3</sup>.

Таблиця 2.4 – Механічні властивості деформованого сплаву АК8 при високих температурах

Температура випробування, °С	e <sub>u</sub>	ψ,%	δ,%
20	0,4	33	15
150	0,8	57	20
200	1,7	82	32
300	3,5	97	60



Рисунок 2.3 – Криві деформаційного зміцнення сплаву АК8 після гарячого пресування і відпалювання: а) 350°С, б) 400°С, в) 450°С. Швидкість деформації, с<sup>-1</sup>:1 – 10<sup>-2</sup>; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200.

Таблиця 2.5 – Механічні властивості деформованого сплаву АК6 при високих температурах

Температура випробування,°С	σ <sub>s</sub> ,MΠa	ψ,%	e <sub>u</sub>
350	56	92,6	2,6
400	40	96	3,2
450	32	97,3	3,6
475	30	98	3,9
500	25	98	3,9

 $\sigma_u, M\Pi a$ 



Рисунок 2.4 – Криві деформаційного зміцнення сплаву АК6 після гарячого пресування і відпалювання: а) 350°С, б) 400°С, в) 450°С. Швидкість деформації, с<sup>-1</sup>: 1 – 10<sup>-2</sup>; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200



Рисунок 2.5 – Криві деформаційного зміцнення сплаву АМгЗ після гарячого пресування і відпалювання: a) 350°C, б) 400°C, в) 450°C. Швидкість деформації, с<sup>-1</sup>: 1 – 10<sup>-2</sup>; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

2.3.2 Дослідження опору деформації при вальцюванні заготовок із алюмінієвих сплавів

Основне рівняння пластичності записується таким чином [58]

$$\left(\sigma_{x} - \sigma_{y}\right)^{2} + (\sigma_{x} - \sigma_{z})^{2} + \left(\sigma_{y} - z\right)^{2} + \tau_{xy}^{2} + \tau_{xz}^{2} + \tau_{yz}^{2} = 2\sigma_{\phi}^{2}.$$
 (2.16)

При двовимірній деформації, коли відсутня деформація у напрямі осі z, а також, якщо напрями напружень  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  збігаються з головними осями напружень, рівняння пластичності набуває такого вигляду

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{\phi}. \tag{2.17}$$

Середнє питоме зусилля при прокатці розраховують за формулою

$$P_{\rm cp} = n_{\rm \sigma} n_{\rm B} \,\sigma_{\rm \phi}, \qquad (2.18)$$

де  $n_{\rm B}$  – коефіцієнт, що враховує вплив ширини смуги на питоме зусилля;  $\sigma_{\phi}$  – фактичний опір металу деформуванню, що відповідає заданій температурі, мірі та швидкості деформування;  $n_{\sigma}$  – коефіцієнт напруженого стану, який виражається рівнянням

$$n_{\sigma} = n_{\sigma}' n_{\sigma}'' n_{\sigma}''', \qquad (2.19)$$

де  $n'_{\sigma}$ ,  $n_{\sigma}''$ ,  $n_{\sigma}'''$  – коефіцієнти, що враховують відповідно вплив зовнішнього тертя, зовнішніх зон, натягнення або підпору [6].

Приймаємо, що максимальне головне напруження  $\sigma_1$  рівномірно розподілено по контактній поверхні та дорівнює середньому питомому зусиллю  $P_{cp}$ . Оскільки в умовах двовимірного деформування  $n_B = 1$ , а  $n_{\sigma}^{\prime\prime\prime}$  відсутній, то рівняння середнього питомого зусилля буде мати вигляд

$$P_{\rm cp} = n_{\sigma}' n_{\sigma}'' \sigma_{\phi}. \tag{2.20}$$

Оскільки  $\sigma_1 = P_{cp}$ , то враховуючи (2.17), (2.20), маємо

$$\sigma_{\Phi} + \sigma_3 = n_{\sigma}' n_{\sigma}'' \sigma_{\Phi},$$

або

$$n'_{\sigma}n''_{\sigma} - 1 = \frac{\sigma_3}{\sigma_{\phi}}.$$
(2.21)

При плоскому напруженому стані  $\sigma_3 = 0$ , тому  $n'_{\sigma}n''_{\sigma} - 1 = 0$ , або $n'_{\sigma}n''_{\sigma} = 1$ .

У роботах А. І. Целікова, В. В. Смірнова [59], В. Ф. Пушкарьова [60] встановлено, що при  $\frac{l_{\mathcal{A}}}{h_{cp}} = 1$  ( $l_{\mathcal{A}}$  – довжина зони деформації,  $h_{cp}$  – ширина полоси) вплив зовнішніх зон відсутній, вплив зовнішнього тертя в поздовжньому напрямі та значення поздовжнього напруження мінімальні, отже ними можна нехтувати. Таким чином  $\sigma_3 \approx 0$ ;  $\sigma_2 \neq 0$ ;  $\sigma_1 \neq 0$ , тобто отримуємо схему плоского напруженого стану.

Формулу А. І. Целікова можна представити у вигляді

$$P_{\rm cp} = \frac{\kappa}{n} \ (l^n - 1), \tag{2.22}$$

де K – істинний опір деформуванню при температурі, швидкості та мірі деформації, які відповідають реальному процесу прокатки,  $n = \mu \frac{l_A}{h_{cp}}$ .

Коефіцієнт напруженого стану

$$n'_{\sigma} = \frac{P_{cp}}{K} = \frac{l^n - 1}{n} = \frac{l^{\mu \frac{l_{\mathcal{A}}}{h_{cp}}} - 1}{\mu \frac{l_{\mathcal{A}}}{h_{cp}}},$$
(2.23)

при  $\frac{l_{\mathcal{A}}}{h_{cp}} = 1$  маємо  $n'_{\sigma} = \frac{l^{\mu} - 1}{\mu}$ .

Розкладемо вираз в ряд по степеням коефіцієнта тертя µ

$$n'_{\sigma} = 1 + \mu/2 + \mu^2/6 + ...$$

Середнє значення напруженого стану при  $l_{\mu} = h_{cp}$  прямо пропорційне коефіцієнту тертя  $\mu$ , тобто  $n'_{\sigma} = f(\mu)$ . При  $\mu \to 0$  коефіцієнт напруженого стану прямує до 1:  $n'_{\sigma} = 1$ ; тоді  $P_{cp} = K$ .

Завдяки перевагам методу базисного тиску, який дає найближчий результат до реальних умов в осередку деформування при вальцюванні та прокатці, він рекомендований як основний для визначення опору деформуванню, тобто прийняли рівність  $P_{\rm cp.6} = P_{\rm cp.} = K$ .

У роботі [61] описана методика проведення досліджень визначення базисного тиску. Для проведення експериментів були виковані зразки із сплаву АК6 розміром  $18 \times 66 \times 300$  мм, термооброблені та вистругані у розмір  $12 \times 66 \times 300$  мм. Перед прокаткою зразки нагрівалися в камерній печі електроопору до температури 420 і 470 °С. Перед дослідженням автоматичний потенціометр печі був відградуйований. Прокатку проводили на прокатному стані в гладких валках діаметром 260 мм та частотою обертання 26 с<sup>-1</sup>. Валки перед прокаткою мали температуру 20 °С. Вибрані температури прокатки відповідають граничним умовам нагріву під гарячу обробку тиском сплаву АК6. Зниження температури зразка при перенесенні від печі до прокатного стану компенсувалося нагрівом зразків на 10 - 15 °С вище за температуру прокатки. Вимірювання тиску металу на валки здійснювали за допомогою месдоз у вигляді силомірної склянки та записували показники осцилографа H 105 на світлочутливий папір типу УФ. Температура контролювалася хромельалюмелевою термопарою. Коефіцієнт зовнішнього тертя між прокатуваним металом і валками визначали з умови максимального кута захоплення металу валками при прокатці і середнє значення  $\approx 0,35$ . Прокатку зразків проводили при обтисканнях 2–60 %, що відповідало відношенню  $l_A/h_{\pi} = 0,5-3,55$ .

Середнє питоме зусилля визначалося за формулою

 $P_{\rm cp.} = P/_{F_{\rm r.}},$  (2.24)

де P – тиск, виміряний месдозами;  $F_k = b_{cp}\sqrt{R\Delta h}$  – площа контактної поверхні,  $b_{cp}$  – середня ширина контактної поверхні заготовки до і після прокатки, R – робочий радіус валків,  $\Delta h$  – абсолютне обтиснення.

На рис. 2.6 графічно зображені результати експериментів залежності загального зусилля Р від  $l_d/h_{cp}$  [60]. Зростання значень загального зусилля із збільшенням  $l_d/h_{cp}$  пояснюється тим, що площа контакту металу і валків збільшується. При цьому зростають сили тертя на контактних поверхнях, спрямовані до нейтрального перерізу, а в результаті опору переміщенню металу уздовж осі заготовки збільшується тиск металу на валки.

На рис. 2.7 зображено залежність  $P_{cp}$  від  $l_{\text{Д}}/h_{cp}$ . Проведені експерименти показали, що при температурах прокатки 420°С і 470°С сплаву АК6 значення  $P_{cp}$  знаходяться відповідно при  $l_{\text{Д}}/h_{cp} = 1,4 \ i \ 1,0$ .

Експериментальні дані показують, що при невеликих мірах деформації значення базисного тиску високі. При збільшенні деформації вони знижуються до певних значень, потім плавно зростають. А. І. Целіков і А. І. Гришков [62] вважають, що зміну залежності  $P_{cp}$  від  $l_d/h_{cp}$  зліва від точки мінімуму визначають в основному зовнішні зони і несуттєво контактні сили тертя, а залежність, розташовану праворуч від точки мінімуму, сили тертя і несуттєво зовнішні зони. У точці мінімуму спостерігається незначний вплив сил тертя і зовнішніх зон. С. О. Скрябін пропонує інше пояснення характеру зміни залежності  $P_{cp}$  від

 $l_{\rm d}/h_{\rm cp}$  рис. 2.7 [61]. При невеликих мірах деформацій спостерігається опрацювання тільки поверхневих шарів металу, в яких значний опір деформації рис. 2.8 [1]. При цьому поверхня контакту металу з валком невелика, і тут для деформації поверхневих шарів металу необхідно застосувати велике загальне зусилля.



Рисунок 2.6 – Загальне зусилля при вальцюванні еталонних зразків для визначення базисного тиску при температурі: 1 – 420°С; 2 – 470°С. Сплав АК6.





Рисунок 2.8 – Розподіл ізоліній  $\varepsilon_u = const$  ( $\bigcirc$ ) в зоні пластичного відбитку.

$$1 - 420^{\circ}$$
C;  $2 - 470^{\circ}$ C.

Тому при значному загальному зусиллі та невеликій контактній поверхні спостерігаються високі середні питомі зусилля. Із збільшенням міри обтискання, деформація проникає в глибинні шари металу і спостерігається зменшення При значень середніх питомих зусиль. визначенні зусилля можна використовувати дані, отримані при розтягу на пластометрі, [61], при цьому ввести поправочний коефіцієнт  $K_{\sigma} = 1,18 - 0,96$  для температури вальцювання деформації 3,37 – 10,97  $c^{-1}$ ;  $K_{\sigma} = 1,08 - 0,8$ 420°C i швидкості для температури вальцювання 470 °С і швидкості деформації 3,03 – 0,3  $c^{-1}$ .

Для визначення базисного тиску при вальцюванні сплаву АК8, знаходимо за рис. 2.7 мінімальний базисний тиск сплаву АК6 при  $\frac{l_{\pi}}{h_{cp}} = 1$ :  $P_{cp} = 105 M\Pi a$ , при температурі 470°С, а при температурі 420°С –  $P_{cp,\delta} = 135 M\Pi a$  [58].

За даними, представленими на рис. 2.7, будуємо графіки залежності границі текучості  $\sigma_{0,2}$  сплавів АК6 і АК8 від коефіцієнта форми  $l_{\rm d}/h_{\rm cp}$  при t = 420°C (рис. 2.9) і t = 470°C (рис. 2.10).



Рисунок 2.9 – Залежність границі текучості  $\sigma_{0,2}$  сплаву АК6 (1) і АК8 (2) при температурі вальцювання t = 420°C від коефіцієнта форми  $l_{I}/h_{cp}$ 



Рисунок 2.10 – Залежність границі текучості  $\sigma_{0,2}$  сплаву АК6 (1) і АК8 (2) при температурі вальцювання t = 470°C від коефіцієнта форми  $l_{\rm d}/h_{\rm cp}$ . Поправочний коефіцієнт

$$K_{\sigma} = n_{\sigma} n_B \tag{2.25}$$

враховує напружений стан металу, що деформується, і вплив ширини заготовки на питомий тиск. Ширина заготовки для усіх експериментів однакова (60 мм) і на різницю у величині К<sub>о</sub> впливає тільки напружений стан, тому

$$K_{\sigma A K 6} - K_{\sigma A K 8} = \frac{\sigma_B / \sigma_{0,2}}{\sigma'_B / \sigma'_{0,2}} (tg\alpha - tg\alpha_1), \qquad (2.26)$$

де  $\sigma_B, \sigma'_B$  – границі міцності та  $\sigma_{0,2}, \sigma'_{0,2}$  – границі текучості для сплавів АК6 та АК8 відповідно,  $\alpha$  і  $\alpha_1$  – кути між горизонтальною віссю та залежністю  $\sigma_{0,2} = f(l_{\rm A}/h_{\rm cp})$ . Маючи значення базисного тиску для сплаву АК6 (рис. 2.7) границю текучості  $\sigma_{0,2}$  сплаву АК6 (рис. 2.9, 2.10) визначаємо за формулою  $K_{\sigma} = \frac{P_{cp.\delta}}{\sigma_{0,2}}$  величину поправочного коефіцієнта  $K_{\sigma}$  для сплаву АК6.

Потім за формулою (2.26) знаходимо  $K_{\sigma}$  для сплаву АК8, що дозволить розрахувати за формулою  $P_{cp.\delta.} = \sigma_{0,2} \cdot K_{\sigma}$  величину середнього базисного тиску для сплаву АК8 при температурах t = 420°C і 470 °C (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Базисний тиск при вальцюванні заготовок зі сплава АК8 при температурі: 1- 420°С; 2 - 470°С



Рисунок 2.12 – Опір деформації в поперечному перерізі заготовки в кінці геометричного осередку деформації, МПа (сплав АК6, Ø14 x 150 мм, ступінь обтискання 50%). Температура нагріву вальцювальних штампів: а) 20 °C, б) 200 °C; в) 370 °C; г) 450 °C.

Для визначення розрахункових залежностей застосовувалася програма для моделювання технології об'ємного штампування "QForm" [63], розрахунки в якій проводяться за методом скінчених елементів. Програма дозволяє отримати дані НДС за зміною полів температур, ступені, швидкості і опору деформації залежно від температури нагріву штампів у поперечному перерізі заготовки.



Рисунок 2.13 – Опір деформації в поздовжньому перерізі заготовки в осередку деформації (сплав АК6, Ø14х150 мм, ступінь обтискання 50%), МПа.

Температура нагріву вальцювальних штампів: а) 20 °С, б) 450 °С.

При температурі вальцювальних штампів нижче 200 °С опір деформації заготовки в місці контакту з штампами більше, ніж в її центральній частині (рис. 2.14). З аналізу рис. 2.14, 2.15, видно, що опір деформації заготовки після виходу з осередку деформації нижче у заготовок, що виготовляються в нагрітих штампах.



Рисунок 2.14 – Залежність опору деформації в: середині заготовки (1); місці контакту заготовки з валками (2); у позаконтактних зонах (3) від температури нагріву вальцювальних штампів в поперечному перерізі середини геометричного осередку деформації.



Рисунок 2.15 – Залежність опору деформації на вході (1) і на виході з осередку деформації (2) від температури нагріву вальцювальних штампів в поперечному перерізі середини геометричного осередку деформації.

Під впливом нагрівання вальцювальних штампів, опір деформації металу в місці контакту з інструментом значно знижується і стає менше, ніж в середині заготовки і позаконтактних зонах. Цим пояснюється зменшення зусиль, що витрачаються на деформування, а також, що метал краще тече в поздовжньому напрямі, чим в поперечному, де вищий опір деформації в позаконтактних зонах

### 2.4 Пластичність алюмінієвих сплавів при холодному деформуванні

Одним з найбільш розповсюджених способів визначення характеристик пластичності металів є випробування зразків на розтяг (ГОСТ 1497-73). При стандартних випробуваннях фіксують відносне подовження  $\delta$  і відносне звуження  $\psi_{\rm III}$  зразків. При оцінці деформовності металів в процесах обробки тиском використовують криві граничних деформацій, в яких за міру пластичності приймають накопичену до моменту руйнування пластичну деформацію  $e_* = e_u(t = t_*), \ e_u(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u(\tau) d\tau$ , де  $\dot{\varepsilon}_u$ - інтенсивність швидкостей деформації;  $t (0 \le t < t_*), \tau (0 \le \tau \le t) - час$ ;  $t_*$  – час деформування до руйнування.

При простому деформуванні, коли зберігається знак головних деформацій і сталість положення головних осей відносно матеріальних волокон, накопичена деформація дорівнює інтенсивності логарифмічних деформацій (1.22) [48].

Під кривою граничних деформацій металу розуміють залежність  $e_* = e_*(\eta)$ , що отримана за умови простого або стаціонарного деформування (при якому  $\beta_{ij}(e_u) = const$ ,  $\eta(\varepsilon_u) = const$ ,  $\mu_{\sigma}(\varepsilon_u) = const$ , де  $\beta_{ij}$  – напрямний тензор приростів деформацій,  $\eta$  – показник напруженого стану,  $I_1(T_{\sigma})$  і  $I_2(D_{\sigma})$  – перший інваріант тензора і другий інваріант девіатора напружень,  $\mu_{\sigma}$  – параметр Надаї-Лоде) [52].

Проблеми дослідження пластичності металів обумовлюються тим, що наразі не розроблений комплекс способів побудови «єдиної» кривої граничних

деформацій. Складнощі полягають у тому, що при традиційних способах дослідження зразків на розтяг у переважній більшості випадків неможливо забезпечити сталість їх напруженого стану протягом всього процесу деформування внаслідок появи на певній стадії розтягу шийки. Втрата стійкості деформування при розтязі у вигляді утворення шийки порушує сталість значень показників напруженого стану та приводить до «аномального» підвищення пластичності металів у порівнянні з більш жорсткими схемами напруженого стану.

Для забезпечення сталості показників напруженого стану і рівномірності розподілу НДС в деформованій частині зразка при побудові кривих граничних деформацій в роботі [1] запропоновані різні способи випробування металів на пластичність. За результатами дослідження зразків на стиск, кручення, роздавання кільцевих зразків з різних металів та з використанням апроксимацій кривих граничних деформацій були отримані розрахункові значення граничної деформації  $e_*(\eta = +1)$  при одновісному розтязі. Встановлено, що розходження між експериментальними та розрахунковими значеннями граничної деформації при розтягуванні  $\Delta e_*$  залежить від параметру кривизни шийки  $R / d_u$ , тобто від відношення радіуса кривизни шийки R до її діаметру d<sub>w</sub>. Із зменшенням параметра кривизни шийки до значень  $R / d_{\mu} = 0.5$  розходження значень граничних деформацій сягало  $\Delta e_* \ge 0.5$ , що для низки металів перевищувало відносне відхилення 100%. Все це свідчить про неможливість використовувати значення пластичності металів, що отримані за результатами розтягу циліндричних зразків, при оцінці деформовності металів в процесах обробки тиском.

У роботі [64] розглянуто спосіб прокатки зразків на клин. Спосіб передбачає прокатку зразків прямокутного або складно профільованого поперечного перерізу на двохвалковому стані. Для реалізації поданого способу необхідне спеціальне прокатне обладнання, при цьому складно реалізованими є прокатка на клин та забезпечення постійності показника напруженого стану. Тому прокатка на клин не знайшла широкого застосування для встановлення пластичності металів.

На сьогодні проблема отримання експериментальних значень граничної деформації в умовах близьких до одновісного розтягу залишається не вирішеною.

Для аналізу напружено-деформованого стану вільної поверхні заготовки використовувався спеціалізований інженерний програмний комплекс DEFORM 3D [65], який дозволяє моделювати процеси ОМТ (кування, штампування, прокат, пресування та ін.).

У результаті використання комбінованої методики імітаційного та експериментально-аналітичного моделювання при вальцюванні, проведеного в програмному комплексі [66], було з'ясовано, що моделювання процесу вальцювання вихідних циліндричних заготовок між гладкими циліндричними валками забезпечує стабільність показника напруженого стану на бічній поверхні зразка впродовж всього процесу вальцювання. Таким чином, підвищення точності визначення пластичності при напруженому стані, що відповідає одновісному розтягу, за рахунок запобігання втраті стійкості деформування зразка у вигляді утворення шийки та забезпечення сталості значень показників напруженого стану протягом всього процесу випробування, можна забезпечити шляхом вальцювання заготовок до руйнування.

Відповідно до зазначеного нами був розроблений спосіб [67], на який отримано патент на корисну модель та згідно з яким деформування вільної бічної поверхні циліндричного зразка в умовах одновісного розтягу відбувається при його вальцюванні валками, а збільшення ступеня деформації та доведення матеріалу до руйнування забезпечується внаслідок зростання радіусів валків по мірі вальцювання та деформуванням зразка на клин.

На рис. 2.16 показано вальцювання зразка на клин валками, радіуси яких зростають по мірі вальцювання зразка. Спосіб здійснюється наступним чином. Дослідний циліндричний зразок 1, з нанесеною на його бічну поверхню подільною сіткою, закріплюється в утримувачі 3 і поблизу утримувача

обтискується валками 2 при найменших радіусах їх поперечних перерізів. Вмикається обертання валків і здійснюється вальцювання заготовки на клин внаслідок зростання радіуса валків. Пластичність визначається за величиною деформації в момент появи тріщин на вільній поверхні зразка.



б)
 Рисунок 2.16 – Схематичне зображення процесу вальцювання на клин а);
 переріз деформованої заготовки; б) Б – поверхня контролю за деформаціями і руйнуванням

У випадку необхідності отримання за одне випробування двох значень пластичності металу при різних (але постійних в процесі деформування) показниках напруженого стану  $\eta$ , здійснюють вальцювання на клин криволінійного зразка. Для цього вальцювання проводять конічними валками, радіуси яких зростають по мірі вальцювання зразка. При цьому менше здеформована внутрішня бічна поверхня зразка матиме менше значення показника  $\eta$ , а більше здеформована зовнішня поверхня зразка матиме більше значення показника  $\eta$  (рис. 2.17).

Таким чином, описаний спосіб забезпечує можливість випробовування циліндричних зразків при сталому напруженому стані в процесі деформування та отримання двох значень пластичності за одне випробування при різних постійних значеннях показника напруженого стану.



Рисунок 2.17 – Шляхи деформування точки зовнішньої 1 та внутрішньої 2 вільних бічних поверхонь заготовки

Побудовані за приведеною методикою, включаючи визначення пластичності вальцюванням, діаграми пластичності низки алюмінієвих сплавів наведені на рис. 2.18.



Рисунок 2.18 – Діаграми пластичності алюмінієвих сплавів (3) та шляхи деформування точок заготовки на зовнішній (1) і на внутрішній (2) поверхнях циліндричного зразка

Слід відзначити, що можливі неточності відображення залежності пластичності від схеми напруженого стану, при використанні плоских діаграм пластичності, характерні більше для ділянок всестороннього стиску, де небезпека руйнування металів у технологічних процесах не є основним обмежувальним фактором. Крім того, в більшості критеріїв деформовності підінтегральна функція містить модель залежності граничної деформації  $e_*$  від показника  $\eta$ . Тому найбільшого розповсюдження при дослідженні залежності пластичності віл схеми напруженого стану отримали саме ліаграми пластичності в координатах  $e_* = e_*(\eta)$ . При цьому проблемними залишаються протиріччя значень пластичності, отриманих при різних видах випробовувань. Тому запропоновані нами визначення пластичності металу в умовах одновісного розтягу без втрати стійкості деформування є певним вирішенням відзначених протиріч.

#### Висновки до розділу 2

1. Алюмінієві сплави є основними конструкційними матеріалами, що мають високі характеристики міцності, задовільну пластичність і термомеханічні характеристики, які і визначають способи виробництва з них деталей – ливарне, обробку тиском і обробку різанням. Приведена класифікація за міцністю і пластичністю, а також фізичні властивості алюмінієвих сплавів, що підлягають деформуванню, дозволяють обґрунтовано обирати процеси холодного чи гарячого вальцювання для виробництва необхідних деталей;

2. Розглянуто ефект зміцнення алюмінієвих сплавів при холодному деформуванні та методи побудови кривих зміцнення. Наведені побудовані криві зміцнення алюмінієвих сплавів АМц, АД1, АД31 при холодному деформуванні, а також наведені криві деформаційного зміцнення алюмінієвих сплавів АК6, АК8, АМг3 при гарячому деформуванні;

3. Досліджено для алюмінієвих сплавів: базисний тиск при вальцюванні заготовок; залежність опору деформації в осередку деформації від температури

нагріву вальцювальних штампів; механічні властивості вальцьованих заготовок і штамповок;

4. Розглянута пластичність алюмінієвих сплавів при холодному деформуванні та проблеми дослідження пластичності металів, що пов'язані з відсутністю способів побудови «єдиної» кривої граничних деформацій через утворення шийки при розтягу зразків та «аномального» підвищення пластичності. Розроблено спосіб вальцювання циліндричного зразка на клин валками, радіуси яких зростають в процесі вальцювання. Спосіб забезпечує можливість випробування циліндричних зразків при сталому напруженому стані та дозволяє отримувати значення пластичності в умовах одновісного розтягу. З використанням цього способу побудовано діаграми пластичності низки алюмінієвих сплавів.

5. Матеріали дослідження, які викладені в цьому розділі, опубліковані в роботах [58], [66], [67].

