

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГУЦАЛЮК ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.7.011: 621.777. 22

ДИСЕРТАЦІЯ
ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОГО РЕДУКУВАННЯ
КОРОТКИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК
НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МЕХАНІКИ

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
_____ О.В.Гуцалюк

Науковий керівник Грушко Олександр Володимирович, доктор технічних наук,
професор

Вінниця – 2019

АНОТАЦІЯ

Гуцалюк О. В. Вдосконалення процесу холодного редукування коротких циліндричних заготовок методами технологічної механіки. – 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 технічний університет, Вінниця, 2019

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення ефективності процесу холодного редукування шляхом надання рекомендацій щодо кута нахилу робочого конуса матриці і відносного обтиску заготовки на основі використання методів технологічної механіки. При цьому використовувалася феноменологічна теорія деформовності при обробці заготовок з відносною довжиною (до діаметру) 2..5 на основі порошкових сплавів системи W-Ni-Fe з забезпеченням безвідмовного формоутворення.

Сформована карта сплаву системи W-Ni-Fe (W- 89%, Ni - 7,5%, Fe - 3,5%), яка містить криву течії, стандартні механічні характеристики, діаграму пластичності і градувальний графік: твердість - напруження - деформації. Розроблено імітаційну модель процесу редукування. Здійснено аналіз напружено-деформованого стану, що дозволило встановити параметри процесу редукування (обтиск, кут нахилу матриці, коефіцієнт тертя) і особливості його механіки з точки зору нерівномірності деформацій, шляхів деформування, контактних напружень.

Аналіз напружено-деформованого стану в процесі редукування, який представлений у вигляді шляхів деформування в координатах безрозмірні показники напруженого стану - накопичена інтенсивність деформацій показав, що в окремих ділянках заготовки реалізуються прості шляхи деформування. Це дозволяє для оцінки використаного ресурсу пластичності використовувати найпростіші деформаційні критерії, на основі яких розроблені інженерні залежності для визначення граничних значень технологічних параметрів в залежності від фізико-механічних

властивостей оброблюваного матеріалу. Шляхи деформування в приповерхнево-му осередку деформації характеризуються значною кривизною. У зазначеній зоні реалізується об'ємний напружений стан, що викликало необхідність розрахунку використаного ресурсу пластичності за допомогою модифікованого критерію В. А. Огороднікова, що враховує вплив третього інваріанта тензора напружень і історію деформування.

Обґрунтовано доцільність використання деформаційних критеріїв деформовності для визначення використаного ресурсу пластичності матеріалу заготовки в характерних її зонах з урахуванням кривизни шляхів деформування. Зокрема, для шляхів деформування малої кривини розроблений інженерний математичний апарат розрахунку використаного ресурсу пластичності в характерних ділянках матеріалу заготовки, що піддається холодному пластичного редукування. Таким чином, отримана інженерна залежність, що дозволяє розрахувати очко матриці для одноциклового редукування, при якому забезпечується безвідмовне формоутворення.

Показано, що характер розподілу контактних напружень може бути покладено в основу розробки раціональної геометрії контуру матриці. При вісесиметричному редуванні для забезпечення зменшення зусилля деформування і збільшення залишкового ресурсу пластичності слід використовувати матриці на основі кривих другого порядку.

Виконано теоретичні та експериментальні дослідження впливу кута нахилу інструменту і величини обтиску на прогнозування технологічної спадковості.

Результати досліджень впроваджені в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля (м.Київ) у вигляді надання методик і рекомендацій щодо вдосконалення технологічного процесу і визначення його раціональних параметрів, що дає істотне скорочення часу на технологічну підготовку, зменшення кількості бракувальних виробів. Також результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес Вінницького національного технічного університету.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень покладено методи прикладної теорії пластичності, феноменологічна теорія деформовності металу, МСЕ.

Фізико-механічні характеристики досліджуваних матеріалів визначали із застосуванням сучасних приладів і обладнання. Експерименти проводилися на обладнанні кафедри ОМППМ ВНТУ. Натурні випробування та фізичне моделювання процесу редукування виконувались в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля НАН України. Експериментально перевірка результатів теоретичних розрахунків проводилась із застосуванням методу твердості.

Для оцінки точності отриманих результатів і ступеня збіжності, теоретичних і експериментальних досліджень використовувалися методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. *Вперше* побудовано шляхи деформування металу в характерних точках коротких заготовок в залежності від основних технологічних параметрів процесу прямого видавлювання (редукування) та обґрунтовано розташування небезпечних зон за ознакою вичерпання ресурсу пластичності металу;

2. *Вперше* сформовано карту матеріалу для сплаву системи W-Ni-Fe, яка складається з кривої течії, діаграми пластичності та графіка залежностей «твердість-напруження-деформації». Встановлені закономірності механіки процесу редукування коротких циліндричних заготовок, зокрема визначено напружено-деформований стан в процесі, величини контактних напружень та енергосилових характеристик в т. ч. для матеріалів з подібною реологією до дослідженого сплаву;

3. *Отримав подальший розвиток* метод оцінки деформовності металу заготовок в процесі холодного редукування, який відмінно від існуючих встановлює межі використання критеріїв деформовності в залежності від кривини шляху деформування, величини гідростатичного тиску і показника, що враховує вплив третього інваріанту тензора напружень;

4. *Набув подальшого розвитку* метод оцінювання технологічної спадковості для виробів, отриманих способами холодного формоутворення, який відмінно від існуючих полягає у визначенні величини таких параметрів: твердості виробу, нерівномірності розподілу деформацій та залишкової пластичності, що дозволяє визначити раціональні технологічні параметри холодного редукування коротких заготовок зі сплаву системи W-Ni-Fe.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Результати досліджень фізико-механічних властивостей матеріалу сплаву системи W-Ni-Fe (W – 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%), серед яких крива зміцнення, діаграма пластичності, тарувальні графіки твердість HV – інтенсивність напружень σ_i – інтенсивність деформацій ϵ_i .

2. Методичні рекомендації щодо вибору феноменологічних критеріїв деформування при розрахунках використаного ресурсу пластичності для характерних зон заготовки в процесі її редукування.

3. Методика визначення технологічних параметрів процесу редукування, яка дозволяє отримати заготовки з прогнозованими властивостями без технологічних відмов при вивченні поведінки реологічно подібних матеріалів; врахування впливу історії деформування; градієнта деформацій.

4. Результати роботи впроваджено в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля м. Київ та в навчальний процес Вінницького національного технічного університету.

У дисертаційній роботі отримано новий розв'язок актуальної науково-технічної задачі: вдосконалення процесу холодного редукування коротких циліндричних заготовок методами технологічної механіки.

Особистий внесок здобувача полягає в тому, що у дисертації не використовувалися ідеї співавторів публікацій. Усі принципові теоретичні й експериментальні результати отримані автором самостійно. При виконанні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві, автором отримані наступні результати: автор виконав експериментальні дослідження, що пов'язані з формуванням карти матеріалу, проаналізував отримані результати, побудував криву течії, градуєва-

льний графік твердість-напруження-деформації, діаграму пластичності [1], [2], [7]; автор встановив кількісну величину похибки деформаційних критеріїв руйнування для шляхів деформування різної кривини [3], [4], [5]; автором сформована імітаційна модель процесу редукування, отримані основні залежності для розрахунку параметрів механіки процесу редукування, на основі яких отримано напружено-деформований стан для процесу редукування [6]; автором розвинута методика оцінки впливу параметрів процесу на технологічну спадковість та якість одержаних виробів [8].