# РОЗДІЛ З ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ І ТЕРМІЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ВАЛЬЦЮВАННІ КРУГЛИХ ЗАГОТОВОК З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

3.1 Дослідження впливу технологічних факторів і параметрів термосилового навантаження в процесах вальцювання на характер розподілу полів температур і термічних деформацій в пластичній зоні заготовки

Метою дослідження є визначення впливу технологічних факторів і параметрів термосилового навантаження в процесах вальцювання на характер розподілу полів температур, термічних деформацій в зоні деформування сплаву АК6 при гарячому вальцюванні та визначення термічної складової коефіцієнтів нерівномірності розподілу деформацій.

За об'єкт дослідження вибрано технологічний процес вальцювання заготовок Ø 25, 35, 50, 65 мм із алюмінієвого сплаву АК6 за схемами "круговал", "овал-ромб", "ромб-квадрат", "овал-квадрат" у валках з робочим радіусом  $R_p = 66,5$  мм, проміжок між валками 1,0 мм, частота обертання валків 26 хв<sup>-1</sup>. Заготовки нагрівалися в електропечі опору до температури  $T_3 = 450^{\circ}C$ . Матеріал вальцювального штампу – сталь 5ХНВ. Швидкість переміщення заготовок у валках складала v = 0,257 м/с, тривалість вальцювання t = 0,58 с. Шорсткість вихідної заготовки  $h_a = 6,3$  мкм, шорсткість поверхні рівчаків вальцювальних штампів  $h_m = 3,2 - 0,8$  мкм. Коефіцієнт тертя між заготовкою і поверхнею штампів  $\mu = 0,5 - 0,35$  [68].

До основних завдань дослідження належать :

 розроблення математичної моделі процесів теплообміну, тепломасоперенесення і деформованого стану нагрітих заготовок при вальцюванні за схемами "круг-овал", "овал-ромб", "ромб-квадрат", "овалквадрат";  розроблення автоматизованого алгоритму рішення нестаціонарної нелінійної задачі тепломасоперенесення і термопружності в середовищі програми ANSYS[69];

 побудова об'ємних геометричних і дискретних моделей осередку деформації вальцьованих заготовок;

 проведення обчислювального експерименту для різних технологічних режимів вальцювання. Знаходження полів температур і термічних деформацій вздовж і поперек осередку деформування;

– визначення термічної складової коефіцієнтів нерівномірності деформацій в поперечному і поздовжньому напрямі  $K_p^T$  і  $K_e^T$ ;

– побудова графічних залежностей  $K_p$  і  $K_e$  від геометричних параметрів вальцювання  $i = \frac{R_{\kappa}}{R}$ .

### 3.1.1 Розроблення математичних моделей досліджуваних процесів

Для дослідження процесів теплообміну, тепломасоперенесення і термічних деформацій розроблені математичні моделі:

конвективного і променистого теплообміну між поверхнею нагрітої заготовки і довкіллям ;

– контактного теплообміну між нагрітою заготовкою і елементами вальцювального устаткування в процесі деформування;

 нелінійного тепломасоперенесення – кондуктивного і дифузійного перенесення тепла в об'ємі заготовок при вальцюванні на кувальних вальцях за схемами "круг-овал", "овал-ромб", "ромб-квадрат", "овал-квадрат";

– квазістаціонарного деформованого стану при термічному навантаженні моделей об'ємів круглих заготовок з алюмінієвого сплаву АК6, нагрітих до температури 450°С, з урахуванням гіпотези про нестискуваність матеріалу.

Для розроблених математичних моделей осередку деформування заготовок теплофізичні і термомеханічні властивості сплаву АК6 і матеріалу штампу 5ХНВ взяті за даними роботи [6] і застосовані для обчислення граничних умов, а також ідентифікації ізотропних і однорідних фізикомеханічних властивостей моделі матеріалу.

Основні чинники, що впливають на нестаціонарні нелінійні процеси теплопередачі нагрітої в електропечі заготовки з довкіллям при вальцюванні, визначені конвективним і променистим теплообміном з повітряним простором, а також контактним теплообміном з поверхнею вальцювального штампу. В результаті пластичного деформування нагрітого металу, частина витраченої енергії перетворюється на тепло, інша частина залишається в металі у вигляді потенційної енергії. Також відбувається нагрів металу, викликаний роботою поверхневих сил тертя.

Для математичного опису теплообміну між рухливими тілами в процесі деформування основною складністю є визначення закономірностей зміни параметрів тепловіддачі, контактного теплообміну, величин джерел генерації тепла від поверхневих сил тертя і швидкостей пластичного деформування.

Нагрів металу, викликаний роботою поверхневих сил тертя між валком і металом представили як результат проходження через поверхню заготовки теплового потоку  $q_{_{TP}}(S_K)$ , який неоднорідно розподілений на контактній поверхні  $S_K$  [70]. Закон розподілу теплового потоку на контактній поверхні заготовки залежить від його апроксимації для вибраних зон її дискретизації,  $S_K = \bigcup_i S_K^i$ . Вважали, що на кожній з них величини  $q_{_{TP}}(S_K^i)$  залежать від питомого тиску валків на заготовку і завжди можуть бути визначені чисельно.

Тепловий потік на поверхні заготовки, викликаний роботою проти зовнішніх сил тертя, визначали за формулою

$$q_{TP}(S_K^i) = \upsilon_f \cdot \mu_f \cdot p(S_K^i), \qquad (3.1)$$

де  $\upsilon_f$  – відносна середня швидкість поступального руху поверхні заготовки при вальцюванні;  $\mu_f$  – коефіцієнт тертя;  $p(S_K^i)$  – опір металу деформуванню на і-й ділянці контактної поверхні  $S_K^i$ .

Математична постановка відповідних крайових задач (математична модель) для досліджуваних термомеханічних процесів в суцільних середовищах приведена в роботах [71-74].

Закон збереження маси при тисках менших 10<sup>4</sup> МПа вважаємо таким, що виконується автоматично [73]

$$\rho = \rho_0. \tag{3.2}$$

Рівняння збереження імпульсу матеріального континууму (рівняння рівноваги)

$$\rho \dot{\upsilon} = \nabla \cdot \sigma + f . \tag{3.3}$$

Рівняння тепломасоперенесення [74] для матеріальних середовищ

$$\rho c_p \left( \dot{T} + \nabla T \cdot \upsilon \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_T + tr(\sigma \cdot \dot{\varepsilon}^p), \qquad (3.4)$$

де  $\rho$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>; t – час, с;  $\upsilon$  – швидкість, м/с ; T – температура, град;  $\nabla T$  – градієнт температур, град/м;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·град;  $c_P$  – питома теплоємність, Дж/м<sup>3</sup>;  $Q_T$  – теплове джерело, Вт/м<sup>3</sup>.

Кінематичні співвідношення у формі рівнянь Коші

$$\boldsymbol{\psi} = \dot{\boldsymbol{\chi}} = \dot{\boldsymbol{\psi}}, \quad \boldsymbol{d} = \frac{1}{2} \left( \boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{\psi}^T \right), \quad \boldsymbol{d} = \left( \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^t \right). \tag{3.5}$$

Визначальні (фізичні) рівняння [71,75]

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\tilde{D}}^{e} \cdot \boldsymbol{d} + \boldsymbol{\tilde{B}}_{T} \boldsymbol{T}, \ \boldsymbol{q} = \boldsymbol{\lambda} \nabla \boldsymbol{T}.$$
(3.6)

Разом з рівняннями (3.1) – (3.5), математична постановка задачі вимагає формулювання крайових (граничних і початкових) умов.

Нехай в поточний момент часу *t* визначається термомеханічний стан в кусково-однорідному середовищі (тобто представленою сумою однорідних об'єктів). Тоді відповідно до фізичної природи досліджуваних явищ і даних про агрегатний стан речовини визначимо такі ділянки дослідження:

а) для теплових процесів:  $V_T^l = \bigcup_{k=1}^{N_T \leq N} V_{T_k}^l$  із зовнішньою межею

$$S_T^l = S_{T_1}^l \bigcup S_{T_2}^l \bigcup S_{T_3}^l;$$

б) для механічних процесів:  $V_T^l = \bigcup_{k=1}^{N_M \le N} V_{M_k}^l$  із зовнішньою межею

 $S_{M}^{l} = S_{M_{1}}^{l} \bigcup S_{M_{2}}^{l} \bigcup S_{M_{3}}^{l};$ 

Вважаємо, що на ділянках відсутня повна взаємозв'язність задач з теплового та напружено-деформованого стану взаємодіючих тіл. Зв'язки напружено-деформованого і теплового станів – на  $S_{TM}$  і в  $V_{TM}$  враховуються заданням відповідних величин об'ємних і поверхневих джерел, граничних умов для функцій і потоків, а також врахуванням залежностей фізико-механічних властивостей середовищ від температури.

При формулюванні теплових граничних умов для широкого класу техніко-технологічних функцій потрібно врахування радіаційного випромінювання, природньої та вимушеної конвекції, контактного теплообміну взаємодіючих тіл. Спрощення можливі тільки після аналізу впливу перерахованих чинників на тепловий, а отже, і напружено-деформований стан зазначеного середовища. Загальна форма подання теплових граничних умов на досліджуваному тимчасовому діапазоні  $t \in [0, t^2]$  розв'язку задачі тепломасоперенесення визначається заданням:

1) температури (першого роду)

$$T = T_c(r, t), r \in S_{T_1};$$
 (3.7)

2) теплового потоку (другого роду)

$$\lambda \nabla T \cdot \underline{n} = q_c(\underline{r}, t), \underline{r} \in S_{T_2}; \qquad (3.8)$$

3) конвективного та радіаційного теплообміну (у формі третього роду)

$$\lambda \nabla T \cdot n - \left(h_n(r,t) + h_n^p(r,t)\right) \left(T - T_c\right) = \overline{Q},$$
  

$$h_n^p(r,t) = \sigma \xi \left(T + T_c\right) \left(T^2 + T_c^2\right), \quad r \in S_T$$
(3.9)

У співвідношеннях (3.2) – (3.9) введені позначення:  $T_c$  – температура зовнішнього середовища, t – час,  $q_c$  – тепловий потік на зовнішній поверхні взаємодіючих тіл,  $h_n$  – коефіцієнт тепловіддачі для конвективного теплообміну,  $h_n^p$  – еквівалентний коефіцієнт тепловіддачі для радіаційного теплообміну,  $\xi$  – міра чорноти тіла, R – коефіциент термоопору,  $Q^s$  – тепловий потік на контактній поверхні взаємодіючих тіл, n – вектор нормалі в точці на контактній поверхні  $M_T \in S_T$ ;

Механічні граничні умови у момент часу визначаються:

- швидкостями зміщень (кінематичні умови)

- розподілом поверхневих зусиль (статичні умови)

$$\left(\underline{\sigma} + \underline{t}_{M} - \underline{t}_{MC}\right) \cdot \underline{n} = \underline{p}^{*}(\underline{r}, t), \quad \underline{r} \in S_{M_{2}}; \quad (3.11)$$

- взаємодоповнюючими компонентами векторів швидкостей зміщень (3.10) і поверхневих зусиль (3.11) на *S*<sub>*M*<sub>3</sub></sub> (змішані умови).

У (3.10, 3.11) введені позначення:  $v_{*}^{*}$  – вектор швидкостей зміщень,  $p_{*}^{*}$  – вектор зусиль;  $n_{*}$  – вектор зовнішньої нормалі в точці на зовнішній поверхні тіла.

В якості початкових (при  $t = t_0$ ) приймаємо умови, які відповідають початковому рівноважному стану відповідної системи

$$\underline{u} = \underline{u}_0, \quad \underline{v} = \underline{v}_0, \quad T = T_0. \tag{3.12}$$

Надалі вважаємо, що приведені крайові умови забезпечують єдиність розв'язку системи рівнянь гіперболо-параболічного типу (3.2) – (3.12) для прийнятої моделі нелінійних термомеханічних процесів в тілах, подібних до металу. Доцільність вибору конкретного варіанту системи дозвільних функцій визначається специфікою даного завдання і потребою максимального спрощення математичної постановки.

В якості дозвільних функцій можна прийняти, зокрема, вектори переміщення <u>u</u> і температуру *T*. При цьому дозвільну систему складають з рівнянь (3.2) – (3.12), записаних відносно функцій <u>u</u>, *T*.

При розгляді окремих випадків термомеханічного стану дозвільні рівняння допускають спрощення. Для дискретизації функцій неізотермічного нестаціонарного стану матеріального континууму, що деформується, застосовуються проекційно-сіткові методи: скінчених елементів і кінцевих різниць.

### 3.1.2 Алгоритм проведення обчислювального експерименту

Обчислювальний експеримент з визначення нестаціонарних теплових процесів і термічних деформацій при формозміні різних моделей об'ємів заготовок, нагрітих до температур 450°С, при вальцюванні проведений із застосуванням розробленого алгоритму (додаток Б) автоматизованого розрахунку в універсальній програмній системі скінчено-елементного аналізу ANSYS [69], яка використовується для розв'язання лінійних та нелінійних, стаціонарних та нестаціонарних просторових задач механіки деформовного твердого тіла, механіки конструкцій, задач механіки рідини та газу, теплопередачі та теплообміну, електродинаміки, акустики, а також механіки пов'язаних полів.

Для проведення обчислювального експерименту здійснювали виконання наступних етапів розрахунку.

1. Створення геометричної моделі зони деформації заготовки.

2. Створення дискретної моделі зони деформації заготовки.

3. Створення розрахункової моделі зони деформації вальцьованої заготовки на основі наступних початкових даних:

1) фізико-механічних властивостей (E – модуль Юнга,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона,  $\rho$  – щільність матеріалу,  $C_p$  – теплоємність матеріалу,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\alpha$  – термічна провідність контакту).

параметрів конвективного теплообміну (α – коефіцієнт теплопровідності, T<sub>cp</sub> – температура середовища).

 3) параметрів контактного теплообміну в парі «штамп-заготовка» (R– коефіцієнт термоопору, T<sub>u</sub> – температура штампу).
 4) параметрів теплогенерації за рахунок сил тертя на контактній поверхні заготовки (µ – коефіцієнт тертя, S – площа контактної поверхні, P – зусилля в штампах).

 5) параметрів теплогенерації за рахунок об'ємної пластичної деформації (ξ– швидкість пластичної деформації, σ – напруження).

6) кінематичних обмежень на контактних поверхнях.

7) початкових умов ( $T_0$  – початкова температура заготовки).

4. Проведення чисельних розрахунків:

 розв'язання задачі нестаціонарного нелінійного тепломасоперенесення (визначення сталого температурного стану зони деформації заготовки);

2) розв'язання задачі термопружності (визначення термічних деформацій з урахуванням гіпотези про нестисливість матеріалу).

4. Обробка результатів обчислювального експерименту:

 - знаходження полів температур і термічних деформацій вздовж і поперек осередку деформування;

– визначення термічної складової коефіцієнтів нерівномірності деформацій в поперечному і поздовжньому напрямі  $K_p^T$  і  $K_g^T$ .

3.1.3 Розроблення методики і дослідження процесів теплообміну, теплового стану, термічних деформацій і переміщень в зоні деформування при вальцюванні нагрітої заготовки

Для проведення розрахунково-теоретичного дослідження процесів теплообміну, теплового і деформованого стану в парі «заготовка – вальцювальні штампи» використовували теорію подібності, аналітичні методи теорії теплообміну для вільної конвекції, напіваналітичні методи контактної теплопередачі, теорію тепломасоперенесення, рівняння Навьє-Стокса [75] і квазістатичного завдання термопружності.

Для розв'язання вказаних завдань розроблено низку імітаційних моделей нестаціонарних нелінійних процесів різної фізичної природи для зони деформованої вальцьованої заготовки в умовах контактної взаємодії з вальцювальними штампами кувальних валків.

При вальцюванні по мірі обертання валків заготовка переміщається уздовж поздовжньої осі і деформації безперервно піддається її невеликий об'єм (осередок деформації) між вальцювальними штампами. Осередок деформації характеризується геометричними розмірами (перерізи заготовки при вході у валки та виходу з валків), а також умовами вальцювання: вибраним профілем штампу, швидкістю деформації, мірою обтискання, коефіцієнтом тертя на контактній поверхні.

Розрахунково-теоретичне дослідження умов нестаціонарного теплообміну і теплопередачі, течії нагрітого металу, теплового стану і температурного деформування проведено для сформованих геометричних моделей вальцьованих заготовок при різних схемах вальцювання (табл. 3.1 – 3.4).

Діаметр заготовки	<i>b, мм</i>	һ, мм	ґ, мм
25	28,00	13,00	66,50
35	43,00	21,50	26,85
50	70,00	20,00	66,20
65	81,00	26,00	67,75

Таблиця 3.1 – Геометричні параметри калібрів типу "круг – овал"

Таблиця 3.2 – Геометричні параметри калібрів типу "овал – ромб"

Діаметр заготовки	l,мм	b, мм	һ, мм	ґ, мм
25	40,02	29,00	14,50	3,00
35	46,72	40,86	20,43	4,54
50	55,05	87,50	29,14	6,50
65	167,22	66,50	24,00	5,34

Таблиця 3.3 – Геометричні параметри калібрів типу "овал – квадрат"

Діаметр заготовки	һ, мм	С, ММ	ґ, <i>М</i> М
25	25,55	18,20	3,60
35	36,02	25,55	5,11
50	51,50	36,54	7,00

Діаметр заготовки	h, мм	l, мм	ľ, ММ
25	21,80	28,87	3,00
35	26,90	65,00	4,30
50	48,70	81,00	6,20
65	27,40	247,00	5,00

Таблиця 3.4 – Геометричні параметри калібрів типу "ромб – квадрат"

Для знаходження нестаціонарних нелінійних полів температур в осередку деформації використовували тип кінцевого елементу SOLID70, тип вирішувача – THERMAL. Поле термічних деформацій металу в зоні деформування, що виникає під дією термічних градієнтів, знаходили за допомогою вирішувача STRUCTURAL. Об'ємні твердотільні дискретні тривимірні моделі побудовані за допомогою програмного комплексу SolidWorks [76] і експортовані в ANSYS. Побудову розрахункової моделі здійснено на основі застосування методу скінченних елементів [77]. Матеріал заготовки представлений моделлю алюмінієвого сплаву АК-6 з однорідними ізотропними теплофізичними і термомеханічними властивостями. Моделі були розбиті на 100-150 тис. кінцевих елементів (рис.3.1).



Рисунок 3.1 – Об'ємні геометрична – а) і дискретна – б) моделі осередку деформації заготовки в процесі вальцювання

Така розбивка забезпечує необхідну точність відтворення геометрії і розв'язання завдання. Для досягнення поставленої мети використовувалися чисельні методи аналізу теплових і термомеханічних полів, статистичні методи

обробки розрахункових даних, графічні методи відображення числової інформації результатів розрахунків. Обробка результатів розрахунків здійснена із застосуванням програми MathCAD [78].

3.2 Дослідження процесу теплообміну між нагрітою заготовкою, калібром вальцювального штампу і довкіллям

3.2.1 Оцінка основних чинників, що впливають на теплообмін нагрітої заготовки з довкіллям і калібром вальцювального штампу

Гаряча заготовка після її виїмки з печі та в процесі вальцювання підлягає різним видам теплообміну, а саме: конвективному і променистому з довкіллям (повітряним простором), а також контактному з поверхнею калібру вальцювального штампу.

За наявності усіх вказаних вище видів теплообміну сумарний коефіцієнт тепловіддачі дорівнюватиме [79]

$$\alpha_{cym} = \alpha_{\kappa H} + \alpha_{np} + \alpha_{\kappa m}, \qquad (3.13)$$

де *α<sub>кн</sub>*, *α<sub>np</sub>*, *α<sub>кm</sub>* – відповідно коефіцієнти тепловіддачі конвекцією, випромінюванням і шляхом контакту.

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією  $\alpha_{\kappa H}$  використані співвідношення теорії подібності, приведені в роботі К. Баммерта [80]: для ламінарного режиму

$$N_u = 0.81 R e^{0.5}, (3.14)$$

де  $N_u$  – критерій Нуссельта;  $\text{Re} = \frac{wl}{v} = \frac{0,25 \cdot 0,15}{15,55 \cdot 10^{-6}} = 2,363 \cdot 10^3$  – критерій

Рейнольдса; *w* – швидкість руху тіла, м/с; v – кінематична в'язкість середовища (повітря), м<sup>2</sup>/ с; *l* – довжина тіла (заготовки), м.

Тоді

$$Nu = 0.81 \cdot (2.363 \cdot 10^3)^{0.5} = 39.37$$
.

Оскільки

$$Nu = \frac{\alpha_{_{\kappa_{H}}}l}{\lambda},$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності середовища (повітря), Вт/(м<sup>2.</sup> °C); то

$$\alpha_{\kappa H} = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{39,37 \cdot 26,36 \cdot 10^{-2}}{0,15} = 6,92 \text{ , BT/(M}^{2} \text{ °C})$$
(3.15)

Величини параметрів в (3.14) приймали для швидкості переміщення заготовки у валках υ<sub>3</sub> = 0,257 м/с. Для обчислень коефіцієнти кінематичної в'язкості v і теплопровідності λ взяті при температурі повітря 25°С.

Коефіцієнт променистого теплообміну визначається за рівнянням

$$\alpha_{np} = \frac{\xi \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T_3}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{T_3 - T_c}, \qquad (3.16)$$

де  $C_0 = 5.7 \text{ Br/m}^2 \text{K}^4$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;  $\xi = 0.15$  – ступінь чорноти матеріалу стін приміщення.

Обчислимо

$$\alpha_{np} = \frac{0,15 \cdot 5,7 \left[ \left( \frac{450 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{25 + 273}{100} \right)^4 \right]}{450 - 25} = 5,34, \text{Bt/(m}^2 \cdot \text{°C}). \quad (3.17)$$

Отже,

$$\alpha_c = \alpha_\kappa + \alpha_{np} = 6,95 + 5,34 = 12,26 \text{ , BT/(M2.oC)}.$$
 (3.18)

Площа поверхні вальцьованої заготовки

$$S_3 = \pi dl = 3.14 \cdot 0.025 \cdot 0.15 = 11.775 \cdot 10^{-3}, \,\mathrm{M}^2.$$
 (3.19)

Тоді тепловий потік від заготовки в довкілля обчислюється за формулою

$$Q_3 = \alpha_c S_3 (t_3 - t_c) = 12,26 \cdot 11,775 \cdot 10^{-3} (450 - 25) = 61,35 \text{ ,BT.}$$
(3.20)

Швидкість зниження температури заготовки за рахунок охолодження під час паузи складе

$$\Delta T = \frac{Q_3}{G \cdot C_p}, \frac{{}^{\circ}C}{c}, \qquad (3.21)$$

де G=0,202 кг – маса заготовки із сплаву АК-6 (густина  $\rho$ =2,75 г/см<sup>3</sup>),  $C_p = 1 \cdot 10^3$ , Дж/(кг·°С) – теплоємність сплаву АК-6.

Підставляючи, отримаємо

$$\Delta T = \frac{61,35}{0,202 \cdot 1 \cdot 10^3} = 0,3, \frac{^{\circ}\text{C}}{^{\circ}\text{C}}$$
(3.22)

Перенесення нагрітої заготовки від печі до валків триває близько 2с. За цей час заготовка охолоджується навколишнім повітрям, що має температуру +25°С шляхом конвективного і променистого теплообміну. При паузі t=2 с охолодження складе 0,6 °C, що несуттєво.

Контактний теплообмін у парі "заготовка – вальцювальні штампи" визначали з фізичної моделі побудови контактного теплообміну, розробленої Ю.П. Шликовим і Е.А. Ганіним [80] та побудованої на гіпотезі відмінності номінальної і фактичної поверхні контакту внаслідок присутності мікрошорсткостей. Проміжки між мікрошорсткостями зазвичай заповнені повітрям, що створює термічний опір, через який проходить частина теплового потоку. Друга частина потоку проходить через плями фактичного контакту, а
третя – утворюється за рахунок променистого теплообміну в проміжках між контактуючими тілами, проте вона набуває практичного значення при температурах не менше 450°С. Тепловий потік через зону контакту стикається з контактним опором, який обумовлює певний перепад температур  $\Delta T$ , що зменшується при зростанні зусилля вальцювання.

Нехтуючи променистою складовою теплового потоку загальний термічний опір контактної зони надано у вигляді

$$R_{\kappa} = R_{M} + R_{c}, \qquad (3.23)$$

де  $R_{\rm M}$  – термічний опір фактичного (металевого) контакту;  $R_c$  – термічний опір газового прошарку. Аналогічні співвідношення справедливі для термічної провідності контактуючих матеріалів

$$\alpha_{KT} = \alpha_M + \alpha_C. \tag{3.24}$$

Термічний опір газового прошарку може бути визначений з виразу

$$R_c = \frac{\delta_{e\kappa\theta}}{\lambda_c},\tag{3.25}$$

де  $\delta_{e\kappa B} = V_c/S_c$  – еквівалентна товщина газового прошарку, м;  $V_c$  – об'єм газового середовища в зоні контакту, м<sup>3</sup>;  $S_c$  – номінальна (контурна) площа контакту, м<sup>2</sup>,  $\lambda_c$  – коефіцієнт теплопровідності газового середовища, Вт/(м<sup>2</sup>.°C).

Термічний опір спряжених тіл при середній чистоті обробки контактуючих матеріалів практично [74] визначено постійною величиною

$$R_{c} = R_{c_{1}} + R_{c_{2}} \approx \frac{h_{MAKC_{1}} + h_{MAKC_{2}}}{2\lambda_{c}},$$
(3.26)

де  $h_{{}_{Makc_1}}$  и  $h_{{}_{Makc_2}}$  –висота шорсткостей контактуючих поверхонь, мкм.

При однаковій чистоті обробки обох поверхонь маємо

$$R_c \approx \frac{h_{\text{MAKC}}}{\lambda_c}.$$
(3.27)

110

Для визначення термічної провідності фактичного контакту вальцьованої заготовки з рівчаком штампу використовується рівняння

$$\alpha_{\rm KT} = \frac{2\lambda_{\rm c}}{h_{\rm cp_1} + h_{\rm cp_2}} + 2,1 \frac{N\overline{\lambda_{\rm M}}}{3,5\sigma_{\rm B}S_{\rm H}} \cdot 10^4, \frac{\rm B_{\rm T}}{\rm M^{2}\,{}^{\circ}\rm C},$$
(3.28)

де  $\overline{\lambda_{M}} = \frac{2\lambda_{M_1}\lambda_{M_2}}{\lambda_{M_1} + \lambda_{M_2}}$  – приведена теплопровідність контактуючих матеріалів.

Для розрахунку теплового стану на бічних поверхнях вальцьованої заготовки використовується коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_{c} = 12,26, \frac{B_{T}}{M^{2} \circ C}$$

$$(3.29)$$

Нагрів тіла, що деформується за рахунок енергії пластичної формозміни надали як результат дії об'ємно-розподіленого теплового джерела з постійною потужністю в поперечному перерізі заготовки. Це допущення можливе, якщо товщина тіла незначна. Середню по висоті тіла потужність теплових джерел визначали на підставі виразу роботи [70] для теплового ефекту за формулою

$$A_T = 0.93 p \cdot V \cdot ln \frac{h_0}{h_1}.$$
(3.30)

3.2.2 Дослідження впливу плівки оксиду алюмінію, якою вкрита заготовка, на її теплове поле

При вальцюванні на поверхні заготовок з алюмінієвих сплавів утворюється плівка оксиду алюмінію, тому проведена оцінка коефіцієнта теплопровідності та вплив плівки на розподіл температурного поля в осередку деформації. Термічні провідності середовища, фактичного металевого контакту і сумарна провідність контакту при вальцюванні в діапазоні температур штампу від 25 до 450 °C для двох варіантів коефіцієнтів теплопровідності заготовки із сплаву АК6 (покритої плівкою оксиду алюмінію та без плівки) розраховані та приведені в таблицях 3.5,3.6.

Отримані результати розрахунків теплового стану, деформацій і переміщень зони деформування вальцьованої заготовки без урахування плівки оксидів протягом часу від початку процесу до закінчення стабілізації теплового режиму системи «заготовка – вальцювальний штамп», надані на рис. 3.2 – 3.7, для заготовки № 6 (табл. 3.5).

На рис. 3.2 показані вектори швидкостей течії металу в осередку деформації заготовки в поздовжньому перерізі моделі осередку деформації. Як видно з рисунка, в результаті деформування заготовки в центральній її частині швидкості зростають приблизно в 2 рази (до 0,504 м/с) порівняно з периферійною.

На рис. 3.3 показано поле температур заготовки, яке має місце через дії сил тертя і пластичної деформації. Порівняно з початковою, температура по об'єму заготовки з урахуванням зазначених факторів зростає на величину від 0,5 до 4,3 °C.

Поле температур в осередку деформації для третьої заготовки (табл.3.5) показано на рис. 3.4. Максимальна різниця температур в ОД складає близько 128,5 °С.

Поле градієнта температури  $\frac{\partial t}{\partial n} = gradt$ , де n – відстань по нормалі між ізотермами зони деформації заготовки, показано на рис. 3.5. Максимальний градієнт температури дорівнює  $28059\frac{^{\circ}C}{_{M}}$  (28,059  $\frac{^{\circ}C}{_{MM}}$ ) вздовж осі заготовки. Теплові потоки, генеровані вальцьованою заготовкою в зоні деформації для цих же умов показані на рис. 3.6.

Таблиця 3.5 – Початкові умови для розрахунку теплового стану, деформацій та переміщень при вальцюванні заготовок зі сплаву АК 6  $(\lambda_{a_1} = 184 \frac{B_T}{M^2 \circ C})$  без оксидної плівки

Номер вальцьованої заготовки	Поч.темп. валків в зоні контакту, Т <sub>шт</sub> ,°С	Сер.темп. середовища в зоні контакту Т <sub>с</sub> ,°С	Термічна провідність середовища $\alpha_{c} \cdot 10^{-3}, \frac{BT}{M^{2} °C}$	Терміч.провідність металев. контакту. α <sub>м</sub> · 10 <sup>-3</sup> , <mark>Вт</mark> м <sup>2°</sup> С	Загальна провідність контакту $\alpha_{\kappa H} \cdot 10^{-2}, \frac{BT}{M^2 \circ C}$
1	25	237,5	11,72	62,73	74,45
2	50	250	11,96	63,04	75,00
3	100	275	12,44	63,36	75,80
4	150	300	12,9	64,15	77,05
5	200	325	13,46	65,19	78,65
6	250	350	13,88	66,24	80,12
7	300	375	14,31	67,35	81,65
8	350	400	14,74	69,21	83,95
9	400	425	15,12	71,10	86,22
10	450	450	15,5	83,21	98,71

Таблиця 3.6 – Початкові умови для розрахунку теплового стану, деформацій та переміщень при вальцюванні заготовок зі сплаву АК 6, вкритого оксидною плівкою ( $\lambda_{a_2} = 11.6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \, \text{°C}}$ )

Номер вальцьованої заготовки	Поч.темп. валків в зоні контакту, Т <sub>шт</sub> ,°С	Сер.темп. середовища в зоні контакту Т <sub>с</sub> ,°С	Термічна провідність середовища $\alpha_{c} \cdot 10^{-3}, \frac{\text{BT}}{\text{M}^{2} \circ \text{C}}$	Терміч.провідність металев. контакту. $\alpha_{\rm M} \cdot 10^{-3}, \frac{{\rm BT}}{{\rm M}^{2}{\rm \circ}{\rm C}}$	Загальна провідність контакту $\alpha_{\kappa H} \cdot 10^{-2}, \frac{BT}{M^2 \circ C}$
1	25	237,5	11,72	19,22	30,94
2	50	250	11,96	19,32	31,28
3	100	275	12,44	19,41	31,85
4	150	300	12,9	19,6	32,50
5	200	325	13,46	19,85	33,31
6	250	350	13,88	20,11	33,99
7	300	375	14,31	20,39	34,70
8	350	400	14,74	20,84	35,58
9	400	425	15,12	21,31	36,43
10	450	450	15,5	24,81	40,31



Рисунок 3.2 – Поле швидкостей течії металу в осередку деформації в поздовжньому перерізі моделі осередку деформації заготовки в процесі вальцювання, м/с



Рисунок 3.3 – Нагрівання заготовки при вальцюванні під дією сил тертя і пластичної деформації



Рисунок 3.4 – Поле температур вальцьованої заготовки в осередку деформації



Рисунок 3.5 – Поле градієнта температур вальцьованої заготовки в осередку

деформації, <u>°С</u>



Рисунок 3.6 – Поле питомих теплових потоків заготовки в осередку деформації, <sup>Вт</sup>/<sub>м<sup>2</sup></sub>

Розглянемо результати досліджень при вальцюванні круглої заготовки із сплаву АК-6 в кувальних валках для випадку, коли заготовка вкрита плівкою оксиду алюмінію, коефіцієнт теплопровідності якої рівний  $\lambda_{a_2} = 11.6 \frac{BT}{M^2 \circ C}$  для заготовки № 6 (табл. 3.6).

Поле температур в осередку деформацій заготовки для цього випадку при сталому режимі вальцювання (початкова температура вальцювального штампу 250°С) показано на рис. 3.7, а на рис. 3.8, 3.9 показані температурні поля двох поперечних перерізів заготовки при вході та виході з валків для цього варіанту. Максимальна різниця температур в даному випадку не перевищує 10,5°С. У варіанті без плівки оксиду, рис. 3.10, 3.11 – 17,50°С. Менший перепад температур у першому варіанті свідчить про більш рівномірний розподіл теплового стану в осередку деформації завдяки ізолюючим властивостям плівки оксиду алюмінію.



Рисунок 3.7 – Поле температур заготовки, вкритої плівкою оксиду алюмінію



Рисунок 3.8 – Температурне поле в поперечному перерізі заготовки, вкритої плівкою оксиду алюмінію при вході її у валки



Рисунок 3.9 – Температурне поле в поперечному перерізі заготовки, вкритої плівкою оксиду алюмінію, при виході її з валків



Рисунок 3.10 – Температурне поле в поперечному перерізі заготовки при вході в кувальні валки, плівка оксиду алюмінію відсутня

Поле векторів теплових потоків для заготовки, вкритої плівкою оксиду алюмінію (рис. 3.12) також свідчить про більш рівномірний розподіл теплового

стану в осередку деформації заготовки внаслідок впливу ізолюючих властивостей плівки оксиду.

Аналогічне імітаційне моделювання було проведено для заготовок при різних початкових умовах, зокрема різних значеннях температури штампів. Аналіз результатів показав ідентичність висновків. На рис. В1 – В 12 Додатку В наведені температурні поля, поля градієнтів температур і питомих теплових потоків для процесів вальцювання заготовки № 1 (табл. 3.5, 3.6) зі сплаву АК-6 в овальному калібрі на кувальних валках при початковій температурі штампа 25 °C у випадках відсутності та наявності на поверхні заготовки оксидної плівки.

У результаті обчислювального експерименту встановлено, що при вальцюванні заготовки під дією пластичного деформування і сил тертя, відбувається додатковий нагрів заготовки з неоднорідним полем температур, що не перевищує 5 °С.

Нерівномірне обтиснення заготовки осередку деформації В та нерівномірна течія металу при вальцюванні в калібрах [6] супроводжується нерівномірним розподілом температури по поперечному і поздовжньому перерізах заготовки. Він обумовлений геометричними співвідношеннями форми калібру та вальцьованої заготовки, контактною поверхнею між заготовкою й інструментом, опором деформації, тертям, температурою заготовки та температурою поверхні інструменту. Отримані в результаті аналітичних і експериментальних досліджень емпіричні формули, шо визначають значення температури в зоні контакту, розподіл температур вздовж та поперек осередку деформації, на поверхні вальцьованих заготовок наведені в таблиці. 3.7 [81].

Підтвердженням викладеного є криві зміни температури в центрі заготовки та в зоні контакту з валком, зображені на рис. 3.13, для 10 зразків заготовок, з різною температурою нагріву валків (табл. 3.6).



Рисунок 3.11 – Температурне поле в поперечному перерізі заготовки при виході з кувальних вальків, плівка оксиду відсутня



Рисунок 3.12 – Поле питомих теплових потоків заготовки з плівкою оксиду алюмінію в осередку деформації, <sup>Вт</sup>/<sub>м<sup>2</sup></sub>

Таблиця 3.7 – Формули для визначення значень параметрів осередку деформації та розрахунку температурного поля в процесі вальцювання

Параметр, позначення, розрахункова формула	Значення параметрів осередку деформації та розрахуни температурного поля					ахунку	
Кут контакту, град., $\alpha = \arccos\left(1 - \frac{2R_3 - \Delta h}{2R_b}\right)$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
Час вальцювання в перехідній зоні, с, $t = 10^{-3} \left( \frac{R_b \cdot \alpha}{\upsilon_b} \right)$	0,0145	0,029	0,0435	0,058	0,0725	0,087	0,116
Радіус калібру, мм, <i>R</i> <sub>k</sub>	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
Абсолютне обтиснення, мм, $\Delta h$	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Поточний кут обтиснення, рад. $\varphi_i = \frac{\upsilon_b \cdot t_i (1 - \frac{\Delta h}{2R_k})}{R_b \cdot \alpha}$	0,0872	0,1744	0,2617	0,348	0,4361	0,523	0,611
Кут захвату, рад. $\alpha_3 = 2 \arcsin \sqrt{\frac{\Delta h}{2R_b}}$	61,05	61,05	-	-	-	-	-
Швидкість обтиснення, мм/с $\upsilon_{ob} = \frac{R_k \cdot \varphi}{R_b \cdot \alpha} \upsilon_{omp}^b$	75,2	75,2	75,2	75,2	75,2	75,2	75,2
Поточне значення температури в зоні контакту, С° $T = 5,505 \upsilon - 18,05 \sigma_T + 250,9$	271,3	442,4	446,3	446,3	446,3	450,0	450,0
Значення довжини дуги контакту $R_{ki}$ у поперечному перерізі заготовки, на якій відбувається зміна температури: $R_{k_i} = \upsilon_s \cdot t_i$ , мм	1,0904	2,1808	3,2712	4,361	5,452	7,640	14,3
Поточне значення довжини осередку деформації, на якому відбувається зміна температури уздовж осередку деформації: $\ell_{d_i} = \ell_d - R_s \sin(\alpha - \frac{\upsilon_s \cdot t_i}{R_s})$ , мм	4,867	9,985	15,328	20,84	26,489	34,04	38,1

٦



Рисунок 3. 13 – Температура в перерізі заготовки при виході з вальцювального штампа для 10 зразків заготовок зі сплаву АК6 (табл. 3.6): 1 – температура вздовж осі; 2 – температура в зоні контакту; 3 – різниця

#### температур

Тут видно динаміку зміни вказаних температур та їх різниці при вальцюванні низки заготовок, починаючи від температури штампу, рівної 25 °C. Аналіз рисунків показує, що вирівнювання температур по перерізу ОД в вертикальному напрямку має місце для заготовок, розташованих в таблиці 3.5, після шостої, тобто нагрівати штампи для отримання рівномірного розподілу температур доцільно в проміжку температур від 250 °C до 450°C.

З розгляду і аналізу результатів розрахунків, показаних на рисунках, можна зробити такі висновки:

- у разі плоскої та об'ємної задачі результати аналогічні (рис. 3.7 – 3.9);

- для чистого металу різниця температур у вхідному перерізі заготовки значно (у 1,8 рази) більша, ніж в перерізі заготовки при виході її з валків (рис. В.3, В.4).

- для заготовки, вкритої плівкою оксиду алюмінію, у вхідному перерізі заготовки різниця температур більша, ніж в перерізі заготовки при виході її з валків в 2,3 рази (рис. В.9, В.10).

# **3.3** Визначення термічної складової коефіцієнтів нерівномірності деформацій і оцінка точності отриманих результатів

У результаті обчислювального експерименту проведено розрахунок середніх величин компонент вектора термічної деформації: для поперечного перерізу –  $\varepsilon_x$ ; нормального до поперечного перерізу –  $\varepsilon_y$ ; та подовжнього перерізу –  $\varepsilon_z$  осередку деформації чотирьох різних типорозмірів вальцьованих заготовок в декартових координатах (табл. 3.8) [68].

Таблиця 3.8 – Значення термічних деформацій в зоні деформування різних типорозмірів заготовок

Схема	Діаметр заготовки	ε	ε	ε <sub>z</sub>
	25	0,0015720	0,0048900	0,0001950
	35	0,0017380	0,0050970	0,0001000
круг-овал	50	0,0140000	0,0096600	0,0001800
	65	0,0027140	0,0063000	0,0001000
	25	0,0004100	0,0039200	0,0206000
овал-ромб	35	0,0004735	0,0078940	0,0207700
	50	0,0002650	0,0020400	0,0220830
	65	0,0002914	0,0022400	0,0290000
	25	0,0008000	0,0059000	0,0126000
овал-квадрат	35	Tp $\epsilon_x$ $\epsilon_y$ 0,0015720         0,0048           0,0017380         0,0050           0,0140000         0,0090           0,0027140         0,0063           0,0004100         0,0039           0,0004100         0,0039           0,0004735         0,0078           0,0002650         0,0020           0,0002914         0,0022           0,0007400         0,0059           0,0005680         0,0040           0,0007400         0,0087           0,0007509         0,0072           0,0007509         0,0074           0,0007509         0,0074           0,0007509         0,0074           0,0007509         0,0074           0,0007509         0,0074	0,0051200	0,0167400
	50	0,0005680	0,0040600	0,0088820
	25	0,0009200	0,0087050	0,0198700
DONE RECEPCE	35	0,0007509	0,0072310	0,0159760
ромо-квадрат	50	0,0007811	0,0074178	0,0171750
	65	0,0017540	0,0120000	0,0000451

За даними обчислювального експерименту, наведеними в табл. 3.8 та методикою наведеною нижче, проведено розрахунок термічних складових коефіцієнтів нерівномірності деформацій у поперечному і поздовжньому напрямку  $K_p^T$  і  $K_s^T$ .

Значення коефіцієнтів розширення і випередження при об'ємному високотемпературному пластичному деформуванні заготовок в овальних калібрах обчислювалися за формулами [6]

$$K_{p} = \sqrt{0,0582 \cdot i^{2} - 0,02123 \cdot i + 0,2015} + 0,2265 \cdot i - 0,049, \qquad (3.31)$$

$$K_{e} = \sqrt{270,569 \cdot i^{2} - 516,265 \cdot i + 248,728} - 16,455 \cdot i + 15,714, \qquad (3.32)$$

де  $i = \frac{R_{\kappa}}{R_{s}}$  – параметр, якій оцінює відношення радіуса калібру  $R_{\kappa}$  до радіуса заготовки  $R_{3}$ , мм.

Для кожного типорозміру заготовок, вказаних в таблиці 3.8 здійснювали розрахунок величин термічної складової коефіцієнтів розширення та випередження при об'ємному високотемпературному пластичному деформуванні за формулами

$$K_p^T = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y},\tag{3.33}$$

$$K_{e}^{T} = \frac{\varepsilon_{z}}{\varepsilon_{x}}.$$
(3.34)

#### Виконаний розрахунок значень величин, наведено в табл. 3.9

Таблиця 3.9 – Результати чисельного розрахунку термічної складової коефіцієнтів нерівномірності деформацій

Система калібрів	Діаметр, мм	i	$K_p^T$	$K_{_{m{ extsf{ extsf} extsf{ extsf{ extsf} extsf$	$K_p^T/K_p$	$K_{s}^{T}/K_{s}$	Середнє значення $K_p^T/K_p$	Середнє значення $K_{e}^{T}/K_{e}$
	25	1,23	0,322	0,124	0,430	0,450		
круг-	35	1,59	0,340	0,060	0,400	0,430	0.420	0,450
овал	50	3,62	0,700	0,0127	0,410	0,470	0,420	
	65	2,01	0,430	0,037	0,420	0,460		
	25	3,31	0,105	0,020	0,400	0,400		
овал-	35	3,00	0,060	0,023	0,387	0,403	0,394	0,392
ромб	50	4,50	0,130	0,012	0,392	0,396		
	65	5,00	0,131	0,010	0,397	0,370		
овал- квадрат	25	1,50	0,136	0,063	0,389	0,394		0,393
	35	1,80	0,145	0,044	0,391	0,387	0,393	
	50	1,50	0,14	0,064	0,400	0,398		
	25	2,00	0,105	0,046	0,388	0,383		
ромб-	35	2,00	0,104	0,047	0,385	0,391	0.280	0.282
квадрат	50	2,00	0,105	0,045	0,385	0,375	0,380	0,382
	65	3,00	0,146	0,025	0,360	0,380		
Середні значення								0,404

Отже, методами математичної статистики встановлено, що величини термічної складової коефіцієнтів нерівномірності деформацій матеріалу заготовок з алюмінієвого сплаву АК6 при високотемпературному вальцюванні складають: "круг-овал":  $K_p^T = 0,42K_p, K_e^T = 0,45K_e;$  "овал-ромб"  $K_p^T = 0,394K_p, K_e^T = 0,399K_e;$  "ромб-квадрат"  $K_p^T = 0,380K_p, K_e^T = 0,382K_e;$ "овал-квадрат"  $K_p^T = 0,393K_p, K_e^T = 0,393K_e.$ 

Основні похибки, отримані в розрахунках величин температур, переміщень і деформацій при математичному моделюванні термомеханічного стану заготовок з алюмінієвого сплаву АК6 на кувальних валках можна розбити за джерелами їх походження на чотири групи:

1. Похибки формалізації, які виникають при переході від об'єкту – оригіналу механічної системи до його імітаційної моделі і обумовлені наближеною відповідністю об'єкту-оригіналу за істотними ознаками його моделі. Кількісну оцінку цих похибок в загальному випадку визначити неможливо. Зазвичай таку оцінку отримують при перевірці адекватності контрольованих розрахункових параметрів імітаційної моделі (величин температур, переміщень, деформацій) і експериментальних досліджень температур і деформацій натурних зразків заготовок (фізичних моделей об'єкту-оригіналу).

2. Похибки вхідних даних, які пов'язані з фізичними вимірами параметрів об'єкту-оригіналу (фізико-механічні властивості, теплотехнічні, кінематичні і термосилові умови навантаження). При вимірах в технічних системах середньозважена похибка в статичних умовах складає 1-5% [77].

3. Похибки методу скінчених елементів, які залежать від вибору типу скінчених елементів для імітаційної моделі та їх кількості в зонах з великими градієнтами деформацій. Збіжність наближених рішень задачі досягається перевіркою результатів при асимптотичному збільшенні кількості скінчених елементів. 4. Похибки методу скінчених різниць [77], які залежать від дискретизації тимчасового аргументу при розв'язанні нестаціонарної задачі тепломасоперенесення. Збіжність наближених рішень задачі досягається перевіркою результатів при асимптотичному збільшенні кількості тимчасових кроків інтеграції рівняння теплового балансу і контролю поля температур на кінцевому кроці тимчасового навантаження заготовки.

5. Похибки округлення результатів чисельних рішень, які пов'язані з ПЕОМ, де усі розрахунки виконуються з фіксованим числом значущих цифр. В середньому похибка машинного округлення результатів має бути в 5-10 разів менше похибки чисельного алгоритму.

6. Похибки статистичної обробки коефіцієнтів термічних деформацій для різного типу заготовок становлять 2%.

Таким чином, можна зробити висновки, що отримані результати чисельного експерименту (з урахуванням дослідження асимптотичної точності розрахунків термічних деформацій на дискретних моделях за допомогою згущування сітки до ~ 150 000 кінцевих елементів) відповідають точності інженерних розрахунків.

Чисельні розв'язки цієї задачі обмежені величиною ≤ 8% відхилень отриманих величин термічної складової коефіцієнтів розширення і випередження при об'ємному високотемпературному деформуванню заготовок типу "круг-овал", "овал-ромб", "ромб-квадрат", "овал-квадрат" з алюмінієвого сплаву АК 6.

#### Висновки до розділу 3

1. 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".

2. Розроблено алгоритм автоматизації розв'язання нестаціонарної нелінійної задачі тепломасоперенесення і термопружності в середовищі програми ANSYS, побудовані об'ємні геометричні та дискретні моделі осередку деформації вальцьованих заготовок.

3. Розрахунково-теоретичними дослідженнями встановлено, що нерівномірна течія металу при формозміненні вальцюванням супроводжується нерівномірним розподілом температури у напрямі осі заготовки і ортогональної площини, викликаних геометричним співвідношенням форми калібру і заготовки, площею контакту між заготовкою і інструментом, ступенем обтискання, опором деформацій, тертям, температурою заготовки і поверхні інструменту.

4. На основі обчислювального експерименту визначені закономірності розподілу температур та полів поздовжніх та поперечних термічних деформацій осередку деформації при вальцюванні заготовок для різних технологічних режимів. Визначено, що оксидна плівка, якою вкрита поверхня нагрітої заготовки, зменшує перепад температур в поперечному перерізі овальної заготовки до 60 %.

5. Визначено, що величини термічної складової коефіцієнтів нерівномірності деформацій матеріалу заготовок з алюмінієвого сплаву АК6 при високотемпературному вальцюванні складають: "круг-овал":  $K_p^T = 0,42K_p$ ,  $K_e^T = 0,45K_e$ ; "овал-ромб"  $K_p^T = 0,394K_p$ ,  $K_e^T = 0,399K_e$ ; "ромб-квадрат"  $K_p^T = 0,380K_p$ ,  $K_e^T = 0,382K_e$ ; "овал-квадрат"  $K_p^T = 0,393K_p$ ,  $K_e^T = 0,393K_e$ .

6. За окремими результатами розділу опубліковані роботи [68], [70], [81].

#### **РОЗДІЛ 4**

## АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК ПРИ ВАЛЬЦЮВАННІ

4.1 Теоретичний аналіз напруженого стану матеріалу заготовок при вальцюванні

Теоретичний аналіз напруженого стану матеріалу проведемо шляхом сумісного розв'язання рівнянь рівноваги, умови пластичності в зонах плоскої деформації і рівнянь зв'язку компонент тензора напружень та тензора швидкості деформацій при вальцюванні заготовок.

Для аналізу напруженого стану матеріалу заготовки використаємо циліндричну систему координат  $r, \alpha, y$ , яка представлена на схемі зони деформації при вальцюванні рис. 4.1 [82].



Рисунок 4.1 – Схема зони деформації при вальцюванні

На основі дослідження деформованого стану заготовок при вальцюванні [1, 83], схему деформованого стану можна прийняти плоскою, тобто течією металу у напрямі координати у можна знехтувати.

Зона пластичної деформації в площині y = const обмежена зоною контакту вальців із заготовкою, тобто ділянкою, що розташована між радіусами  $r_1$ ,  $r_2$  і кутом  $\alpha$  при заміні дуги контакту хордою. Матеріал заготовки при цьому вважаємо ізотропним і деформаційно зміцнюваним.

Рівняння рівноваги відзначеного деформованого елемента, показаного на рис. 4.2, в циліндричній системі координат матиме вигляд

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{rt}}{\partial \alpha} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0\\ \frac{\partial \tau_{rt}}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_t}{\partial \alpha} + \frac{2\tau_{rt}}{r} = 0 \end{cases}$$
(4.1)



Рисунок 4.2 – Напружений стан деформованого елемента

Швидкість деформації в радіальному  $\dot{\varepsilon}_r$ , тангенціальному  $\dot{\varepsilon}_t$  напрямах і швидкість деформації зсуву  $\dot{\gamma}_{rt}$  виражаються через швидкість течії  $V_r$  наступними кінематичними співвідношеннями

$$\dot{\varepsilon_r} = \frac{\partial V_r}{\partial r}; \quad \dot{\varepsilon_t} = \frac{V_r}{r}; \quad \dot{\gamma}_{rt} = \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \alpha}.$$
 (4.2)

Враховуючи умову нерозривності для плоскої деформації  $(\dot{\varepsilon}_y = 0)$  отримаємо

$$\dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_t = 0. \tag{4.3}$$

Підставивши (4.2) в (4.3), отримаємо

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} = 0. \tag{4.4}$$

Звідки

$$V_r = \frac{V(\alpha)}{r},\tag{4.5}$$

де *V*(*α*) – невідома функція координати *α*. Тоді співвідношення (4.2) набудуть вигляду

$$\dot{\varepsilon_r} = -\frac{\partial V(\alpha)}{r^2}; \quad \dot{\varepsilon_t} = \frac{V(\alpha)}{r^2}; \quad \dot{\gamma}_{rt} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial V(\alpha)}{\partial \alpha}. \tag{4.6}$$

Фізичні рівняння, що зв'язують компоненти тензора напружень і тензора швидкостей деформацій для плоскої деформації можна записати у вигляді системи

$$\begin{cases} \sigma_r - \sigma_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_u}{\dot{\epsilon}_u} \cdot \dot{\epsilon}_r \\ \sigma_t - \sigma_0 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_u}{\dot{\epsilon}_u} \cdot \dot{\epsilon}_t \\ \sigma_y - \sigma_0 = 0 \\ \tau_{rt} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_u}{\dot{\epsilon}_u} \cdot \dot{\gamma}_{rt} \end{cases}$$
(4.7)

де  $\dot{\varepsilon}_u$  – інтенсивність швидкостей деформацій.

Третє рівняння системи (4.7) задовольняється, оскільки у випадку плоскої деформації маємо

$$\sigma_y = \frac{\sigma_r + \sigma_t}{2} = \sigma_0.$$

Умову пластичності використаємо у формі Губера-Мізеса, яка для плоскої деформації має вигляд [83]

$$\sigma_u = \sqrt{3}\tau_u = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_r - \sigma_t)^2 + 4\tau_{rt}^2} = \sigma_s, \qquad (4.8)$$

де  $\tau_u$  – інтенсивність дотичних напружень;  $\sigma_s$  – напруження течії (опору пластичному деформуванню).

Крива течії матеріалу заготовки має вигляд степеневої залежності

$$\sigma_s = \sigma_T \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^n,\tag{4.9}$$

де  $\sigma_T$  – границя текучості; n – показник зміцнення матеріалу при пластичному деформування, що знаходиться за результатами експериментальних випробувань. Прийнявши  $B_0 = \frac{\sigma_T \cdot r_1^n}{\sqrt{3}} = const$ , отримаємо

$$\tau_u = B_0 \cdot r^{-n}. \tag{4.10}$$

У випадку плоскої деформації компоненти тензора напружень  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_y$  можуть бути вираженими через невідому функцію  $\varphi(r, \alpha)$  змінних r і  $\alpha$  співвідношеннями

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_0 + \tau_n \cos 2\varphi \\ \sigma_t = \sigma_0 - \tau_n \cos 2\varphi \\ \sigma_y - \sigma_0 = 0 \\ \tau_{rt} = \tau_n \sin 2\varphi \end{cases}$$
(4.11)

Задовольняючи граничні умови, маємо

а) в площині симетрії  $\tau_{rt} = 0$ . Відповідно при  $\alpha = 0, \ \varphi = 0;$ 

б) на поверхні контакту з валками напруження  $au_{rt}$  досягають максимального значення, тобто при  $\frac{\alpha_1}{2}$ 

$$\tau_{rt} = m\tau_u; \ \varphi = \delta; \ \sin 2\delta = m. \tag{4.12}$$

Приймемо, що інтенсивність сил тертя на контакті дорівнює границі текучості при зсуві, тобто при  $\alpha = \frac{\alpha_1}{2}$ : в зоні відставання  $\varphi = -\frac{\pi}{4}$ ; в зоні випередження  $\varphi = \frac{\pi}{4}$ .

Підставляючи (4.8), (4.11) в (4.7), отримаємо

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon_r} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \dot{\varepsilon_u} \cdot \cos 2\varphi \\ \dot{\varepsilon_t} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \dot{\varepsilon_u} \cdot \cos 2\varphi \\ \dot{\gamma_{rt}} = \sqrt{3} \cdot \dot{\varepsilon_u} \cdot \sin 2\varphi \end{cases}$$
(4.13)

Із рівнянь (4.6) і (4.13) отримаємо

$$\frac{\dot{\gamma}_{rt}}{\varepsilon_r} = -\frac{\partial V(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot \frac{1}{V(\alpha)} = 2tg 2\varphi.$$
(4.14)

Оскільки  $V(\alpha)$  є функцією лише однієї змінної  $\alpha$ , то функція  $\varphi$  не залежить від r, тобто

$$\varphi = \varphi(\alpha); \quad \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0.$$
 (4.15)

Рівняння рівноваги з урахуванням (4.10), (4.11) і (4.15) після диференціювання набудуть вигляду

$$\begin{cases} \frac{r^{n+1}}{2B_0} \cdot \frac{\partial \sigma_0}{\partial r} + \cos 2\varphi \left[ \frac{d\varphi}{d\alpha} + A_0 \right] = 0\\ \frac{r^n}{2B_0} \cdot \frac{\partial \sigma_0}{\partial r} + \sin 2\varphi \left[ \frac{d\varphi}{d\alpha} + A_0 \right] = 0 \end{cases}$$
(4.16)

де  $A_0 = 1 - \frac{n}{2}$ .

Введемо позначення

$$\sin 2\varphi \left[\frac{d\varphi}{d\alpha} + A_0\right] = \frac{d\omega(\alpha)}{d\alpha},\tag{4.17}$$

де *ω*(*α*) – деяка функція координати α. Тоді інтегруючи друге рівняння системи (4.16), отримаємо

$$\frac{r^{n} \cdot \sigma_0}{2B_0} = \chi(r) - \omega(\alpha), \qquad (4.18)$$

де  $\chi(r)$  – невідома функція змінної r.

Диференціюючи рівняння (4.18) по змінній *r* і розв'язуючи його сумісно з першим рівнянням системи (4.16), отримаємо

$$r \cdot \frac{\partial \chi}{\partial r} - n \cdot \chi = n \cdot \omega + \cos 2\varphi \left(\frac{d\varphi}{d\alpha} + A_0\right). \tag{4.19}$$

Оскільки ліва частина рівняння (4.19) залежить лише від *r*, а права лише від *α*, то ліва і права частини є деякою сталою *b* 

$$\begin{cases} r \cdot \frac{\partial \chi}{\partial r} - n \cdot \chi = b, \\ n \cdot \omega + \cos 2\varphi \left( \frac{d\varphi}{d\alpha} + A_0 \right) = b. \end{cases}$$
(4.20)

Інтегруючи перше рівняння отримаємо

$$\chi = \mathbf{c} \cdot \mathbf{r}^{\mathbf{n}} - \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{n}},\tag{4.21}$$

де с – стала інтегрування.

Якщо в рівнянні (4.16) знехтувати сталою  $A_0$  у порівнянні з  $\frac{d\varphi}{d\alpha}$ , то

$$\omega(\alpha) = -\frac{1}{2}\cos 2\varphi + c_1, \qquad (4.22)$$

тоді із другого рівняння (4.20) отримаємо

$$b_{\alpha} = \frac{\cos 2\varphi d\varphi}{k_0 - \cos 2\varphi},\tag{4.23}$$

де  $k_0 = b - c_1 \cdot n$ .

Інтегруючи (4.23) отримаємо

$$\alpha = \frac{k_0}{\sqrt{k_0^2 - 1}} \operatorname{arctg} \frac{(k_0 - 1)tg^2\varphi}{\sqrt{k_0^2 - 1}} - \varphi_0.$$
(4.24)

Сталу  $k_0$  можна визначити, використовуючи граничну умову (4.12) на контакті з валком, а із виразу (4.23) –сталу b.

Проте можна використати і більш простий, наближений метод розв'язання. Якщо  $k_0 \gg cos2\varphi$ , то з (4.23) отримаємо

$$2k_0\alpha = \sin 2\varphi. \tag{4.25}$$

У частковому випадку, коли інтенсивність сил тертя на поверхні контакту при  $\alpha = \frac{\alpha_1}{2}$  дорівнює границі текучості при зсуві

$$k_0 = \mp \frac{1}{\alpha_1}; \quad b = \mp \frac{1}{\alpha_1} + c_1 \cdot n.$$
 (4.26)

Тоді

$$sin2\varphi = \mp \frac{2\alpha}{\alpha_1}, \quad cos2\varphi = \sqrt{1 - 4\left(\frac{\alpha}{\alpha_1}\right)^2},$$

$$\omega(\alpha) = c_1 - \frac{1}{2}\sqrt{1 - 4\left(\frac{\alpha}{\alpha_1}\right)^2}.$$
(4.27)

У цьому випадку вираз для середнього гідростатичного напруження і компонент тензора напружень набуває вигляду

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_T \cdot r_1^n}{\sqrt{3} \cdot r^n} \left[ c \cdot r^n - 2c_1 \mp \frac{1}{\alpha_1 n} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - 4\left(\frac{\alpha}{\alpha_1}\right)^2} \right],\tag{4.28}$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma_T \cdot r_1^n}{\sqrt{3} \cdot r^n} \left[ c \cdot r^n - 2c_1 + \frac{1}{\alpha_1 n} + \frac{3}{2} \sqrt{1 - 4\left(\frac{\alpha}{\alpha_1}\right)^2} \right], \tag{4.29}$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_T \cdot r_1^n}{\sqrt{3} \cdot r^n} \left[ c \cdot r^n - 2c_1 \mp \frac{1}{\alpha_1 n} - \frac{1}{2} \sqrt{1 - 4\left(\frac{\alpha}{\alpha_1}\right)^2} \right],\tag{4.30}$$

$$\tau_{rt} = \mp \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_T \cdot r_1^n}{r^n} \cdot \frac{\alpha}{\alpha_1},\tag{4.31}$$

де знак "мінус" відноситься до зони відставання, а "плюс" – до зони випередження.

Невідомі сталі С і С<sub>1</sub> можна визначити із граничних умов на вході в зону пластичної деформації при  $r = r_1$  і на виході з неї при  $r = r_2$  у залежності від величини переднього і заднього натягу чи підпору. При відсутності натягу чи підпору при  $r = r_1$  і  $r = r_2$  напруження  $\sigma_t = 0$ . Тоді

$$C = \frac{2}{r_1^n - r_2^n} \left[ \frac{1}{\alpha_1 n} - \sqrt{1 - 4\left(\frac{\alpha}{\alpha_1}\right)^2} \right];$$
(4.32)

$$C_{1} = \frac{1}{2} \left[ \frac{2r_{2}^{n}}{r_{1}^{n} - r_{2}^{n}} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{1}n} - \sqrt{1 - 4\left(\frac{\alpha}{\alpha_{1}}\right)^{2}} \right) + \frac{1}{\alpha_{1}n} - \frac{1}{2}\sqrt{1 - 4\left(\frac{\alpha}{\alpha_{1}}\right)^{2}} \right].$$
(4.33)

При відомому значенні середнього гідростатичного напруження можна визначити показники напруженого стану у кожній точці в зоні пластичної деформації вальцьованої заготовки

$$\eta = \frac{3\sigma_0}{\sigma_u} = \sqrt{3} \left( C \cdot r^n - 2C_1 \mp \frac{1}{\alpha_1 n} \right). \tag{4.34}$$

Зокрема, на поверхні контакту валка із заготовкою, де деформований стан матеріалу заготовки може бути визначений експериментально (методом координатних сіток), тобто при  $\alpha = \frac{\alpha_1}{2}$ , у відповідності з формулами (4.28) – (4.34) показник напруженого стану описується залежністю

$$\eta = \sqrt{3} \left[ \frac{2r^n}{(r_1^n - r_2^n)\alpha_1 n} + \frac{1}{\alpha_1 n} - 1 \right].$$
(4.35)

Отриманий вираз для визначення показника напруженого стану матеріалу дозволяє, з використанням відповідних критеріїв, здійснювати оцінку його деформовності.

### 4.2 Дослідження напружено-деформованого стану заготовок при холодному вальцюванні методом імітаційного моделювання

Процес вальцювання заготовок був створений як ковальська операція, що призначена для гарячого протягування вихідних заготовок і отримання фасонних виробів під наступне штампування на пресі або молоті. Разом з тим, для низки пластичних металів цю операцію доцільно здійснювати в умовах холодного деформування. Проте розвиток холодного вальцювання потребує оцінки деформовності матеріалу заготовок для запобігання їх руйнуванню, а також для визначення використаного ресурсу пластичності у разі виробництва відповідальних деталей.

Для дослідження базового процесу вальцювання циліндричних заготовок між циліндричними роликами було проведено моделювання в програмному комплексі DEFORM 3D. Оскільки процес вальцювання циліндричних заготовок  $\epsilon$  симетричним, то моделювання досліджуваного процесу проведено як вальцювання <sup>1</sup>/<sub>4</sub> заготовки валком із урахуванням граничних умов на площинах симетрії. Досліджуваний зразок моделювався із забезпеченням розмірів: l = 30 мм, H = 5 мм, h = 2 мм, як показано на рис. 4.3. Матеріал – алюмінієвий сплав марки Al-1100, який вибирався із наявних в програмному комплексі бібліотек матеріалів.

Змодельований зразок розбивався на сукупність скінчених елементів із певним зв'язком. Тобто на зразку моделювалась сітка скінчених елементів з наступними параметрами: тип сітки – об'ємна, тип скінченого елемента – паралелепіпед, кількість елементів – 11400, кількість вузлів – 13736, кількість поверхневих багатокутників – 4428, мінімальний розмір елемента – 0,3845 мм, максимальний розмір елемента – 0,8764 мм.

Характер моделювання на зразку сітки скінчених елементів представлений на рис. 4.4.



Рисунок 4.3 – Схематичне представлення процесу вальцювання заготовок



Рисунок 4.4 – Характер сітки скінчених елементів, що моделювалася на зразку а) та в його поперечному перерізі б)

У якості фізичних співвідношень між напруженнями та деформаціями використовували співвідношення теорії течії, зміцнення матеріалу – ізотропне, структура – нормалізована. Параметри тертя вибиралися наступними: тип – shear, коефіцієнт – 0,7. Швидкість обертання головного інструменту (валка) складає 1 об/хв. Вальцювання проводилось до етапу досягнення радіуса зразка 2 мм. Час деформування – 30 с. Розрахунок процесу в програмному комплексі поділений на 75 кроків.

Характер формозмінення заготовки під час вальцювання надано на рис. 4.5.





В результаті моделювання отримали картини розподілення по об'єму заготовки накопиченої деформації (рис. 4.6) і інтенсивності напружень (рис. 4.7).



Рисунок 4.6 – Розподілення деформацій в об'ємі циліндричного зразка на початковій а) і кінцевій б) стадіях вальцювання



Рисунок 4.7 – Розподілення напружень в об'ємі циліндричного зразка на початковій а) і кінцевій б) стадіях вальцювання

При побудові технологічних процесів холодного вальцювання заготовок, визначена за допомогою діаграм пластичності гранична до руйнування інтенсивність деформацій не є зручною для використання. Тому нами був досліджений зв'язок між інтенсивністю деформацій і ступенем обтиснення заготовок при вальцюванні шляхом моделювання процесу в програмному комплексі DEFORM 3D.

Для побудови залежності між ступенем обтиснення та накопиченою деформацією на вільній бічній поверхні заготовки розроблено дві методики. Перший підхід полягав в дослідженні геометричних параметрів заготовки під процесу деформування, для моделювання чого було досліджено час переміщення та параметри НДС в характерних точках заготовки. Для уникнення впливу особливої течії матеріалу на кінцях заготовки, які на виробництві вважаються за припуски на дефект заготовки, було проведено дослідження точок на відстані 10 мм від початку заготовки. Точки вибиралися на вільній бічній стороні заготовки та на вершині, яка знаходиться під валком під час вальцювання (точки Р<sub>1</sub> та Р<sub>1</sub><sup>\*</sup>, що зображено на рис. 4.3). Точку на перевірки її переміщення вершині брали плошині. лля саме В ШО перпендикулярна до вісі заготовки. Це необхідно для геометричного визначення приросту зменшення висоти заготовки під час вальцювання.

Під час вказаного дослідження було встановлено, що досліджувані точки на вершині заготовки переміщуються лише в напрямку z (див. рис. 4.5), що дозволяє використовувати значення зміни геометричних параметрів заготовки, які отримано під час імітаційного моделювання процесу вальцювання.

На бічній стороні на вказаній вище відстані від початку заготовки взято точки із кроком в 0,4 мм, які одночасно будуть в певний момент деформування у взаємодії із деформуючим інструментом, але матимуть різний ступінь деформацій. Висоту певної точки заготовки визначали із її геометричних параметрів за формулою

$$h = H - R + \sqrt{R^2 - d^2} , \qquad (4.36)$$

де *H* – початкова висота заготовки; *R* – радіус деформуючого валка (який дорівнює 20 мм); *d* – горизонтальна відстань від центра валка до поточної досліджуваної точки.

Результати розрахунків представлені в таблиці 4.1 та на рис. 4.8.

Таблиця 4.1 – Результат дослідження зв'язку відносного стиснення заготовки та інтенсивності деформацій на її бічній поверхні

	Координати точок						
№ точки	Х	У	Z	d	h	h/H	ε"
1	10	5	0	0	2	0,4	0,570279
2	10,4	5	0	0,4	2,004000	0,40080	0,568399
3	10,8	5	0	0,8	2,016006	0,403201	0,562008
4	11,2	5	0	1,2	2,036032	0,407206	0,542718
5	11,6	5	0	1,6	2,064103	0,412821	0,514477
6	12	5	0	2	2,100251	0,420050	0,483077
7	12,4	5	0	2,4	2,144522	0,428904	0,449537
8	12,8	5	0	2,8	2,196970	0,439394	0,412770
9	13,2	5	0	3,2	2,257660	0,451532	0,372255
10	13,6	5	0	3,6	2,326668	0,465334	0,328321
11	14	5	0	4	2,404082	0,480816	0,283053
12	14,4	5	0	4,4	2,490003	0,498001	0,237661
13	14,8	5	0	4,8	2,584542	0,516908	0,193756
14	15,2	5	0	5,2	2,687828	0,537566	0,151363
15	15,6	5	0	5,6	2,800000	0,560000	0,110939
16	16	5	0	6	2,921216	0,584243	0,076271
17	16,4	5	0	6,4	3,051649	0,610330	0,051402
18	16,8	5	0	6,8	3,191491	0,638298	0,038966
19	17,2	5	0	7,2	3,340954	0,668191	0,036218
20	17,6	5	0	7,6	3,500270	0,700054	0,035541
21	18	5	0	8	3,669697	0,733939	0,034956
22	18,4	5	0	8,4	3,849518	0,769904	0,033254
23	18,8	5	0	8,8	4,040045	0,808009	0,029390
24	19,2	5	0	9,2	4,241622	0,848324	0,023932
25	19,6	5	0	9,6	4,454630	0,890926	0,019263
26	20	5	0	10	4,679492	0,935898	0,016744
27	20,4	5	0	10,4	4,916675	0,983335	0,015880

Другий підхід полягав в отримані усіх значень переміщення та параметрів НДС для кожної із досліджуваних точок під час процесу вальцювання. В результаті ми отримали ідентичні значення для усіх 27 досліджуваних точок заготовки.



Рисунок 4.8 – Графік залежності між відносним стисненням заготовки та інтенсивністю деформацій на її бічній поверхні, побудований за першим підходом

У табл. 4.2 наводимо результати лише для двох точок. Із отриманих результатів досліджень видно, що точки на вільній бічній стороні заготовки під час вальцювання деформуються однаково.

Залежність між відносним стисненням та інтенсивністю деформацій було апроксимовано рівнянням (рис. 4.9)

$$\frac{h_{\tilde{o}}}{D}(e_u) = 0,786 - 0,686 \cdot e_u + \frac{6,414 \cdot 10^{-3}}{e_u}, \qquad (4.37)$$

де  $\frac{h_{\tilde{o}}}{D}$  відносне стиснення,  $h_{\tilde{o}}$  – товщина вальцьованої заготовки поблизу вільної бічної поверхні, D – діаметр вихідної заготовки. Середня арифметична відносна похибка апроксимації складає 1%. Таблиця 4.2 – Результат дослідження зв'язку відносного стиснення заготовки та інтенсивності деформацій на її бічній поверхні для двох точок

Точка	Точка №1		Точка №5			
h/H	<i>e</i> <sub><i>u</i></sub>	h/H	<i>e</i> <sub><i>u</i></sub>			
0,99987	0,000227	0,999892	0,015773			
0,999791	0,001443	0,999879	0,015773			
0,99974	0,018196	0,999862	0,016157			
0,999476	0,024054	0,999796	0,018935			
0,998542	0,030064	0,999508	0,025548			
0,995807	0,032435	0,998364	0,031466			
0,978694	0,033197	0,995439	0,033745			
0,920215	0,035993	0,980815	0,034494			
0,855833	0,052534	0,92263	0,037026			
0,79416	0,090434	0,857856	0,052149			
0,735513	0,141901	0,79608	0,089322			
0,681099	0,19796	0,737531	0,140294			
0,631187	0,256726	0,682546	0,196027			
0,585234	0,316772	0,632455	0,254606			
0,543327	0,375218	0,586975	0,314418			
0,50657	0,428077	0,545439	0,372977			
0,474355	0,47424	0,508048	0,426059			
0,447277	0,516813	0,475348	0,472065			
0,426043	0,551413	0,448133	0,514477			
0,411176	0,566949	0,426712	0,549629			
0,403089	0,570279	0,415708	0,563066			
0,401341	0,573721	0,405209	0,568648			
0,401346	0,57576	0,401483	0,571499			
0,401328	0,576784	0,40143	0,574898			
0,401315	0,576831	0,401411	0,575966			
		0,4014	0,576044			



Рисунок 4.9 – Значення відносного стиснення з табл.4.2, точка №1 (точки) та його апроксимація рівнянням (4.37) (суцільна лінія)

При деформаціях *e<sub>u</sub>* ≥ 0,1 зв'язок між інтенсивністю деформацій і відносним стисненням має лінійну залежність, показану на рис. 4.10, і може бути описаний рівнянням [84]

$$\frac{h_{\tilde{o}}}{D} = 0.818 - 0.723 \cdot e_u.$$
 (4.38)



Рисунок 4.10 – Залежність між відносним стисненням  $\frac{h}{D}$  і інтенсивністю деформацій  $e_u$  для точок вільної бічної поверхні заготовки при вальцюванні
Звідки отримуємо граничну на момент руйнування товщину вальцьованої заготовки [85]

$$h_* = (0,818 - 0,723 \cdot e_*) \cdot D. \tag{4.39}$$

Це дає можливість визначати граничну товщину заготовки  $h_*$  при заданому діаметрі D, яку можна отримати вальцюванням без руйнування. При цьому граничну до руйнування деформацію  $e_*$  визначають для конкретного матеріалу за відомими діаграмами пластичності або за результатами випробувань [67].

# 4.3 Дослідження напружено-деформованого стану і характеру розподілу температур в зоні деформування при гарячому вальцюванні заготовок методом імітаційного моделювання

У якості розрахункової схеми процесу гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвого сплаву АК6 була обрана схема "круг-овал", як найбільш розповсюджена і для якої характерна наявність жорстких схем напруженодеформованого стану (НДС) заготовки. При цьому розглядався процес вальцювання для заготовок з діаметрами: 25мм, 35 мм. Розрахункова схема сформована на основі об'ємної кінцево-елементної моделі (рис. 3.1). Початкові заготовки розбивалися на відповідну кількість елементів, що дозволяє отримати досить точні результати. Для різних діаметрів заготовок кількість елементів становила: діаметр 25 мм – 13800; діаметр 35 мм – 13900 [64].

При моделюванні задавалися умови реального процесу. Властивості початкової заготовки: модуль Юнга 6,9х10<sup>4</sup> МПа, коефіцієнт Пуассона 0,33, умовна границя текучості при температурі 450°С,  $\sigma_{0,2} = 62$  МПа. Діаграма істинного напруження при розрахунку описувалася залежністю  $\sigma_s = \sigma_s (e_u, \bar{\varepsilon}, T)$ , де  $\sigma_s$  – істинне напруження,  $e_u$  – інтенсивність деформації,  $\bar{\varepsilon}$  – швидкість деформації, T – температура. При розрахунку було враховано контактне тертя

в умовах гарячого вальцювання (μ = 0,32). Деформуючий інструмент приймався абсолютно жорстким. Враховували тепловіддачу заготовки довкіллю та інструменту.

За результатами розрахунків був визначений НДС заготовок, зокрема характер розподілу інтенсивності напружень  $\sigma_u$ . для заготовок діаметрами 25 мм і 35 мм в момент початку деформації, на проміжному етапі та на сталій стадії.

На рис. 4.11 показаний розподіл деформації *e<sub>u</sub>* в поздовжньому перерізі та умовно відображено місця, в яких взяті поперечні перерізи осередку деформації сталого процесу.



б) діаметр початкової заготовки 35 мм

Рисунок 4.11 – Характер розподілу деформації е<sub>u</sub>: 1) переріз сталої стадії; 2) переріз переходу; 3) переріз зростання осередку деформації

На рис. 4.12 надано характер розподілу інтенсивності напружень у поздовжньому перерізі осередку деформації.



а) діаметр початкової заготовки 25 мм



б) діаметр початкової заготовки 35 мм

Рисунок 4.12 – Характер розподілу інтенсивності напружень  $\sigma_u$ . у поздовжньому перерізі осередку деформації

Отриманий моделюванням характер розподілу температури в поздовжньому перерізі по осі заготовки відповідає характеру розподілу інтенсивності деформації. У місці контакту інструменту із заготовкою відбувається значне зниження температури за рахунок тепловіддачі заготовки інструменту. Температура падає і на вільній поверхні, (не контакту) з інструментом. З іншого боку спостерігається значне підвищення температури із зростанням інтенсивності деформації. У місці інтенсивної деформації спостерігається підвищення температури більш ніж на 20 °C. Отримані значення температури на поверхні заготовки з достатньою точністю співпадають з результатами, отриманими в роботі [81].

Після аналізу осередку деформації в поздовжньому перерізі, були визначені напруження і деформації в поперечних перерізах на виході заготовки з калібрів, на осі калібрів та на вході заготовки в калібри.

Розподіл інтенсивності деформації  $e_u$  та температури був досліджений в поперечних перерізах в напрямах осей X і Y, як показано на рис. 4.13.



Рисунок 4.13 – Схема напряму осей у перерізі заготовки

Розподіл деформацій  $e_u$  (рис. 4.14) та нерівномірності температури (рис. 4.15) дає нам можливість оцінити характер формування осередку деформації в поперечному перерізі заготовки діаметром 25 мм. Аналогічні результати отримано за результатами моделювання для заготовки діаметром 35 мм.

Для побудови залежності інтенсивності деформації від лінійних розмірів овалу брали по 10 точок по висоті та ширині овалу. Таким чином, було побудовано для заготовки діаметром 25 мм розподіл нерівномірності деформації  $e_u$  в перерізах у напрямі осі X (рис. 4.16, а) і осі Y (рис. 4.16, б).

Аналогічно для заготовки діаметром 25 мм визначена нерівномірність розподілу температури в перерізах у напрямі осі X (рис. 4.17, а) і осі Y (рис. 4.17, б). За такою ж схемою визначені відповідні нерівномірності для заготовок діаметром 35 мм.



Як свідчать результати дослідження, максимальних значень інтенсивність деформацій і температура на стадіях розвинених деформацій набувають у частині поперечного перерізу заготовки. За центральній отриманими отримані кореляційні залежності розподілу інтенсивності результатами деформацій і температури в перерізах осередку деформацій при вальцюванні за схемою «круг-овал».



б)

Рисунок 4.16 – Розподіл нерівномірності інтенсивності деформації *е*<sub>u</sub> для заготовки діаметром 25 мм в перерізах:

а) у напрямі осі Х; б) у напрямі осі Ү.



б)

Рисунок 4.17 – Розподіл нерівномірності температури для заготовки діаметром 25 мм: а) у напрямі осі Х; б) у напрямі осі Ү

Проведене моделювання процесу гарячого вальцювання заготовок показало можливість оцінки напружено-деформованого стану і характеру розподілу температур в зоні деформування при гарячому вальцюванні заготовок із алюмінієвого сплаву АК6 за схемою «круг-овал».

Нерівномірна течія металу при формозміненні вальцюванням супроводжується нерівномірним розподілом температури в напрямку осі заготовки та ортогональної площини. Розподіл температури відповідає характеру розподілу інтенсивності деформації, яка викликана геометричним співвідношенням форми калібру і вальцьованої заготовки.

# 4.4 Результати експериментально-аналітичних досліджень напружено-деформованого стану матеріалу прямолінійних заготовок при вальцюванні

При вальцюванні формозмінення вихідної заготовки відбувається в умовах складного напруженого стану. Точність інженерних досліджень визначається тим, наскільки адекватно описується досліджуваний об'єкт прийнятої моделі. У роботі Скрябіна С. О. [5] запропоновано теоретичний метод дослідження течії металу в процесі вальцювання заготовок на кувальних вальцях при їх об'ємному деформуванні в калібрах. Метод дозволяє розкрити картину переміщення металу в досліджуваній області як для усталеного (деформація при постійному обтискуванні), так і несталого (деформація з наростаючим або спадним обтискуванням) процесів гарячого деформування, нерівномірність деформації від співвідношення визначити залежно геометричних форм калібру і вальцьованої заготовки.

При дослідженні НДС матеріалу заготовок при вальцюванні важливим є визначення переміщень, швидкостей деформацій, деформацій і напружень та показників напруженого стану.

На основі аналізу експериментальних даних нами побудовані епюри розподілу швидкостей переміщення металу по перерізах заготовки. На рис. 4.18 представлена схема розподілу швидкостей переміщення вальцьованого металу

по висоті перерізу у фактичному осередку деформації для широкої (b = const) і тонкої заготовок (смуги) [86].



Напрямок прокатки

Рисунок 4.18 – Схема розподілу швидкостей переміщення металу по висоті перерізу у фактичному осередку деформації (прокатка широкої і тонкої смуги): 1 – фактичний осередок деформації; 2 – геометричний осередок деформації; 3 – зона виникнення нерівномірності деформації; 4 – зона відставання; 5 – зона прилипання; 6 – зона випередження; 7 – зона загасання

Фактичний осередок деформації розділений на п'ять ділянок, з яких три середніх знаходяться в зоні контакту смуги з валками і дві крайніх – поза цією зоною [86].

Встановлено, що розподіл зон у фактичному осередку деформації вальцьованої заготовки (рис. 4.18) здійснений таким чином: 2 – 69,2 %; 3 – 16,5 %; 4 – 27,7 %; 5 – 26,15 %; 6 – 19,23 %; 7 – 14,2 %.

Епюри наочно показують нерівномірність переміщення металу по висоті перерізу в усіх зонах. Перша (по напряму вальцювання) зона виникнення нерівномірності швидкостей розташована до геометричного осередку деформації. До цієї зони метал переміщається з постійною по висоті перерізу швидкістю.

У першій зоні швидкість поверхневих шарів металу більша, оскільки у момент захоплення заготовки валками поверхневі шари металу переміщаються швидше, ніж внутрішні, отже, до геометричного осередку деформації вже виникає нерівномірне переміщення різних шарів металу. Першими деформуються поверхневі шари металу, а потім внутрішні. Епюра розподілу швидкостей переміщення металу по товщині смуги (висоті перерізів) в цій зоні увігнута, причому міра угнутості залежить від умов деформування.

У другій зоні (зона відставання) епюра розподілу швидкості увігнута більше, ніж в першій, оскільки при вході металу у валки різниця в швидкостях поверхневих і внутрішніх шарів металу збільшується. Поверхневі шари починають захоплювати за собою сусідні, і переміщення шарів поширюється всередину металу. Проте, на контактній поверхні швидкість металу менша, ніж швидкість валків, тут спостерігається проковзування металу відносно валків.

У зоні прилипання переміщення шарів металу також нерівномірно по товщині заготовки, але тут вже поверхневі шари металу починають відставати від внутрішніх. У цій зоні метал не прилипає до валків, але відсутнє його проковзування внаслідок рівності швидкості течії металу і швидкості обертання валків.

Епюри розподілу швидкостей переміщення вальцьованого металу по висоті перерізу в цій зоні показують нерівномірність руху металу по товщині заготовки. Якщо поверхневі шари металу переміщаються з швидкістю, рівною швидкості обертання валків, то проміжні шари дещо відстають від них (увігнуті ділянки епюри), а внутрішні випереджають їх (опукла ділянка епюри). При цьому середня швидкість руху металу дещо більше швидкості обертання валків.

У зоні випередження швидкість течії поверхневих, проміжних і внутрішніх шарів металу більше окружної швидкості валків, причому з максимальною швидкістю переміщаються внутрішні шари (епюра опукла). У зоні загасання швидкість металу поступово зменшується, і на деякій ділянці після виходу заготовки з контакту швидкості течії внутрішніх і зовнішніх шарів вирівнюються.

На рис. 4.19 представлена схема розподілу швидкостей переміщення металу по висоті перерізу при вальцюванні товстих широких смуг із заготовок алюмінієвих сплавів АК6, АК8, АК4-1. На відміну від попереднього випадку, швидкість проміжних шарів починає збільшуватися ще в зоні відставання (двоопукла епюра). Епюра зберігає свій вигляд до швидкості металу на виході з валків, причому в зонах прилипання і випередження опуклість збільшується. Такий розподіл швидкостей металу у фактичному осередку деформації характерний для вальцювання заготовок з невеликою мірою обтискання на перших проходах.

Проведені експерименти показали, що при вальцюванні заготовок різного перерізу із зміною умов деформування (міри обтискання, швидкості прокатки, коефіцієнта зовнішнього тертя та ін.) характер епюр зміниться, але нерівномірність швидкостей по товщині смуги і п'ять зон фактичного осередку деформації існуватимуть.

Характер розподілу деформацій стиску по товщині заготовок аналогічний характеру розподілу швидкостей переміщення металу.

Фактичний осередок деформації розділений, аналогічно тому, що розглядається вище, на п'ять ділянок, з яких три середніх знаходяться в зоні контакту смуги з валками і дві крайніх – поза цією зоною.

Встановлено, що розподіл зон у фактичному осередку деформації вальцьованої заготовки (рис. 4.19) в цьому випадку здійснений таким чином: 2 – 83,76 %, 3 – 16,23 %; 4 – 27,34 %; 5 – 25,63 %; 6 – 15,38 %; 7 – 14,1 %.

На рис. 4.20 представлені значення швидкості деформації, с <sup>-1</sup>, в поперечному перерізі осередку деформації при вальцюванні заготовок (сплав АК6, Ø14x150 мм, ступінь обтиснення 50 %).



Рисунок 4.19 – Схема розподілу швидкостей переміщення металу по висоті перерізу у фактичному осередку деформації (прокатка широкої товстої смуги): 1 – фактичний осередок деформації; 2 – геометричний осередок деформації; 3 – зона виникнення нерівномірності швидкостей; 4 – зона відставання; 5 – зона прилипання; 6 – зона випередження; 7 – зона загасання.



Рисунок 4.20 – Залежність швидкості деформації, с<sup>-1</sup>: в середині заготовки (1); в місці контакту заготовки з вальцювальними штампами (2); у поза контактних зонах (3) від температури нагріву штампів в поперечному перерізі середини геометричного осередку деформації.

На рис. 4.21, 4.22 представлені значення швидкості деформації, с<sup>-1</sup>, в поперечному і поздовжньому перерізах осередку деформації при вальцюванні заготовок (сплав АК6, Ø14 х 150 мм, ступінь обтиснення 50%), отримані у результаті імітаційного моделювання в універсальній програмній системі скінчено-елементного аналізу ANSYS.



Рисунок 4.21 – Швидкість деформації в поперечному перерізі заготовки в середині геометричного осередку деформації, с<sup>-1</sup> (сплав АК6, Ø14 х 150 мм, ступінь обтиснення 50 %).



Рисунок 4.22 – Швидкість деформації в поздовжньому перерізі заготовки в осередку деформації, с<sup>-1</sup> (сплав АК6, Ø14 х 150 мм, ступінь обтиснення 50 %).

Спотворення координатної сітки на торці зразків після вальцювання в овальному калібрі показано на рис. 4.23-4.24[6].



Рисунок 4.23 – Спотворення координатної сітки на торці зразка після вальцювання в овальному калібрі. Зразок 1. Сплав АК6, діаметр 50 мм,  $R_{\kappa}/R_{3} = 2,1$ 



Рисунок 4.24 – Спотворення координатної сітки на торці зразка після вальцювання в овальному калібрі. Зразок 2. Сплав АК6, діаметр 35 мм,  $R_{\kappa}/R_{3} = 2,2$ 

З порівняння рисунків 4.23 і 4.24 та результатів моделювання (рис. 4.5, 4.15-4.16) видно, що розв'язання задачі в області пластичних деформацій дає дійсну картину переміщення металу при вальцюванні заготовок круглого перерізу в овальних калібрах.

## 4.5 Дослідження напружено-деформованого стану матеріалу криволінійних заготовок

Процес вальцювання заготовок традиційно використовується для багато прохідного гарячого протягування вихідних заготовок і отримання фасонних виробів під наступне штампування на пресі або молоті. Розвиток процесів здійснювався, гарячого вальцювання заготовок переважно, 3 позицій дотримання граничних параметрів, обумовлених небезпекою втрати заготовкою стійкості, що призводить до браку. При штампуванні значної кількості деталей, особливо з поздовжньою кривою віссю, достатньо у якості заготівельної операції провести вальцювання за один прохід, усунувши необхідність нагрівання заготовок. Перешкоджає розвитку процесів холодного вальцювання про механіку недостатність інформації формоутворення криволінійних заготовок, НДС і деформовність їх матеріалу [87].

Для розширення технологічних можливостей процесу холодного вальцювання виробів з криволінійною віссю необхідно дослідити механіку формоутворення заготовок. Дослідження механіки формоутворення заготовок в процесах вальцювання показало, що їх формозмінення відбувається в умовах переважно плоскої деформації. Отже, криволінійність заготовки можна досягнути шляхом більшого видовження шарів металу з випуклої сторони, у порівнянні з ввігнутою стороною, що забезпечується більшим ступенем обтискування випуклої частини або надання часткам випуклої сторони більших швидкостей деформацій.

Одним із способів є вальцювання заготовок валками різних діаметрів [6]. У рамках визначеного способу розроблена методика розрахунку параметрів валків для виготовлення заготовки з віссю заданої кривизни

$$d_{k1}/d_{k2} = \upsilon_1/\upsilon_2 = (1-N)/(1+N), \tag{4.40}$$

де –  $d_{k1}$ ,  $d_{k2}$  – діаметри валків;  $\upsilon_1$  – швидкість виходу металу з валків на контакті заготовки з валком  $d_{k1}$ ;  $\upsilon_2$  – швидкість виходу металу з валків на контакті заготовки з валком  $d_{k2}$ ; N = h/D + h, де h – висота заготовки, D – діаметр внутрішньої бокової поверхні криволінійної заготовки.

На основі співвідношення (4.5) можна визначити радіуси зовнішніх поверхонь вальцювальних штампів, що мають рівчаки простої форми (овал, квадрат, ромб, круг та ін.)

$$r_1 = Pr_2 + 0.5(h_1 - m) \tag{4.41}$$

$$r_2 = (A - h_1)/(P + 1) + 0.5(h_1 - m)$$
(4.42)

де m – зазор між штампами,  $P = \frac{d_{k1}}{d_{k2}} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} = \frac{1-N}{1+N}$  – рівняння для визначення відношення середніх катаючих діаметрів, А – міжцентрова відстань.

З метою перевірки отриманих формул були проведені експериментальні дослідження з отримання криволінійних заготовок із заданим радіусом кривизни. Вальцювання заготовок зі сплаву АК6 при температурі 450 °C проводилось при різних ступенях деформації в овальних, квадратних, ромбічних калібрах, і в гладких валках, рис. 4.25 [6]. Порівняння розрахункових і експериментальних даних показало задовільний збіг.



Рисунок 4.25 – Заготовки з криволінійною віссю після вальцювання в гладких вальцювальних штампах.

Зазначений метод не дозволяє отримувати заготовки значної кривизни, тому нами був запропонований спосіб виготовлення криволінійних заготовок шляхом надання перемінного ступеня обтискування поперечному перерізу заготовки. За базову схему нами прийнято вальцювання заготовки на гладку бочку з наступним формуванням заготовки з криволінійною віссю [88].

Забезпечення криволінійності можливе за рахунок збільшення ступеня обтискування з випуклої сторони заготовки, тобто в результаті використання валків із заданою конусністю. Для фізичного моделювання гарячого процесу вальцювання криволінійних виробів нами були обрані заготовки з прямокутним поперечним перерізом. Оскільки, наявне обладнання передбачає жорсткий захват кінця заготовки з прямолінійним рухом без повороту в сторону вгнутості заготовки, то підвищене обтискування, різне за величиною, здійснювали на двох крайках заготовки (рис. 4.26).



Рисунок 4.26 – Заготовка, вальцьована з підвищеним обтискуванням на крайках

У результаті, заготовка вальцювалася на форму близьку до прямолінійної, проте розрахунок напружено-деформованого стану дозволяє визначати його вплив на викривлення заготовки.

Напружено-деформований стан матеріалу на поверхні заготовки визначали експериментально методом сіток. Вимірювання координат вузлів сітки до і після деформування проводили на інструментальному мікроскопі з точністю  $\pm$  0,01 мм. Крім того, вимірювали товщину заготовки в вузлах сітки до і після вальцювання.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що найбільшими за величиною є деформації поздовжня  $e_x > 0$  і деформація по товщині заготовки  $e_z < 0$ . Деформація по ширині заготовки  $e_y$  є незначною, тому при розрахунках застосовували математичний апарат теорії пластичності, що розроблений для плоскої деформації [89].

Для визначення технологічних можливостей і отримання основних закономірностей напружено-деформованого стану криволінійних заготовок при формуванні вальцюванням нами проведено імітаційне моделювання запропонованого способу, який реалізується шляхом перемінного обтискування заготовки по її ширині (рис. 4.27).



Рисунок 4.27 – Схема вальцювання заготовки конічними валками а) та форма поперечного перетину вальцьованої ділянки б)

Використання конічних валків, при паралельному розташуванні їх поздовжніх осей, дозволяє змінювати швидкості деформацій і ступінь обтиснення по ширині заготовки, забезпечуючи цим її криволінійність.

На наведених рисунках 4.28 – 4.31 показано характер формозмінення заготовки та інші параметри НДС, отримані моделюванням.



Рисунок 4.28 – Переміщення часток матеріалу криволінійної заготовки на різних стадіях вальцювання

За результатами моделювання визначені значення показника напруженого стану на вільних бічних (зовнішній і внутрішній) поверхнях криволінійної заготовки для різних ступенів обтискування вальцюванням (рис. 2.17) та побудовано діаграми пластичності алюмінієвих сплавів. За діаграмами пластичності та шляхами деформації точок найбільш небезпечних зон, з використанням відомих критеріїв деформовності, можливо визначати граничні деформації (рис. 2.18).



Рисунок 4.29 – Інтенсивність деформацій матеріалу криволінійної заготовки на різних стадіях вальцювання



Рисунок 4.30 – Інтенсивність швидкостей деформацій в пластичній зоні вальцьованої заготовки



Рисунок 4.31 – Інтенсивність напружень зон криволінійної заготовки на різних стадіях вальцювання

Постійність показника напруженого стану на вільних бічних поверхнях заготовки впродовж процесу вальцювання дещо спрощує оцінку деформовності алюмінієвих сплавів. Використаний ресурс пластичності при цьому можна визначити як відношення накопиченої інтенсивності деформацій, до її граничного значення, отриманого в точці перетину шляху деформування і відповідної діаграми пластичності.

Використаний ресурс пластичності та граничні деформації для точок найбільш небезпечних зон бічних поверхонь заготовки отримані із використанням критерію деформовності В. А. Огороднікова [37]. При розрахунках НДС пластичної зони вальцьованої заготовки застосовували методику, основану на методах ліній току, функцій напружень і теорії *R*функцій. При цьому прямолінійну заготовку розрізали в поздовжньому напрямі, в площині розрізу наносили паралельні лінії, після чого половинки з'єднували, а після вальцювання і роз'єднання вимірювали координати точок ліній току в зоні деформації. На рис. 4.32 показано отриманий характер розподілу НДС на ділянці заготовки, розташованій між валками [90].

Показник напруженого стану в зоні деформації змінюється від величин  $\eta = 1$  на вході в контакт з валками, до величин під валками  $\eta = -3...-5$ .





Рисунок 4.32 – Характер розподілу НДС в зоні деформації поздовжнього перерізу середини заготовки при вальцюванні Рисунок 4.33 – Розподіл показника  $\eta_c$  по площині прямолінійної заготовки при вальцюванні

Значення величини середнього за прохід показника  $\eta_c$  в площині деформованої прямолінійної заготовки показано на рис. 4.33. Для досліджених сплавів його величина становить  $\eta_c = -1, 2... - 1, 5$ , причому більші за абсолютною величиною значення відповідають матеріалам з діаграмами пластичності, що мають слабку залежність від показника  $\eta$ .

Дослідженнями встановлено, що частки матеріалу вільної поверхні зміна НДС на першому етапі заготовки, яких описується шляхами 2.18 деформування, представленими на рис. на другому етапі деформуватимуться за схемою НДС, поданою на рис. 4.32, 4.33. Ця схема для поздовжнього перерізу середини заготовки може бути представлена шляхом деформування, який описується рівнянням:

$$e_{\mu} = -0.071\eta + 0.5117 \tag{4.43}$$

А ті частки, що на першому етапі деформувалися при «м'яких» схемах

НДС (рис. 4.32, 4.33), на другому етапі підлягатимуть «жорстким» умовам деформування. При цьому спостерігається немонотонне деформування.

#### Висновки до розділу 4

1. Шляхом сумісного розв'язання рівнянь рівноваги, умови пластичності в зонах плоскої деформації і рівнянь зв'язку компонент тензора напружень та тензора швидкості деформацій отримано вираз для визначення показника напруженого стану в зоні деформації при вальцюванні заготовок.

2. У результаті проведеного дослідження НДС циліндричних заготовок методом імітаційного моделювання при вальцюванні встановлено його суттєву неоднорідність в зоні деформування. Найбільш жорстким НДС спостерігається на вільних бічних поверхнях заготовки.

3. Отримано залежності між відносним стисненням заготовки при вальцюванні та інтенсивністю деформацій на її бічній поверхні.

4. Досліджено НДС і характер розподілу температур в зоні деформування при гарячому вальцюванні. Встановлено, що розподіл температури відповідає характеру розподілу інтенсивності деформації, яка викликана геометричним співвідношенням форми калібру і вальцьованої заготовки.

5. Розроблено процес виготовлення вальцюванням криволінійних заготовок на основі керування їх деформованим станом шляхом використання валків із заданою конусністю.

6. За окремими результатами розділу опубліковані роботи [82], [84]-[90].

# РОЗДІЛ 5 ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛІВ. РОЗРОБЛЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВАЛЬЦЮВАННЯ ЗАГОТОВОК

#### 5.1 Оцінка деформовності матеріалу заготовок при вальцюванні

На рис. 2.17, 2.18 надано діаграми пластичності декількох алюмінієвих сплавів та шляхи деформування точок заготовки на зовнішній і внутрішній поверхнях циліндричного зразка під час процесу вальцювання на клин. З метою оцінки деформовності заготовки необхідно застосувати один із критеріїв деформовності. Для побудови математичної моделі потрібно представити шляхи деформування в аналітичному вигляді.

Вказані шляхи деформування не є однозначними функціями типу  $e_{\mu} = e_{\mu}(\eta)$ , проте їх можна представити однозначними функціями виду:

$$\eta = \eta(e_u). \tag{5.1}$$

Схематичний графік функції, що апроксимує вказані шляхи деформування, показано на рис. 5.1, а її структура має такий вигляд:

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 + a_1 \cdot e_u^s, & e_i \le e_1 \\ \eta_1 + a \cdot \sin(\pi \cdot \omega \cdot (e_u - e_1)), & e_i > e_1 \end{cases},$$
(5.2)

де η<sub>0</sub> – значення показника напруженого стану на початку деформування; (e<sub>1</sub>, η<sub>1</sub>) – координати точки переходу від першої до другої стадії деформування; a<sub>1</sub>, a, s, ω – параметри функції.

Із умови неперервності функції (5.2) в точці  $\eta = \eta_1$  випливає співвідношення:



Накопичена пластична деформація

Рисунок 5.1 – Схематичний графік функції, що апроксимує шляхи деформування точок зовнішньої та внутрішньої поверхонь заготовки під час процесу вальцювання на клин

з урахуванням якого математична модель шляхів деформування точок зовнішньої та внутрішньої поверхонь заготовки під час процесу вальцювання на клин матиме вигляд:

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 + \left(\frac{e_u}{e_1}\right)^s \cdot \left(\eta_1 - \eta_0\right), & e_i \le e_1 \\ \eta_1 + a \cdot \sin\left(\pi \cdot \omega \cdot \left(e_u - e_1\right)\right), & e_i > e_1 \end{cases}$$
(5.4)

Використаємо критерій В. А. Огороднікова:

169

$$\Psi\left(\overline{e}_{u}\right) = \int_{0}^{\overline{e}_{u}} \left(1 + 0, 2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{d\eta}{de_{u}}\right)\right) \cdot \frac{e_{u}^{0,2 \cdot \operatorname{arctg}}\left(\frac{d\eta}{de_{u}}\right)}{e_{p}\left(\eta\right)^{1 + 0, 2 \cdot \operatorname{arctg}}\left(\frac{d\eta}{de_{u}}\right)} de_{u} < 1, \qquad \overline{e}_{u} < e_{p}, \quad (5.5)$$

$$\Psi\left(e_{p}\right) = \int_{0}^{e_{p}} \left(1 + 0, 2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{d\eta}{de_{u}}\right)\right) \cdot \frac{e_{u}^{0,2 \cdot \operatorname{arctg}}\left(\frac{d\eta}{de_{u}}\right)}{e_{p}\left(\eta\right)^{1 + 0,2 \cdot \operatorname{arctg}}\left(\frac{d\eta}{de_{u}}\right)} de_{u} = 1, \quad (5.6)$$

де похідну  $\frac{d\eta}{de_u}$  знаходимо диференціюванням (5.4)

$$\frac{d\eta}{de_{u}} = \begin{cases} \frac{s}{e_{1}} \cdot \left(\frac{e_{u}}{e_{1}}\right)^{s-1} \cdot \left(\eta_{1} - \eta_{0}\right), & e_{i} \leq e_{1} \\ \pi \cdot a \cdot \omega \cdot \cos\left(\pi \cdot \omega \cdot \left(e_{u} - e_{1}\right)\right), & e_{i} > e_{1} \end{cases}$$
(5.7)

Отже, з урахуванням (5.4), (5.7) критерій (5.6) набуває вигляду: при  $e_p \leq e_1$ 

$$\Psi(e_{p}) = \int_{0}^{e_{p}} h_{1}(s, e_{1}, \eta_{0}, \eta_{1}, e_{u}) \cdot \frac{e_{u}^{h_{1}(s, e_{1}, \eta_{0}, \eta_{1}, e_{u})-1}}{e_{p} \left[\eta_{0} + \left(\frac{e_{u}}{e_{1}}\right)^{s} \cdot (\eta_{1} - \eta_{0})\right]^{h_{1}(s, e_{1}, \eta_{0}, \eta_{1}, e_{u})} \cdot de_{u} = 1,$$
(5.8)

при  $e_p > e_1$ 

$$\Psi\left(e_{p}\right) = \int_{0}^{e_{1}} h_{1}\left(s, e_{1}, \eta_{0}, \eta_{1}, e_{u}\right) \cdot \frac{e_{u}^{h_{1}\left(s, e_{1}, \eta_{0}, \eta_{1}, e_{u}\right) - 1}}{e_{p}\left[\eta_{0} + \left(\frac{e_{u}}{e_{1}}\right)^{s} \cdot \left(\eta_{1} - \eta_{0}\right)\right]^{h_{1}\left(s, e_{1}, \eta_{0}, \eta_{1}, e_{u}\right)} \cdot de_{u} + \int_{e_{1}}^{e_{p}} h_{2}\left(s, e_{1}, \eta_{0}, \eta_{1}, e_{u}\right) \cdot \frac{e_{u}^{h_{2}\left(s, e_{1}, \eta_{0}, \eta_{1}, e_{u}\right) - 1}}{e_{p}\left[\eta_{0} + \left(\frac{e_{u}}{e_{1}}\right)^{s} \cdot \left(\eta_{1} - \eta_{0}\right)\right]^{h_{2}\left(s, e_{1}, \eta_{0}, \eta_{1}, e_{u}\right)} \cdot de_{u} = 1,$$
(5.9)

де крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні надана апроксимацією [91]

$$e_{p}(\eta) = e_{p}(\eta = 0) \cdot \exp\left[-\eta \cdot \ln\left(\frac{(1-\eta) \cdot e_{p}(\eta = -1)}{2 \cdot e_{p}(\eta = 0)} + \frac{(1+\eta) \cdot e_{p}(\eta = 0)}{2 \cdot e_{p}(\eta = 1)}\right)\right], \quad (5.10)$$

через h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub> позначено функції, що залежать від низки параметрів

$$h_{1}(s,e_{1},\eta_{0},\eta_{1},e_{u}) = 1 + 0,2 \cdot arctg\left(\frac{s}{e_{1}} \cdot \left(\frac{e_{u}}{e_{1}}\right)^{s-1} \cdot \left(\eta_{1}-\eta_{0}\right)\right), \qquad (5.11)$$

$$h_2(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) = 1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\pi \cdot a \cdot \omega \cdot \cos\left(\pi \cdot \omega \cdot \left(e_u - e_1\right)\right)\right).$$
(5.12)

 $e_p(\eta = -1), e_p(\eta = 0), e_p(\eta = 1)$  – гранична пластична деформація за умов рівномірного стиску, зсуву та розтягу відповідно.

Результати розрахунків зображено на рис. 5.2.



Показник напруженого стану

Рисунок 5.2 – Розрахункова гранична деформація матеріалу небезпечної зони заготовки (сплав АМГ) під час процесу вальцювання на клин. Розрахунок за

(5.9÷5.12): 
$$e_p(\eta = -1) = 2,2; e_p(\eta = 0) = 1,5; e_p(\eta = 1) = 1,1; \eta_1 = 1,3;$$
  
 $e_1 = 0,08; s = 0,4; a = 0,1; \omega = 10.$ 

Обчислення здійснювали за допомогою розробленої програми в середовищі системи комп'ютерної математики Maple (Додаток Г).

На рис. 5.3 зображено аналогічні результати для інших матеріалів.



Рисунок 5.3 – Розрахункова гранична деформація матеріалу небезпечної зони заготовок із різних матеріалів під час процесу вальцювання на клин.

Із отриманих результатів випливає, що для різних матеріалів гранична пластична деформація в небезпечній зоні заготовки відрізняється від граничної пластичної деформації за умов розтягу на нехтовно малу величину, що не перевищує похибки розсіювання експериментальних даних. Висновок зроблено за припущенням про незалежність від матеріалу заготовки шляху деформування точок небезпечної зони заготовки.

Отже, граничну до руйнування деформацію  $\varepsilon_*$  для матеріалу вальцьованої заготовки можна визначати за відомими довідковими значеннями відносного звуження  $\psi_u$ , як  $e_* = ln \frac{1}{1 - \psi_u}$ .

## 5.2 Оцінка деформовності матеріалу заготовок при вальцюванні за схемами в два і більше переходів

У результаті дослідження механіки формоутворення заготовок при вальцюванні нами розроблено спосіб виготовлення криволінійних заготовок двохетапним вальцюванням. Відповідно до способу, вальцювання на першому етапі здійснюється на гладку бочку конічними валками (рис. 5.4), а на другому етапі проводиться вальцювання заготовки в калібрах циліндричних валків (рис. 5.5).



Рисунок 5.4 – Схема вальцювання криволінійних заготовок конічними валками: а) вихідна заготовка, б) вигляд заготовки в процесі вальцювання

Таким чином, забезпечення криволінійності заготовки на першому етапі реалізується за рахунок збільшення ступеня її обтискування з випуклої сторони,

у результаті використання валків із заданою конусністю та зростання діаметра конічного валка в поперечному перерізі зони деформації.

На другому етапі заготовка повертається на  $90^{0}$  і вальцюється в калібрах циліндричних валків. При цьому 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 [92].



Рисунок 5.5 – Схема вальцювання криволінійної заготовки в калібрах циліндричних валків: 1 – криволінійна заготовка після попереднього етапу вальцювання; 2 – циліндричний валок з калібром

При виготовленні криволінійних заготовок холодним вальцюванням особливо актуальним постає питання оцінки деформовності матеріалу заготовок, а отже встановлення граничної степені обтискування та механічних характеристик матеріалу виготовлюваних виробів. Очевидно, що зі зміною етапів вальцювання немонотонно змінюється НДС часток матеріалу заготовки, що вносить додаткові труднощі в процес оцінки деформовності матеріалу.

Незважаючи на простоту співвідношення (4.43), спроба застосування тензорної моделі для описання процесу зміни НДС матеріалу, що приводить до вказаного шляху деформування, показала необхідність прийняття низки припущень для отримання однозначних результатів.

Представимо шлях деформування (4.43) в більш загальному та зручному для подальших побудов та позначень вигляді

$$\eta(e_{u}) = \frac{e_{u}(\eta) - e_{u}(\eta = 0)}{e_{u}(\eta = 1) - e_{u}(\eta = 0)},$$
(5.13)

де  $e_u(\eta = 1), e_u(\eta = 0)$  – величини накопиченої деформації згідно лінійної апроксимації шляху деформування, що відповідають вказаним значенням показника напруженого стану.

Представимо модель деформування певних часток матеріалу заготовки у вигляді процесу деформування, що складається з чотирьох окремих ланок. Для цього випадку із застосуванням тензорно-лінійної моделі [93] отримаємо

$$\Psi_{ij} = n \cdot \sum_{k=1}^{4} \int_{(e_u)_{k-1}}^{(e_u)_k} \frac{e_u^{n-1}}{e_{*c}^n \left[ \eta(\varepsilon_u) \right]} \cdot \beta_{ij}(e_u) \cdot de_u , \qquad (5.14)$$

де  $e_{*c}(\eta)$  – крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні;  $(e_u)_{k-1}, (e_u)_k$  – величина накопиченої деформації відповідно на початку та в кінці *k*-ої ланки деформування  $((e_u)_0 = 0, (e_u)_k < e_*); \beta_{ij}$  – напрямний тензор приростів деформацій

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{de_{ij}}{de_u}, \qquad (5.15)$$

*de<sub>ij</sub>* – компоненти тензора приростів пластичних деформацій; *de<sub>u</sub>* – інтенсивність приростів пластичних деформацій; *n*>0 – матеріальна константа.

Надалі вважатимемо, що властивості матеріалу заготовки описуються визначальними співвідношеннями теорії течії:

$$de_{ij} = \frac{3}{2} \cdot \frac{e_u}{\sigma_u} \cdot s_{ij} = \frac{3}{2} \cdot \frac{e_u}{\sigma_u} \cdot \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma\right), \qquad (5.16)$$

де σ<sub>ij</sub>, s<sub>ij</sub> – компоненти тензора та девіатора напружень відповідно; δ<sub>ij</sub> – символ Кронекера:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$
(5.17)

У цьому випадку компоненти напрямних тензорів приростів деформацій (5.15) та напружень

$$\beta_{ij}^{(\sigma)} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{s_{ij}}{\sigma_u}$$
(5.18)

збігаються [93], [94].

Розглянемо кожну із чотирьох ланок процесу деформування окремо[95]. Ланка 1 – напружений стан одновісного розтягу:

$$\eta = 1,$$

$$0 = (e_u)_0 \le e_u(\eta) \le (e_u)_1 = e_u(\eta = 1)$$
(5.19)

Відповідно до [96], [52]:

$$\beta_{ij}(e_u) = \beta_{ij}^{(1)} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{6}}{3} & 0 & 0\\ 0 & -\frac{\sqrt{6}}{6} & 0\\ 0 & 0 & -\frac{\sqrt{6}}{6} \end{bmatrix}.$$
 (5.20)

Тоді, згідно (5.14) отримаємо:

$$\psi_{ij}\left(e_{u}\right) = \left(\frac{e_{u}}{e_{*c}\left(\eta=1\right)}\right)^{n} \cdot \beta_{ij}^{(1)}, \quad 0 \le e_{u} \le \left(e_{u}\right)_{1}.$$
(5.21)

Ланка 2 – напружений стан одновісного розтягу з крученням:

$$0 \le \eta \le 1, e_{u}(\eta = 1) \le e_{u}(\eta) \le (e_{u})_{2} = e_{u}(\eta = 0).$$
(5.22)

3 урахуванням [93]-[ 94], [96],[97] визначаємо, що

$$\beta_{ij}(e_{u}) = \beta_{ij}^{(2)}(e_{u}) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot \eta(e_{u}) & \sqrt{1 - \eta^{2}(e_{u})} & 0\\ \sqrt{1 - \eta^{2}(e_{u})} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \eta(e_{u}) & 0\\ 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \eta(e_{u}) \end{bmatrix}.$$
(5.23)

Тоді, згідно вигляду (5.14):

$$\psi_{ij}\left(e_{u}\right) = \left(\frac{e_{u}\left(\eta=1\right)}{e_{*c}\left[\eta\left(\varepsilon_{u}\right)\right]}\right)^{n} \cdot \beta_{ij}^{(1)} + n \cdot \int_{e_{u}\left(\eta=1\right)}^{e_{u}} \frac{e_{u}^{n-1}}{e_{*c}^{n}\left[\eta\left(e_{u}\right)\right]} \cdot \beta_{ij}^{(2)}\left(e_{u}\right) \cdot de_{u}, \qquad (5.24)$$
$$e_{u}\left(\eta=1\right) \le e_{u} \le \left(e_{u}\right)_{2} = e_{u}\left(\eta=0\right)$$

Ланка 3 – напружений стан одновісного стиску з крученням

$$-1 \le \eta \le 0, e_{u}(\eta = 0) \le e_{u}(\eta) \le (e_{u})_{3} = e_{u}(\eta = -1).$$
(5.25)

За аналогією з напруженим станом розтяг з крученням, отримаємо

$$\beta_{ij}(e_{u}) = \beta_{ij}^{(3)}(e_{u}) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{bmatrix} \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot \eta(e_{u}) & \sqrt{1 - \eta^{2}(e_{u})} & 0\\ \sqrt{1 - \eta^{2}(e_{u})} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \eta(e_{u}) & 0\\ 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \eta(e_{u}) \end{bmatrix}.$$
(5.26)

Згідно з виглядом (5.14)

$$\psi_{ij}(e_{u}) = \psi_{ij}(e_{u}(\eta = 0)) + n \cdot \int_{e_{u}(\eta = 0)}^{e_{u}} \frac{e_{u}^{n-1}}{e_{*c}^{n} [\eta(e_{u})]} \cdot \beta_{ij}^{(3)}(e_{u}) \cdot de_{u}, \qquad (5.27)$$
$$e_{u}(\eta = 0) \le e_{u} \le (e_{u})_{3} = e_{u}(\eta = -1)$$

Ланка 4 – напружений стан одновісного стиску та всебічний рівномірний стиск

$$-5 \le \eta \le -1,$$

$$e_{u}(\eta = -1) \le e_{u}(\eta) \le (e_{u})_{4} = e_{u}(\eta = -5),$$

$$\beta_{ij}(e_{u}) = \beta_{ij}^{(4)}(e_{u}) = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot \eta(e_{u}) & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{6}}{6} \cdot \eta(e_{u}) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\sqrt{6}}{6} \cdot \eta(e_{u}) \end{bmatrix}.$$
(5.28)
$$(5.29)$$

Відповідно до вигляду (5.14)

$$\Psi_{ij}(e_{u}) = \Psi_{ij}(e_{u}(\eta = -1)) + n \cdot \int_{e_{u}(\eta = -1)}^{e_{u}} \frac{e_{u}^{n-1}}{e_{*c}^{n} [\eta(e_{u})]} \cdot \beta_{ij}^{(4)}(e_{u}) \cdot de_{u}, \qquad (5.30)$$
$$e_{u}(\eta = -1) \le e_{u} \le (e_{u})_{4} = e_{u}(\eta = -5)$$

$$\psi_u = \psi_{ij} \cdot \psi_{ij}, \qquad 0 \le \psi_u \le 1. \tag{5.31}$$

У вихідному стані  $\psi_u(e_u = 0) = 0$ , а досягнення граничного стану визначається умовою

$$\Psi_u(e_u = e_*) = 1.$$
 (5.32)

Під час деформування на першій ланці згідно з (5.21), (5.31) отримаємо:

$$\Psi_{u}(e_{u}) = \left(\frac{e_{u}}{e_{*_{c}}(\eta=1)}\right)^{2 \cdot n}, \quad 0 \le e_{u} \le (e_{u})_{1}.$$
(5.33)

Тут враховано [52], [93], [94], що

$$\beta_{ij}^{(1)} \cdot \beta_{ij}^{(1)} = 1.$$
 (5.34)

Стосовно деформування на другій ланці отримати скінчену залежність, що аналогічна (5.33) вже не вдається. Тому в цьому випадку із застосуванням методу числового інтегрування знаходили значення кожної компоненти девіатора пошкоджень

$$\psi_{11}(e_{u}) = \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot \left[ \left( \frac{e_{u}(\eta = 1)}{e_{*c}(\eta = 1)} \right)^{n} + n \cdot \int_{e_{u}(\eta = 1)}^{e_{u}} \frac{e_{u}^{n-1}}{e_{*c}^{n} \left[ \eta(e_{u}) \right]} \cdot \eta(e_{u}) \cdot de_{u} \right], \quad (5.35)$$

де  $\eta(e_u)$  визначається співвідношенням (5.14); крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні представлена апроксимацією [97]

$$e_{*_{c}}(\eta) = e_{*_{c}}(\eta = 0) \cdot \left(\frac{e_{*_{c}}(\eta = 1)}{e_{*_{c}}(\eta = -1)}\right)^{\frac{\eta}{2}} \cdot \left(\frac{e_{*_{c}}(\eta = 1) \cdot e_{*_{c}}(\eta = -1)}{e_{*_{c}}^{2}(\eta = 0)}\right)^{\frac{\eta^{2}}{2}}, \quad (5.36)$$

з урахуванням якої знаменник підінтегральної функції у співвідношенні (5.35) має вигляд

$$e_{*c}^{n} \left[ \eta(e_{u}) \right] = \left[ e_{*c} \left( \eta = 0 \right) \cdot \left( \frac{e_{*c} \left( \eta = 1 \right)}{e_{*c} \left( \eta = -1 \right)} \right)^{\frac{e_{u}(\eta) - e_{u}(\eta = 0)}{2\left[e_{u}(\eta = 1) - e_{u}(\eta = 0)\right]}} \times \left( \frac{e_{*c} \left( \eta = 1 \right) \cdot e_{*c} \left( \eta = -1 \right)}{e_{*c}^{2} \left( \eta = 0 \right)} \right)^{\left( \frac{e_{u}(\eta) - e_{u}(\eta = 0)}{2\left[e_{u}(\eta = 1) - e_{u}(\eta = 0)\right]}\right)^{2}} \right]^{n}.$$
(5.37)

### Аналогічним чином визначаємо інші компоненти девіатора пошкоджень

$$\psi_{22}(e_{u}) = \psi_{33}(e_{u}) = -\frac{\sqrt{6}}{6} \cdot \left[ \left( \frac{e_{u}(\eta = 1)}{e_{*_{c}}(\eta = 1)} \right)^{n} + n \cdot \int_{e_{u}(\eta = 1)}^{e_{u}} \frac{e_{u}^{n-1}}{e_{*_{c}}^{n} \left[ \eta(e_{u}) \right]} \cdot \eta(e_{u}) \cdot de_{u} \right].$$

(5.38)

$$\Psi_{12}(e_{u}) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot n \cdot \int_{e_{u}(\eta=1)}^{e_{u}} \frac{e_{u}^{n-1}}{e_{*c}^{n} \left[\eta(e_{u})\right]} \cdot \sqrt{1 - \eta^{2}(e_{u})} \cdot de_{u}.$$
(5.39)

Всі обчислення здійснювали за допомогою розробленої програми в середовищі системи комп'ютерної математики Maple. Результати розрахунків представлено на рис. 5.6.


Рисунок 5.6 – Шлях деформування (1 – розрахунок за (4.43)); крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні (2 – розрахунок за (5.36)); накопичення пошкоджень на ланці 1 (3 – розрахунок за (5.33)) та 2 (4÷14 – розрахунок за (5.33), (5.38), (5.39), (5.31)); масштабоване граничне значення інтенсивності пошкоджень (15 – розрахунок за  $\psi = 0, 4$ ).

Для поліпшення наочності графіка величину пошкоджень зображували з масштабним коефіцієнтом 0,4 від розрахункових значень за вказаними формулами.

Розрахунки здійснювали для кривої граничних деформацій при стаціонарному деформуванні, що має місце для сталі ЭП866 [1].

Для визначення величини параметра *n* необхідні результати експериментів при немонотонному деформуванні [52], [1]. У нашому випадку точне значення параметра *n* невідоме. Тому, а також з метою дослідження впливу принципу підсумовування пошкоджень на розрахункові значення деформовності заготовки моделювання здійснювали для різних значень вказаного параметра: крива 4 на рис. 5.6 відповідає значенню *n*=1; крива 14 –

*n*=0,5. Останнє значення (див. співвідношення (5.33)) відповідає лінійному принципу накопичення пошкоджень. Проте результати розрахунків 3a розробленою моделлю, що базується на застосуванні тензорного представлення збігає результатами пошкодження макрочастинки, 3 відомої моделі В. Л. Колмогорова тільки на першій ланці, де має місце просте деформування. На другій ланці побудована нами модель враховує ефекти, ЩО не відображаються моделлю В. Л. Колмогорова.

Закономірності зміни величини пошкоджень макрочастинки матеріалу, зображені на рис. 5.6 показують, що найбільш інтенсивно пошкодження накопичуються під час деформування на першій ланці, а деформування на другій ланці супроводжуються різким зниженням швидкості накопичення пошкоджень з ростом деформації. Це пояснюється «пом'якшенням» схеми напруженого стану впродовж деформування на другій ланці, та чутливістю граничних деформацій досліджуваної сталі ЭП866 до схеми напруженого стану.

На останній стадії другої ланки швидкість накопичення пошкоджень знижується до значень, близьких до нуля. Це позбавляє нас необхідності дослідження накопичення пошкоджень під час третьої та четвертої ланок.

Зображення закономірностей накопичення пошкоджень на рис. 5.6 має недолік, пов'язаний з відсутністю можливості наочного порівняння швидкості накопичення пошкоджень впродовж перших двох ланок для різних значень параметра *n*, що характеризує характер підсумовування. Тому на рис. 5.7 закономірності накопичення пошкоджень представлено в залежності від величини накопиченої деформації.



Рисунок 5.7 – Накопичення пошкоджень з ростом накопиченої деформації під час деформування на першій (червоні лінії) та другій (сині лінії) ланках; номери кривих такі ж самі, як і на рис. 5.6

Для досліджуваних траєкторій найбільш жорсткий прогноз граничних деформацій відповідає лінійному принципу накопичення пошкоджень. Збільшенню параметра *n*, що характеризує збільшення нелінійного характеру накопичення пошкоджень, відповідає зменшення швидкості накопичення пошкоджень на початковій стадії першої ланки. А з подальшим ростом накопиченої деформації швидкість накопичення пошкоджень стає практично інваріантною до параметра *n*.

5.3 Розроблення і дослідження технологічних процесів вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів

## 5.3.1 Аналіз методів підготовки заготовок під штамповку

Аналіз існуючих технологій виготовлення штампованих поковок з мірних заготовок алюмінієвих сплавів, підготовлених операцією протягування на кувальних молотах, висадкою потовщень на ГКМ засвідчив високу трудомісткість, підвищену витрату металу, низьку якість поверхні, тривалий цикл виготовлення штампованих поковок і відповідно високу вартість деталей [98].

Процес вальцювання на підприємствах машинобудівної промисловості, впроваджувався на заміну: підготовки заготовок під штампування на кувальних молотах; операцій, які виконувались набором потовщень на горизонтальнокувальних машинах (ГКМ) та використання мірних заготовок з великою витратою металу в облой при штампуванні поковок подовженої форми.

Якість поверхні після підготовки заготовок куванням не дозволяє безпосередньо їх штампувати через сліди бойка на поверхні заготовок і сходинок неправильної форми в місцях переходів від більшого перерізу до меншого (рис. 5.8). Перед штампуванням таких заготовок перераховані дефекти необхідно видалити зачисткою на наждачному камені і шарошками.

При куванні деформація локалізується в периферійних зонах заготовки. Це спричиняє утворенню різнозернистої структури з яскраво вираженою нерівномірністю (рис. 5.9), що знижує механічні властивості виробу. Крім того, різнозерниста структура сприяє утворенню мікро- і макротріщин при великих обтисненнях і, в поєднанні з високими швидкостями деформування, прискорює процес руйнування.

Після висаджування потовщень на ГКМ також з'являються дефекти: облой по торцю і по лінії роз'єму матриці, гофри на ділянках переходу від висадженої голівки до початкового перерізу прутка (рис. 5.10).

Наявність у технологічному процесі операції зачистки після підготовки заготовок під штампування куванням і висадкою потовщень на ГКМ, значно подовжує цикл виготовлення штампованих поковок і відповідно збільшує вартість деталі.



Рисунок 5.8– Заготовки під штамповку після протягування на кувальному молоті



Рисунок 5.9 – Макроструктура заготовок, підготовлених на кувальних молотах



Рисунок 5.10 – Заготовки під штамповку після висаджування потовщень на ГКМ

# 5.3.2 Штампування вальцьованих заготовок з подовженою віссю

Для розробки технологічного процесу штампування поковок з алюмінієвих сплавів із подовженою віссю [99], необхідно керуватися знаннями про особливості гарячого деформування цих сплавів, які описано в п. 2.1.

Деталі з подовженою віссю і великим перепадом поперечних перерізів уздовж осі, що виготовляються штампуванням з мірних заготовок, мають високий по товщині місток і великий по ширині облой, що призводить до підвищеної витрати металу (рис. 5.11).



Рисунок 5.11 – Штампована поковка "Гойдалка", виготовлена з мірної заготовки за два штампування з проміжними операціями обрізання облою, травлення, зачистки, нагріву

Для дослідження вальцювання як підготовчої операції до штампування вибирались заготовки з алюмінієвих сплавів АК4, АК4-1, АК6, АК8, АМг-1, АМг-2, АМг-6, АМЦ, наявні в номенклатурі деталей подовженої форми, які широко застосовуються для виготовлення елементів авіаційних конструкцій в ковальсько-штампувальному цеху ДП КиАЗ «Авіант».

При освоєнні вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів під наступне штампування використовувалися вальцювальні штампи з калібрами, представленими на рис. 5.12 і розмірами в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Розміри калібрів для вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів діаметром 25мм, довжиною 150 мм

Овальний калібр				Квадратний калібр									
h <sub>k</sub> ,	<b>b</b> <sub>k</sub> ,	R,	m,	r,	F,	m,	h <sub>k</sub> ,	b <sub>k</sub> ,	C,	$\mathbf{h}'_{\mathbf{k}}$ ,	$\mathbf{r}_{1}$ ,	r <sub>2</sub> ,	F,
MM	Мм	MM	MM	MM	$MM^2$	MM	MM	ММ	MM	MM	MM	MM	$MM^2$
7,9	41,8	57,5	1,0	3	214	1,0	15,2	16,7	11,8	16,7	1,8	1,2	137



Рисунок 5.12 – Калібри для вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів а) овальний калібр, б) квадратний калібр

Заготовки нагрівались в електричній печі опору з витримкою 35 хвилин після підвищення температури в печі до 470 °С і вальцювались за схемою «круг – овал – квадрат» на кувальних валках моделі С162А при різних степенях обтискання.

Вальцьовані заготовки термічно оброблялися за технологією, приведеною в табл. 5.2 [100].

Тип нагріва– льної печі	Вид термооб– робки	Сплав	Температу– ра початково- го відліку часу, °С	Температу- ра термообро– бки, °С	Час витрим- ки	Середови ще охолод- ження
ПН – 32	Загартува ння	АК6	500	505 - 525	50 хвил.	Вода
ПН – 32	Старіння			I60 – I75	3,4 – 4 г.	Повітря

Таблиця 5.2 – Технологія термічної обробки вальцьованих заготовок із сплаву АК6

На рис. 5.13 представлена штампована поковка "Гойдалка", виготовлена з вальцьованої заготовки за одне штампування, а на рис. 5.14 – готова деталь після видалення облою.





вальцьована заготовка; б) штампована поковка.



Рисунок 5.14 – Деталь «Гойдалка»

На рис. 5.15 показана штампована поковка деталі "Корпус"





а)
 б)
 Рисунок 5.15 – Штампована поковка деталі "Корпус". Сплав АК6 [100].
 а) вальцьована заготовка, б) штампована поковка

Відштамповані з вальцьованих заготовок поковки термічно оброблялися і проходили лабораторні випробування в лабораторії ДП КиАЗ «Авіант». З кожного найменування відбирались декілька екземплярів вальцьованих заготовок та штампованих з них поковок. Досліджувались механічні властивості, макро-, мікроструктура.

Видимих недоліків: затисків, тріщин, перетискування і обривів волокна та інших порушень суцільності структури в результаті візуального огляду і аналізу макроструктури (рис. 5.16-5.18) вальцьованих заготовок не було виявлено.



Рисунок 5.16. Макроструктура поздовжнього перерізу штампованої поковки "Гойдалка". Сплав АК8



Рисунок 5.17 – Макроструктура поздовжнього перерізу штампованої поковки деталі "Корпус" (по ребру)



Рисунок 5.18 – Макроструктура поперечного перерізу штампованої поковки деталі "Корпус" (по кишені)

Якість мікроструктури досліджували на оптичних металографічних мікроскопах при різних збільшеннях із травленням зразків за загальноприйнятою методикою. На рис. 5.19 видно формування в заготовці сприятливої мікроструктури з рівномірним розподілом зерна, без мікротріщин, розшарування, неметалічних включень. Більше обтискання при вальцюванні забезпечує проникнення деформації в центральні зони вальцьованої заготовки, викликаючи подрібнення, ущільнення і орієнтування зерен у напрямі руху металу при обробці.

Для механічних випробувань із вальцьованих заготовок вирізали зразки з розмірами за ОСТУ І.900І І-70 з початкового прутка (границя міцності  $\sigma_b = 380$  МПа, відносне подовження  $\delta = 16\%$ ), овалу і квадрата, а також з ділянок переходу від початкового прутка до овалу і квадрата. Дослідження механічних властивостей виконували при статичному навантаженні зразків, вирізаних з різним напрямом волокна.

Випробування проводили на розривній машині номінальним зусиллям 20000Н. Результати випробувань наведені в таблиці 5.3.

При дослідженнях процесу вальцювання заготовок під наступне штампування підтвердилося, що заготовки після вальцювання мають міцність вище, ніж пресований пруток. Поліпшення структури металу і підвищення механічних властивостей заготовок після вальцювання можна пояснити тим, що вальцювання проводиться у вальцювальних штампах з калібрами, за формою близькими до форми поперечного перерізу штампованої деталі. Перепади перерізів уздовж калібру вибираються плавними радіусами. Така форма інструменту забезпечує досить рівномірну деформацію металу, створює майже всебічне обтискання заготовки. Це підвищує пластичність металу і дозволяє проводити деформацію з більшими разовими обтисканнями, ніж при куванні.

Зразки після вальцювання	σ <sub>b</sub> , MΠa	δ,%		
Овал	427	22,0		
Квадрат	425	22,0		
Перехідні ділянки	420	22,0		
-//-	420	18,0		
-//-	420	20,0		
_//_	417	19,0		
-//-	415	22,0		
-//-	415	21,0		
_//_	405	22,0		

Таблиця 5.3 – Результати механічних випробувань зразків після вальцювання

Проведений макро-, мікроаналіз структури та механічних властивостей вальцьованих заготовок і штампованих поковок, виготовлених з них, показав відповідність якості вимогам технічної документації [101].

У результаті випробувань виявлено [102], що вальцювання підвищує міцність заготовок на 9 - 12 % і пластичність на 13 - 38 %, зменшує норму витрати матеріалу початкової заготовки на 10 - 25 % залежно від конфігурації (наочно видно різницю у величині облою (витратна складова металу) по відношенню до початкової заготовки у використаних технологіях, порівнявши рис.5.11 та 5.13 б).



а – ступінь обтиснення – 30 %



б - ступінь обтиснення - 46 %



в – ступінь обтиснення – 50 %

Рисунок 5.19 – Мікроструктура заготовок із сплаву АК 6 в зоні центральної частини зразка, загартованого і штучно зістареного. Поздовжній шліф х 300

Використання вальцювання знижує трудомісткість виготовлення штампованих поковок на 15 – 35 % за рахунок зняття операції протягування, зачистки заготовок перед штамповкою і набору потовщень на ГКМ, додаткового штампування з проміжними операціями. Підвищення точності розмірів вальцьованих заготовок і максимальне наближення їх форми і розмірів до форми і розмірів штампованої поковки збільшує стійкість штампів на 20 – 35%.

#### Висновки до розділу 5

1. У результаті проведеного дослідження напружено-деформованого стану циліндричних заготовок при вальцюванні встановлено його суттєву неоднорідність в зоні деформування. Найбільш жорстким НДС спостерігається на вільних бічних поверхнях заготовки, що обумовлює небезпеку її руйнування саме в цій зоні.

2. 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: 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 умов розтягу.

3. Розроблено моделі накопичення пошкоджень, що надають можливість визначати величину використаного ресурсу пластичності при немонотонному двоетапному вальцюванні, коли на другому етапі спостерігається складне деформування.

4. Встановлено, що застосування процесу вальцювання заготовок як підготовчої операції до об'ємного штампування замість підготовки заготовок на кувальних молотах (операція протягування), операцій, які виконуються набором потовщень на ГКМ, 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.

5. За окремими результатами розділу опубліковані роботи [92], [95], [98]-[100], [102].

#### ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена науково-технічним актуальним завданням з удосконалення процесів вальцювання на основі моделювання формозмінення Дослідження заготовок. спрямовані підвищення на ефективності виробництва заготовок, у тому числі для деталей складних профілів, шляхом раціонального проектування технології з використанням максимального ресурсу пластичності матеріалу.

1. Проаналізовано можливість використання як гарячого так і холодного вальцювання для виробництва деталей на підставі приведеної класифікації за міцністю, пластичністю, фізичними властивостями алюмінієвих сплавів, що підлягають деформуванню. Розглянута пластичність алюмінієвих сплавів при холодному вальцюванні та запропоновано спосіб вальцювання циліндричного зразка на клин валками, радіуси яких зростають в процесі вальцювання, що дозволяє проводити дослідження пластичності металів за умови напруженого стану одновісного розтягу без утворення шийки з притаманним їй «аномальним» підвищенням пластичності.

2. В результаті аналізу закономірностей процесу формоутворення при вальцюванні встановлено, що деформований стан заготовки близький до плоского, тобто найбільшими є поздовжні деформації та деформації по товщині. Збільшуючи обтиснення по поперечному перерізу заготовки можна досягнути переважного подовження відповідних ділянок. На основі цього розроблено спосіб виготовлення криволінійних заготовок двохетапним вальцюванням, за яким на першому етапі вальцювання здійснюється на гладку бочку з керуванням деформованим станом заготовки конічними валками, на другому – заготовка повертається на 90 градусів і вальцюється в калібрах циліндричних валків.

3. Побудовані об'ємні геометричні та дискретні моделі з використанням математичного апарату опису процесів теплообміну, тепломасоперенесення і деформованого стану в умовах контактної взаємодії заготовки з валками за різними схемами вальцювання шляхом проведення чисельного експерименту в універсальній програмній системі скінчено-елементного аналізу ANSYS.

Встановлено, що для рівномірного розподілу температур всередині заготовки, нагрітої до 450°С з метою отримання рівнозернистості структури та уникнення мікротріщин малопластичних сплавів доцільно нагрівати валки в інтервалі температур від 250 °С до 450°С. Наявність оксидної плівки забезпечує додатковий рівномірний розподіл теплового стану в осередку деформації завдяки її ізолюючим властивостям, зменшуючи перепад температур на 60%. Визначено, що внесок значень термічної складової в коефіцієнти розширення та випередження в залежності від схем вальцювання (для алюмінієвого сплаву AK6 при високотемпературному вальцюванні) складають: «круг-овал» – 42 %, 45 %; «овал-ромб» – 39,4 %, 39,9 %; «ромб-квадрат» – 38 %, 38,2 %; «овалквадрат» – 39,3 %, 39,3 %).

4. Встановлено суттєву неоднорідність НДС в зоні деформування за результатами імітаційного моделювання НДС циліндричних заготовок при холодному вальцюванні. Найбільш жорстким НДС спостерігається на вільних бічних поверхнях заготовки ( $\eta \approx 1$ ). Отримана залежність між відносним стисненням та накопиченою деформацією на вільній бічній поверхні циліндричної заготовки з алюмінієвого сплаву, показник напруженого стану який відповідає одновісному розтягу, що дозволяє підвищити ефективність розроблення технологічних процесів холодного вальцювання, надаючи можливість наперед визначати граничну на момент руйнування товщину заготовки при різних її діаметрах, як  $h_* = (0,818 - 0,723 \cdot e_*) \cdot D$ .

5. У результаті проведеної оцінки деформовності алюмінієвих сплавів при холодному вальцюванні, з використанням діаграм пластичності та скалярного і тензорного критеріїв деформовності, 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.

Проведена оцінка деформовності сплавів дозволила: обґрунтувати можливість переходу з гарячого на холодне вальцювання з метою підвищення енергоощадності процесів вальцювання; визначати максимальну до руйнування деформацію заготовок або величину використаного ресурсу пластичності на проміжних етапах.

Розроблено моделі накопичення пошкоджень, які дозволяють визначати величину використаного ресурсу пластичності при немонотонному двохетапному вальцюванні, коли на другому етапі спостерігається складне деформування.

6. Експериментально встановлено, що застосування процесу вальцювання заготовок як підготовчої операції до об'ємного штампування є альтернативою традиційним операціям протягування заготовок на кувальних молотах, операціям, які виконуються набором потовщень на ГКМ, при штампуванні поковок подовженої форми, крім того забезпечує зниження норми витрати початкової заготовки на 10 - 25 %, зменшення 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 впроваджені в навчальний процес з підготовки студентів інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету.

## 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. 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.

[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", *Кузнечноштамповочное производство,* № 10. с. 29-31, 1978.

[5] И. В. Гунько, Л. В. Швец, 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. Скрябин, Технология горячего деформирования заготовок из алюминиевых сплавов на ковочных вальцах. Винница: ПП О. Власюк, 2007.

[7] С. А. Скрябин, 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 компресора 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 изготовлении лопаток ГТД. М.: НИАТ, с. 9-12, 1977.

[10] С. А. Скрябин, И. В Гунько, и И. А. Бубновская, "Теплообмен между поверхностью деформируемого метала 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", *Авиационная 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 Донбаської державної машинобудівної академії. Збірник наукових праць, № 1 (3), с. 32-36, 2006. [18] В. А. Матвийчук, и И. Ф. Корнет, А. с. 1600899 СССР, МКИ В 21
КЗ/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, *Теория ковки и штамповки*. М.: Машиностроение, 1992.

[23] Г. 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. Я. 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 машинобудуванні, Тематич. зб. наук. пр., Краматорськ. с. 145-165, 2002.

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

[29] И. П. 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 grid method. Application 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 сплайнаппроксимации)", 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] Г. 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 давленим*. М.: Металлургия, 1984.

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

[38] С. И. Губкин, Пластическая деформация металлов. Физикомеханические 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. *Теория ковки 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", Изв. 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] Г. А. Смирнов-Аляев, Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные расчеты процессов конечного формоизменения материалов. Л.: Машиностроение. 1978.

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

[49] Г. Д. Дель, *Пластичность при немонотонном деформировании*. 10 с, Деп. В ВИНИТИ 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 технологии ковки на основе описания деформационной анизотропии пластичности", Оптимизация ковки 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 металов. Справочник, М.: Машиностроение, 1972.

[54] В. И. Анурьев, и И. Н. Жестковой, Справочник конструкторамашиностроителя: в 3 т. М.: Машиностроение, 2006.

[55] Г. 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 давленим. 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.: Металлургия, 1980.

[63] QForm3D конечно-элементная программа для расчета процессов пластической деформации металлов и сплавов, ©1991-2017, ООО «КванторФорм» [Электронный ресурс]. Доступно: <u>www.qform3d.com.</u>

[64] В. Л. Колмогоров, и Б. А. Мигачёв, "Прогнозирование разрушения металлов в процессе горячей пластической деформации", *Изв. 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: <u>https://sapr.ru/article/7366</u>

[66] В. А. Матвійчук, та І. А. Бубновська, "Моделювання температурних і деформаційних полів заготовки в процесі гарячого вальцювання за схемою «круг-овал»", *Обработка материалов давленим*. 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). № 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 давленим*, Краматорск: ДГМА, № 2(27). с. 84-88, 2011.

[69] М. В. Ильюшкин, Моделирование процессов обработки металлов давле- нием в программе ANSYS/LS-DYNA (осадка цилиндрической заготовки). Учебно-методическое пособие. Ульяновск, РФ: УлГУ, 2013. [70] С. А. Скрябин, и И. А. Бубновская, "Исследование нестационарных тепловых процессов и термических деформаций при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах", *Кузнечно-итамповочное производство. Обработка материалов давленим,* № 10, с. 32-36, 2013.

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

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

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

[74] Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин, *Теория процессов ковки*. Учебное пособие для вузов. М., Высшая школа, 1977.

[75] М. А. Михеев, и И. М. Михеева, *Краткий курс теплопередачи*. 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. Г. Крищук, Системи автоматизованого проектування та інженерного аналізу в машинобудуванні. 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» MMI, 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). № 122547,* Січ.10,2018.

[86] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, и И. 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. Бубновська, "Дослідження напружено-деформованого стану заготовок при вальцюванні", *The scientific heritage*, Budapest, Kossuth Lajos utca 84,1204, N 47, P.1. c. 31-37, 2020.

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

[91] В. М. Михалевич, "Аппроксимация кривых предельной деформации сплайн-функциями", Обработка металлов давлением: сборник научных трудов, Краматорск: ДГМА, № 3(24), с. 3-10, 2010.

[92] В. А. Матвійчук, О. О. Рубаненко, та І. А. Бубновська, "Спосіб виготовлення криволінійних заготовок вальцюванням", МПК G01N 3/08 (2006/01). № 120472, Листоп.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. Матвійчук, В. М. Михалевич, та І. А. Бубновська, "Оцінка деформованості матеріалу заготовок при вальцюванні за схемами в два і більше переходів" *на міжнародній науково-методичній Інтернет-конференції* "Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності", 2018, с. 246-249. Режим доступу: <u>https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/pmovc/pmovc-2018\_netpub.pdf.</u>

[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* ,  $N_{2}$  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 изготовленых из них штампованных поковок", *Технологические системы*, № 2, с. 70-77, 2011.

[99] І. В. Гунько, та І. А. Бубновська, "Штампування поковок із алюмінієвих сплавів з подовженою віссю", *на міжнародній науково-технічній конференції*, 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", *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давленим*, № 8, с. 18-20, 2011.

# додатки

#### Додаток А

## Список публікацій здобувача за темою дисертації

[1] 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.

Автором описано вимоги до нагрівання заготовок та висвітлено негативні наслідки їх невиконання, здійснено підбір аналітичних залежностей та розрахунок значень параметрів осередку деформації і температурного поля.

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

Автором проаналізовано недоліки та переваги існуючих методів підготовки заготовок під штамповку. Виконані експериментальні дослідження вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів під наступне штампування.

[3] 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.

Автором запропоновано методику розрахунку поправочного коефіцієнта для знаходження базисного тиску при вальцюванні заготовок із різних алюмінієвих сплавів.

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

Автором проаналізовано фактори, що впливають на характер розподілу температури по перерізу заготовки та між заготовкою та довкіллям. [5] 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 давленим*, Краматорск: ДГМА, № 2(27). с. 84-88, 2011.

Автором проведено розрахунки теплового стану зони деформування, статистичну обробку результатів, оцінено вплив оксидної плівки на розподіл температур по перерізу заготовки.

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

Автором проведено аналіз розподілу швидкостей переміщення металу при вальцюванні по поздовжньому та поперечному перерізах заготовки.

И. [7] C. A. Скрябин, И A. Бубновская, "Исследование нестационарных тепловых процессов и термических деформаций при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах", Кузнечноштамповочное производство. Обработка материалов давленим, № 10, с. 32-36, 2013. Режим доступу: https://www.kshp-omd.ru/ru/archivru/2013/kshp-omd-10-2013/211-soderzhanie

Автором виконано розробку методики чисельного аналізу процесів теплообміну та тепломасоперенесення для визначення полів розподілу температур і температурних деформацій.

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

Автором проведено геометричну інтерпретацію та аналіз термомеханічних характеристик.

[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.

Автором обтрунтовано можливість застосування гарячого вальцювання при виготовлені компресорних лопаток.

[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: <u>https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/issue/view/7</u>.

Здобуто аналітичний вираз для визначення граничної до руйнування висоти заготовки на основі апроксимації залежності між ступенем обтиснення та інтенсивністю деформацій.

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

Автором проведено оцінку деформованості заготовки для випадку двохетапного деформування.

[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, N 47, P.1. c. 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", *МПК G01N 3/08 (2006/01). № 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). № 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). № 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. Прогресивна техніка і технологія 2010, Київ, 2010, с.54-55.

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

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

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

[21] В. А. Матвійчук та І. А. Бубновська, "Розширення технологічних можливостей процесу вальцювання виробів", *на Всеукр. наук.-практ. конф. Сучасні агротехнології: тенденції та інновації,* 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. 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 тиском і якості фахової освіти*, Київ-Херсон, НТУУ «КПІ» ММІ, 2017,с. 161-164.

[24] В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич, та І. А. Бубновська "Оцінка деформованості матеріалу заготовок при вальцюванні за схемами в два і більше переходів", *на міжнародній науково-методичній Інтернет-конференції "Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності"*, 2018, с. 246-249. Режим доступу: <u>https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/pmovc/pmovc-2018\_netpub.pdf.</u>

[25] І. А. Бубновська " Аналіз напруженого стану заготовок при вальцюванні", на Всеукраїнській науково-практичній конференції "Від науки до практики", 2019.

[26] І. А. Бубновська " Моделювання механіки формозміни заготовок при штампування і обкочуванні", *на Всеукраїнській науково-практичній конференції " Від науки до практик*и", 2020.
### Додаток В

# Блок – схема автоматизованого алгоритму розрахунку термомеханічного стану осередку деформації



#### ДОДАТОК В



# Термомеханічний стан осередку деформування

Рисунок В. 1 – Поле температур в осередку деформування першої заготовки (табл. 3.5) без плівки оксиду алюмінію. Початкова температура штампа 25°С.



Рисунок В. 2 – Температурне поле першої заготовки (табл. 3.5) в осередку деформування для поздовжнього перерізу. Плівка оксиду відсутня.



Рисунок В. 3 – Температурне поле в поперечному перерізі при виході першої заготовки (табл. 3.5) з кувальних валків. Плівка оксиду алюмінію відсутня.



Рисунок В. 4 – Температурне поле в поперечному перерізі при вході першої заготовки (табл. 3.5) у валки. Плівка оксиду алюмінію відсутня.



Рисунок В. 5 – Поле градієнта температур в осередку деформування першої заготовки (табл. 3.5). Плівка оксиду алюмінію відсутня.



Рисунок В. 6 – Поле питомих теплових потоків в осередку деформування першої заготовки (табл. 3.5), Вт/м<sup>2</sup>, плівка оксиду алюмінію відсутня.



Рисунок В. 7 – Поле температур першої заготовки (табл. 3.5) з поверхневою плівкою оксиду алюмінію.



Рисунок В. 8 – Температурне поле в осередку деформування першої заготовки (табл. 3.5) з плівкою оксиду алюмінію для поздовжнього перерізу.



Рисунок В. 9 – Температурне поле першої заготовки (табл. 3.5) з плівкою оксиду алюмінію при виході з валків.



Рисунок В. 10 – Температурне поле першої заготовки (табл. 3.5) з плівкою оксиду алюмінію при вході в валки.



Рисунок В. 11 – Поле градієнта температур в осередку деформування першої заготовки (табл. 3.5) з плівкою оксиду алюмінію.



Рисунок В. 12 – Поле питомих теплових потоків в осередку деформування першої заготовки (табл. 3.5) з плівкою оксиду алюмінію.

## Додаток Г

Програмний модуль з розрахунку параметрів НДС та оцінки граничного стану

```
>
🗕 Побудова шляху деформування
      > restart:
      > #a*(t-et0)^s
      > ei=a*(eta-et0)^s;solve(eta,%);
                                              ei = a (\eta - et\theta)^{s}
      Error, (in solve) invalid arguments
      > EtEi:=proc(Et0,Et1,E1,s,a2,Om,et)
         local a1;
         a1:=evalf((Et1-Et0)^s/E1):
         piecewise(et<=E1,Et0+(et/a1)^(1/s),-Et0+a2*sin(Pi*et*Om))
         end proc;
      EtEi := proc(Et0, Et1, E1, s, a2, Om, et)
      local al;
           al := \operatorname{evalf}((Etl - Et0)^{s} / El);
           piecewise(et \leq E1, Et0 + (et / a1)^{(1/s)}, -Et0 + a2 \approx \sin(\pi * et * Om))
      end proc
      > #EtEi1:=proc(Et0,Et1,E1,s,a,Om,et)
         #piecewise(et<=E1,Et0+(et/E1)^(1/s)*(Et1-Et0),-Et0+a*sin(Pi*(</pre>
         et-E1)*Om))
         #end proc;
      > EtEi1:=(Et0,Et1,E1,s,a,Om,et)->piecewise(et<=E1,Et0+(et/E1)^s
         *(Et1-Et0),Et1+a*sin(Pi*(et-E1)*Om));
      EtEil := (Et0, Et1, E1, s, a, Om, et) \rightarrow
          piecewise \left( et \le E1, Et0 + \left(\frac{et}{E1}\right)^3 (Et1 - Et0), Et1 + a \sin(\pi (et - E1) Om) \right)
      > EtEi(eta[0],eta[1],0.05,s,a,omega,et);
                               \left\{ \eta_{0} + \left(\frac{0.0500000000 \ et}{\left(\eta_{1} - 1, \eta_{0}\right)^{s}}\right)^{\frac{1}{s}} \right)^{\frac{1}{s}}
                                                                    et ≤ 0.05
                                     -\eta_0 + a \sin(\pi et \omega)
                                                                   otherwise
      > EtEi1(eta[0],eta[1],e[1],s,a,omega,et);
                                 \eta_0 + \left(\frac{et}{e_1}\right)^2 (\eta_1 - \eta_0) \qquad et \le e_1
                                     (+ a \sin(\pi (et - e_1) \omega)) otherwise
      >
      > EtEi(-1,1,0.05,0.4,0.1,40,et); EtEi(-1,0.9,0.06,0.4,0.1,40,0.0
         6);
                            \begin{cases} -1 + 0.0002795084971 \ et^{2.50000000} & et \le 0.05 \\ 1 + 0.1 \ sin(40 \ \pi \ et) & otherwise \end{cases}
```

```
> #plot([0.05*(t+1)^0.4],t=-1..1,0..0.5);
```

>

```
> plot([[EtEi1(-1,0.9,0.06,0.4,0.1,10,t),t,t=0..0.38],[EtEi1(-1,0.9,0.06,0.4,0.1,40,t),t,t=0..0.28]],t=-1..2,0..0.42,color=[
red$1,green,blue]);
```



> #plot([[EtEi(-1,0.9,0.06,0.4,0.1,10,t),t,t=0..0.38]],t=-1..2, 0..0.42,color=[red\$1,green,blue]); plot([[t,EtEi1(-1,0.9,0.06,0.4,0.1,10,t),t=0..0.38],[t,-1+(t/ 0.06)^(1/0.4),t=0..0.38]],t=0..0.4,-1..1.42,color=[red\$1,gree n,blue]);



$$E_{sc} = E_{sn} \left( -\eta \ln \left( 1/2 \frac{(1-\eta)E_{cm}}{E_{sp}} + 1/2 \frac{(1+\eta)E_{sp}}{E_{p}} \right) \right)$$

Граничні деформації при стиску, кручені та розтязі:





> eta=EtEi1 (eta[0], eta[1], e[1], s, a, omega, e[u]);  

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 + \left(\frac{e_u}{e_1}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)} (\eta_1 - \eta_0) & e_u \le e_1 \\ \eta_1 + a \sin(\pi(e_u - e_1) \omega) & otherwise \end{cases}$$
>   
> Kpumepii Ocopodnikoea  
> #EprZ:= (Ec, Ek, Ep, eta)  
> fh1:= (Et0, Et1, E1, SS, et) ->1+0.2\*arctan (SS\* (et/E1)^ (SS-1) \* (Et1-Et0) / E1);  
fh1 (eta[0], eta[1], e[1], s, e[u]);  
fh1 (eta[0], eta[1], El, SS, et) ->1+0.2 arctan  $\left(\frac{SS\left(\frac{et}{El}\right)^{(SS-1)} (Etl - Et0)}{El}\right)$   
1+0.2 arctan  $\left(\frac{S\left(\frac{e_u}{e_1}\right)^{(c-1)} (\eta_1 - \eta_0)}{e_1}\right)$   
> fh2:= (Et1, E1, AA, OM, et) ->1+0.2\*arctan (Pi\*AA\*OM\*cos (Pi\*OM

fh2(eta[1],e[1],a,omega,e[u]);

 $fh2 := (Et1, E1, AA, OM, et) \rightarrow 1 + 0.2 \arctan(\pi AA OM \cos(\pi OM (et - E1)))$  $1 + 0.2 \arctan(\pi a \omega \cos(\pi (e_u - e_1) \omega))$ 

> PsiOgor:=(FH1,EPST,Et0,Et1,E1,SS,Ec,Ek,Ep,Et,et)->evalf (Int(FH1(Et0,Et1,E1,SS,et)\*et^(FH1(Et0,Et1,E1,SS,et)-1) /EPST(Ec,Ek,Ep,Et0+(et/E1)^SS\*(Et1-Et0))^FH1(Et0,Et1,E1, ,SS,et),et=0..Et)); PsiOgor:=(FH1,EPST,Et0,Et1,E1,SS,Ec,Ek,Ep,Et,et)->Int(F H1(Et0,Et1,E1,SS,et)\*et^(FH1(Et0,Et1,E1,SS,et)-1)/EPST( Ec,Ek,Ep,Et0+(et/E1)^SS\*(Et1-Et0))^FH1(Et0,Et1,E1,SS,et)

),et=0..Et);

 $PsiOgor := (FH1, EPST, Et0, Et1, E1, SS, Ec, Ek, Ep, Et, et) \rightarrow$ 

$$\operatorname{evalf}\left(\int_{0}^{Et} \frac{FHI(Et0, Et1, E1, SS, et) et^{(FHI(Et0, Et1, E1, SS, et) - 1)}}{EPST\left(Ec, Ek, Ep, Et0 + \left(\frac{et}{E1}\right)^{SS} (Et1 - Et0)\right)^{FHI(Et0, Et1, E1, SS, et)}} det\right)$$

 $PsiOgor := (FH1, EPST, Et0, Et1, E1, SS, Ec, Ek, Ep, Et, et) \rightarrow$ 

$$\int_{0}^{E_{1}} \frac{FHI(Et0, Et1, EI, SS, et) et^{(FHI(Et0, EI, EI, SS, et)-1)}}{EPST(Ec, Ek, Ep, Et0 + (\frac{et}{EI})^{SS}(Et1 - Et0))^{(FHI(Et0, EII, EI, SS, et))}} det$$
> psi(E[p])=PsiOgor (fh1, EprZ, eta[0], eta[1], e[1], s, E[^orr]], E[^orr], E[^

$$\left( 1 + 0.2 \arctan\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right) e_u^{\left(02 \arctan\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right)\right)} \\ \left( 1 + 0.2 \arctan\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right) e_u^{\left(1 + 0.2 \arctan\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right)\right)} \right)^d \\ \left( 0.68 e^{\left( \left( -1 + 5.854544358 e_u^{0.4} \right) | 4 \left( 3.823529412 - 5.505239620 e_u^{0.4} \right) \right) \right)^{\left( 1 + 0.2 \arctan\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right)} \right)^d \\ \frac{e_u}{e_u} \\ > \text{PsiOgor (fh1, Eprz, EEt0, EEt1, EE1, Ss, Ec, Ek, Ep, EE1, e[u]); \\ \text{Ss := 0.3; } \text{PsiOgor (fh1, Eprz, EEt0, EEt1, EE1, Ss, Ec, Ek, Ep, EE1, e[u]); } \\ \int_{0}^{006} \\ \frac{\left( 1 + 0.2 \arctan\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right) e_u^{\left( 02 \arctan\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right)} \\ \frac{\left( 0.68 e^{\left( \left( -1 + 5.854544358 e_u^{0.4} \right) \ln \left( 3.823539412 - 5.505339600 e_u^{0.4} \right) \right) \right)^{\left( 1 + 0.2 \arctan\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right)} \\ \left( 0.68 e^{\left( \left( -1 + 5.854544358 e_u^{0.4} \right) \ln \left( 3.823539412 - 5.505339600 e_u^{0.4} \right) \right) \right)^{\left( 1 + 0.2 \arctan\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right)} \\ \frac{\left( 0.68 e^{\left( \left( -1 + 5.854544358 e_u^{0.4} \right) \ln \left( 3.823539412 - 5.505339600 e_u^{0.4} \right) \right) \right)^{\left( 1 + 0.2 \arctan\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right)} \\ \frac{\left( 0.68 e^{\left( \left( -1 + 5.854544358 e_u^{0.4} \right) \ln \left( 3.823539412 - 5.505339600 e_u^{0.4} \right) \right)} \right)^{\left( 1 + 0.2 \arctan\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right)^{\left( 1 + 0.2 \arctan\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right)} \right)^{\left( 1 + 0.2 \operatorname{arcm}\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right)^{\left( 1 + 0.2 \operatorname{arcm}\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right)^{\left( 1 + 0.2 \operatorname{arcm}\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right)} \right)^{\left( 1 + 0.2 \operatorname{arcm}\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right) \right)^{\left( 1 + 0.2 \operatorname{arcm}\left(\frac{2.341817743}{e_u^{0.6}}\right)$$

$$\int_{0}^{200} \left( \frac{1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)}{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)e_{u}} e_{u}^{\left(0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} e_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(0.68 e_{u}^{\left(-(1+4.418530463 e_{u}^{0.3})u(3325529412-4155194439 e_{u}^{0.3})\right)\right)} \right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(-e_{u}^{0.7}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \arctan\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \operatorname{sech}\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \operatorname{sech}\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \operatorname{sech}\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \operatorname{sech}\left(\frac{1.32565184}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \operatorname{sech}\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \operatorname{sech}\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \operatorname{sech}\left(\frac{1.325651844}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0.2 \operatorname{sech}\left(\frac{1.32565184}{e_{u}^{0.7}}\right)}{e_{u}^{\left(1+0.2 \operatorname{sech}\left(\frac{1.32565184}{e_{u}^{0.7}}\right)} d_{u}^{\left(1+0$$

$$\begin{split} \psi(E_{u}) &= \left( \left( 1 + 0.2 \arctan\left(\frac{s\left(\frac{e_{u}}{e_{1}}\right)^{(r-1)}(\eta_{1} - \eta_{0})}{e_{1}}\right) \right) \\ &= \left( 0.2 \arctan\left(\frac{s\left(\frac{e_{u}}{e_{1}}\right)^{(r-1)}(\eta_{1} - \eta_{0})}{e_{1}}\right) \right) \\ &= \left( -\left(\eta_{0} + \left(\frac{e_{u}}{e_{1}}\right)^{r}(\eta_{1} - \eta_{0})\right) \right) \left( 1/2 \frac{\left(1 - \eta_{0} - \left(\frac{e_{u}}{e_{1}}\right)^{r}(\eta_{1} - \eta_{0})\right) E_{cm}}{E_{cg}} + 1/2 \frac{\left(1 + \eta_{0} + \left(\frac{e_{u}}{e_{1}}\right)^{r}(\eta_{1} - \eta_{0})\right) E_{cg}}{E_{g}}\right) \right) \right) \\ &= \left( 1 + 0.2 \arctan\left(\pi \left(\frac{s}{e_{1}}\right)^{(r-1)}(\eta_{1} - \eta_{0})\right) \right) \\ &= \left(1 + 0.2 \arctan\left(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - e_{1}\right)\cos(1\right)\right)\right) e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - e_{1}\right)\cos(1\right)))}\right) \right) \right) \\ &= \left( 1 + 0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)\right)\right) e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right))))} \right) \\ &= \left( 1 + 0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)\right)\right) e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)))} \right) \\ &= \left( 1 + 0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)\right)\right) e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)))} \right) \\ &= \left( 1 + 0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right))\right) e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)))} \right) \\ &= \left( 1 + 0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right))\right) e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)))} \right) \\ &= \left( 1 + 0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)) e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)))} \right) \\ &= \left( 1 + 0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)) e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)))} e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right))} e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)))} e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)))} e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)))} e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right))} e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right)))} e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right))} e_{u}^{(0.2 \arctan(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(e_{u} - \eta_{1}\right)\cos(1\right))} e_{u}^{(0.2 \ln(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(\alpha \cos(\pi \left(\alpha \cos(\alpha$$

$$\begin{aligned} de_{u} \\ > \ \#\text{EEt0, EEt1, EE1, Ss, Ec, Ek, Ep, EE1} \\ \text{psi}(E[p]) = \text{PsiOgor2}(fh2, EprZ, EEt1, EE1, aa, OOm, Ec, Ek, Ep, 0. \\ 4, e[u]); \\ \psi(E_{p}) = \int_{0.06}^{0.4} (1 + 0.2 \arctan(0.5 \pi \cos(5 \pi (e_{u} - 0.06)))) \\ & (0.2 \arctan(0.5 \pi \cos(5 \pi (e_{u} - 0.06)))) \\ & e_{u} \\ & (-(0.9 + 0.1 \sin(5 \pi (e_{u} - 0.9))) \ln(2.036890757 - 0.09403361345 \sin(5 \pi (e_{u} - 0.9))))) \\ & (0.68 e \\ & )^{\land} \\ & (1 + 0.2 \arctan(0.5 \pi \cos(5 \pi (e_{u} - 0.06)))) \\ & de_{u} \end{aligned}$$



```
>
     > #EprZ(E[`ct`],E[`kp`],E[`p`];psi(E[p])=
     >
     >
     >
     >

    Формування сукупності значень вихідних даних

     > restart:
       #PsiOqor(fh1,EprZ,eta[0],eta[1],e[1],s,E[`cr`],E[`kp`],
       E[`p`],e[1],e[u])
       #PsiOgor2(fh2,EprZ,eta[1],e[1],a,omega,E[`cr`],E[`kp`],
       E[`p`],E[u],e[u])
     > eta[1]=[0.85,0.86,0.87,0.89,0.9,0.91,0.92,0.93,0.96,1.2
       ,1.22,1.24,1.26,1.28,1.3]; nops(rhs(%));
       e[1]=[0.08,0.09,0.1,0.12,0.14,0.16,0.18,0.2,0.22];nops(
       rhs(%));%%%*%;
       s=[0.021,0.02,0.03,0.04,0.05,0.06,0.07,0.08,1,2];nops(r
       hs(%));%%%*%;
       a=[0.01,0.03,0.04,0.06,0.08,0.1];nops(rhs(%));%%%*%;
       omega=[1/3,1/2,1,3,5,8];nops(rhs(%));%%%*%;
     \eta_1 =
     [0.85, 0.86, 0.87, 0.89, 0.9, 0.91, 0.92, 0.93, 0.96, 1.2, 1.22, 1.24, 1.26, 1.28, 1.3]
                                    15
               e_1 = [0.08, 0.09, 0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.2, 0.22]
                                    9
                                   135
              s = [0.021, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 1, 2]
                                    10
                                   1350
                      a = [0.01, 0.03, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1]
                                    6
                                   8100
                            \omega = \left[\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 3, 5, 8\right]
                                     6
                                  48600
```

> EprZ:=(Ec,Ek,Ep,eta) ->Ek\*exp(-eta\*ln((1-eta)\*Ec/Ek/2+(1
+eta)\*Ek/Ep/2));
fh1:=(Et0,Et1,E1,SS,et)->1+0.2\*arctan(SS\*(et/E1)^(SS-1)
\*(Et1-Et0)/E1);
fh2:=(Et1,E1,AA,OM,et)->1+0.2\*arctan(Pi\*AA\*OM\*cos(Pi\*OM
\*(et-E1)));
PsiOgor:=(FH1,EPST,Et0,Et1,E1,SS,Ec,Ek,Ep,Et,et)->evalf
(Int(FH1(Et0,Et1,E1,SS,et)\*et^(FH1(Et0,Et1,E1,SS,et)-1)
/EPST(Ec,Ek,Ep,Et0+(et/E1)^SS\*(Et1-Et0))^FH1(Et0,Et1,E1
,SS,et),et=0..Et));
PsiOgor2:=(FH2,EPST,Et1,E1,AA,OM,Ec,Ek,Ep,Et,et)->evalf
(Int(FH2(Et1,E1,AA,OM,et)\*et^(FH2(Et1,E1,AA,OM,et)-1)/E
PST(Ec,Ek,Ep,Et1+AA\*sin(Pi\*OM\*(et-Et1)))^FH2(Et1,E1,AA,OM,et)-1)/E

$$EprZ := (Ec, Ek, Ep, \eta) \rightarrow Ek e^{\left(-\eta \ln\left(1/2\frac{(1-\eta)Ec}{Ek} + 1/2\frac{(1+\eta)Ek}{Ep}\right)\right)}$$
$$fh1 := (Et0, Et1, E1, SS, et) \rightarrow 1 + 0.2 \arctan\left(\frac{SS\left(\frac{et}{EI}\right)^{(SS-1)}(Et1 - Et0)}{EI}\right)$$

 $fh2 := (Et1, E1, AA, OM, et) \rightarrow 1 + 0.2 \arctan(\pi AA OM \cos(\pi OM (et - E1)))$ PsiOgor := (FH1, EPST, Et0, Et1, E1, SS, Ec, Ek, Ep, Et, et)  $\rightarrow$ 

$$\int_{E1}^{Et} \frac{FH2(Et1, E1, AA, OM, et) et^{(FH2(Et1, E1, AA, OM, et) - 1)}}{EPST(Ec, Ek, Ep, Et1 + AA \sin(\pi OM (et - Et1)))^{FH2(Et1, E1, AA, OM, et)}} det$$

```
> Ec,Ek,Ep:=2.6,0.68,0.35;#Не знаю, що за матеріал
  Ec,Ek,Ep:=2.6,0.68,0.35;#Не знаю, що за матеріал
  Ec,Ek,Ep:=2.2,1.5,1.1;#AMT
  Ес, Ek, Ep:=0.96,0.25,0.125;#Д1
  Ec,Ek,Ep:=0.52,0.5,0.48;#Д16
  Ec,Ek,Ep:=1.26,1.0,0.9;#AMT5B
  Ec,Ek,Ep:=3.5,2.2,1.44;#A
  EEt0,EEt1,EE1,Ss,aa,OOm:=-1,0.9,0.06,0.4,0.1,5:
  PsiOgor(fh1,EprZ,EEt0,EEt1,EE1,Ss,Ec,Ek,Ep,EE1,e[u]);
  PsiOgor2(fh2,EprZ,EEt1,EE1,aa,OOm,Ec,Ek,Ep,EE1,e[u]);
  88+8;
                          Ec, Ek, Ep := 2.6, 0.68, 0.35
                          Ec, Ek, Ep := 2.6, 0.68, 0.35
                           Ec, Ek, Ep := 2.2, 1.5, 1.1
                         Ec, Ek, Ep := 0.96, 0.25, 0.125
                          Ec, Ek, Ep := 0.52, 0.5, 0.48
                          Ec, Ek, Ep := 1.26, 1.0, 0.9
                          Ec, Ek, Ep := 3.5, 2.2, 1.44
                                0.01200409891
                                      0.
                               0.01200409891
> E;
  PsiOgor2(fh2,EprZ,EEt1,EE1,aa,OOm,Ec,Ek,Ep,E[p],e[u]);
                                      Ε
  (1. + 0.2 \arctan(1.570796327 \cos(15.70796327 e_u - 0.9424777960)))
                                                      (2.2 e<sup>(-1.</sup>
          (0.2 arctan(1.570796327 cos(15.70796327 e<sub>y</sub> = 0.9424777960)))
        e"
        (0.9 + 0.1 \sin(15.70796327 e_u - 14.13716694))
        \ln(1.530934344 - 0.00315656565 \sin(15.70796327 e_v - 14.13716694)))
                                                     <u>^</u>
        (1.+0.2 arctan(1.570796327 cos(15.70796327 e<sub>11</sub>-0.9424777960))))
                                                    de"
    >
    > dx;e[u];eu;
                                           1
                                       10000000
                                           eu
                                          eu
```

```
> fh2,EprZ,Etai,Eli,aa,OOm,Ec,Ek,Ep,x0,eu;
          fh2, EprZ, 1.3, 0.08, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 0.9393795420, eu
 > dx:=10^(-7):y1:='y1':y2:='y2':LG:=[]:
   st:=time():
   for Etai in
   [0.85,0.86,0.87,0.89,0.9,0.91,0.92,0.93,0.96,1.2,1.22,1
   .24,1.26,1.28,1.3] do
    #for Etai in [0.85] do
    #for Eli in
   [0.08,0.09,0.1,0.12,0.14,0.16,0.18,0.2,0.22] do
     for E1i in [0.08] do
      # st:=time():
   a:=Eli:b:=Ek:i:=0:#print(''b''=b,''a''=a,''PsiOgor2''=P
   siOgor2, ''Y1''=y1, ''Y2''=y2, ''Etai''=Etai, ''Eli''=Eli);
   psio1:=PsiOqor(fh1,EprZ,EEt0,Etai,Eli,Ss,Ec,Ek,Ep,Eli,e
   [u]):
      while (b-a)>=dx do
   y1:=psio1+PsiOqor2(fh2,EprZ,Etai,Eli,aa,OOm,Ec,Ek,Ep,a,
   e[u])-1;
   y2:=psio1+PsiOgor2(fh2,EprZ,Etai,E1i,aa,OOm,Ec,Ek,Ep,b,
   e[u])-1;#print([fh2,EprZ,Etai,Eli,aa,OOm,Ec,Ek,Ep,x0,eu
   ],''x0''=x0,''y2''=y2);
       x0:=(a+b)*0.5:
   yc:=psio1+PsiOqor2(fh2,EprZ,Etai,Eli,aa,OOm,Ec,Ek,Ep,x0
   ,e[u])-1;
    i:=i+1:
    if yc=0 then a:=b:
    elif y1*yc<0 then b:=x0
    else
     a:=x0
    end if
   end
do:print(''i''=i,[Etai,Eli,Ss,aa,OOm,Ec,Ek,Ep,x0],b-a);
   #time()-st;
   LG:=[LG[],[Etai,Eli,Ss,aa,OOm,x0]]
end do
end do;
time()-st;
```

 $'i' = 25, [0.85, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.608673627], 0.63 10^{-7}$  $'i' = 25, [0.86, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.603577832], 0.64 10^{-7}$  $'i' = 25, [0.87, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.598457017], 0.63 10^{-7}$  $'i' = 25, [0.89, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.588115312], 0.63 10^{-7}$  $'i' = 25, [0.9, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.582879761], 0.63 10^{-7}$  $i' = 25, [0.91, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.577589622], 0.64 10^{-7}$  $'i' = 25, [0.92, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.572235671], 0.63 10^{-7}$ 't' = 25, [0.93, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.566808178], 0.64 10<sup>-7</sup>  $'i' = 25, [0.96, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.549974885], 0.63 10^{-7}$  $'i' = 25, [1.2, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.373093445], 0.63 10^{-7}$  $'i' = 25, [1.22, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.363922859], 0.63 10^{-7}$  $'i' = 25, [1.24, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.356106495], 0.63 10^{-7}$  $'i' = 25, [1.26, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.349219269], 0.63 10^{-7}$  $'t' = 25, [1.28, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.342865037], 0.63 10^{-7}$  $t^{2} = 25, [1.3, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.336678109], 0.63 10^{-7}$ 2.658

> LG[-1][];

1.3, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.336678109

> i,[a,b,x0],b-a;LG;

25, [1.336678109, 1.336678172, 1.336678109], 0.63 10<sup>-7</sup> [[0.85, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.608673627], [0.86, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.603577832], [0.87, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.598457017], [0.89, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.588115312], [0.9, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.582879761], [0.91, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.577589622],

[0.92, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.572235671], [0.93, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.566808178], [0.96, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.549974885], [1.2, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.373093445], [1.22, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.363922859], [1.24, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.356106495], [1.26, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.349219269], [1.28, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.342865037], [1.3, 0.08, 0.4, 0.1, 5, 1.336678109]]

> EtEi1:=(Et0,Et1,E1,s,a,Om,et)->piecewise(et<=E1,Et0+(et
/E1)^(1/s)\*(Et1-Et0),Et1+a\*sin(Pi\*(et-E1)\*Om));</pre>

 $EtEi1 := (Et0, Et1, E1, s, a, Om, et) \rightarrow$ 

piecewise  $\left( et \le E1, Et0 + \left(\frac{et}{E1}\right)^{\left(\frac{1}{s}\right)} (Et1 - Et0), Et1 + a \sin(\pi (et - E1) Om) \right)$ > [Etai, Eli, aa, OOm, Ec, Ek, Ep, x0]; [1.3, 0.08, 0.1, 5, 3.5, 2.2, 1.44, 1.336678109] > LG[-1,1..-2][]; Etai, Eli, Ss, aa, OOm; 1.3, 0.08, 0.4, 0.1, 5

1.3, 0.08, 0.4, 0.1, 5

-1, 1.5, 0, 1.2

```
X1,X2,Y1,Y2;
```

```
> #[Etai,Eli,Ss,aa,OOm,Ec,Ek,Ep,x0],[Ss]
> X1:=-1:X2:=1.5:Y1:=0:Y2:=1.92:#AMT
X1:=-1:X2:=1.5:Y1:=0:Y2:=0.6:#Д1,Д16
X1:=-1:X2:=1.5:Y1:=0:Y2:=1.2:#AMT5B
X1:=-1:X2:=1.5:Y1:=0:Y2:=2.5:#AMT5B
EEt0,EEt1,EE1,Ss,aa,OOm:=-1,0.9,0.06,0.4,0.1,10:
#plot([[EtEi1(EEt0,Etai,Eli,Ss,aa,OOm,t),t,t=0..x0],[tx
,EprZ(Ec,Ek,Ep,tx),tx=-1..1.4],[[EtEi1(EEt0,Etai,Eli,Ss
,aa,OOm,x0),x0]]],t=-1..1.4,0..1.42,color=[red$1,green,
blue],style=[line$2,point],symbol=circle);
plot([[EtEi1(EEt0,LG[-1,1..-2][],t),t,t=0..LG[-1,-1..-1
][]],[tx,EprZ(Ec,Ek,Ep,tx),tx=-1..1.5],[[EtEi1(EEt0,LG[
-1][]),LG[-1,-1..-1][]]]],t=X1..X2,Y1..Y2,color=[red$1,
green,blue],style=[line$2,point],symbol=circle);
```



> red,seq([green,blue][],k=1..nG);

line, seq([line\$1,point][],k=1..nG);

red, green, blue, green, blue, green, blue, green, blue, green, blue, green, blue,

green, blue, green, blue, green, blue, green, blue, green, blue, green, blue, green, blue, green, blue

line, line, point, line, point, line, point, line, point, line, point, line, point, line,

point, line, point, line, point, line, point, line, point, line, point, line, point, line, point, line, point

> nG:=nops(LG): LG1:=seq([EtEi1(EEt0,LG[k,1..-2][],t),t,t=0..LG[k,-1..-1][]],k=1..nG): LG2:=seq([[evalf(EtEi1(EEt0,LG[k][])),LG[k,-1..-1][]]], k=1..nG); LG2 := [[0.7764675311, 0.4274059345]], [[0.7852598503, 0.4262602375]],[[0.7941035833, 0.4251411489]], [[0.8119522834, 0.4229952387]], [[0.8209626363, 0.4219772864]], [[0.8300341958, 0.4210028219]], [[0.8391693163, 0.4200768520]], [[0.8483696620, 0.4192039537]], [[0.8763551393, 0.4169255779]], [[1.110201870, 0.4090066959]], [[1.130565286, 0.4095281171]], [[1.151047976, 0.4102077533]], [[1.171616161, 0.4109901001]], [[1.192250553, 0.4118426845]], [[1.212951513, 0.4127610731]] > plot([[tx,EprZ(Ec,Ek,Ep,tx),tx=-1..1.4],LG1,LG2],t=-1.. 1.4,0..1.42,color=[red\$1,green\$nG,blue\$nG],style=[line, line\$nG,point\$nG],symbol=circle);



# Додаток Д Акти впровадження



ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН «УКРОБОРОНПРОМ» ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «45 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕХАНІЧНИЙ ЗАВОД» 21100 м. Вінниця, вул. Стрілецька 57 тел./ факс (0432) 50-94-78, 50-94-54 Е-mail: <u>45emp@i.ua</u> http:// <u>www.45emp.vinnitsa.com</u> р/р UA 31 320478 000000026001213994 в АБ «УКРГАЗБАНК» м. КИЇВ МФО 320478, ЄДРПОУ 08341806 ППН 083418002287, свідоцтво № 01761128

> ЗАТВЕРДЖУЮ Директор ДП «45 експериментальний механічний завод» Микола ЧУМАК «27» сененае 2020 р.

#### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Бубновської Ірини Анатоліївни на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук

Даним актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Бубновської І.А. впроваджені в ДП «45 експериментальний механічний завод» при розробленні технологічної документації вальцювання циліндричних заготовок з алюмінієвих сплавів.

Моделі теоретичних та експериментально-теоретичних досліджень використані для:

 обгрунтування 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 формо змінення криволінійних заготовок щляхом використання технології двохетапного вальцювання.

Розроблені методи дали змогу:

підвищити металоощадність технологічного процесу вальцювання до 15%;

- збільшити кривизну заготовки при двохетапному вальцюванні до 10%;

- підвищити рівномірність та рівно зернистість структури матеріалу заготовки під час гарячого вальцювання.

Впроваджені результати досліджень забезпечили зменшення собівартості виготовлення заготовок із алюмінієвих сплавів. Економічний ефект залежить від обсягів виробництва та не визначався.

Представник ДП «45 експериментальний механічний завод»:

Головний конструктор

Олексій ЦВІГУН



# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ вул.Сонячна, 3, м.Вінниця, 21008, тел. (0432) 46-00-03

email: office@vsau.org, rector@vsau.org, код ЄДРПОУ 00497236

<u>17 теро́ня</u> 2020р. № <u>01 1-60-677</u> на № від

Ректор

#### **ДОВІДКА**

про впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи Бубновської Ірини Анатоліївни на тему: «Удосконалення процесів вальцювання на основі моделювання формозмінення заготовок»

Повідомляємо, що наукові розробки Бубновської Ірини Анатоліївни за вказаною темою кандидатської дисертації мають практичну цінність, що зумовило їх впровадження у навчально-методичний процес та наукову роботу кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва.

Положення дисертаційної роботи використовується при викладанні окремих частин навчальних дисциплін:

- "Моделювання технологічних процесів і систем", де запропоновано елементи фізичного моделювання процесу формоутворення заготовок при вальцюванні на клин з метою виявлення основних закономірностей змін компонент напружень та деформацій на різних ділянках пластичної зони заготовок;

- "Автоматизація інженерних розрахунків", де запропоновано спосіб розрахунку граничних до руйнування значень інтенсивності деформацій в залежності ступеня обтиснення заготовки і параметрів напружено-деформованого стану в зонах найбільшої небезпеки руйнування.

Довідка видана для представлення у спеціалізовану вчену раду за місцем захисту Бубновської І.А. дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Розглянуто та затверджено на засіданні науково-методичної комісії Вінницького національного аграрного університету від 19.05.2020 року протокол №13.

В.А. Мазур № 001863

242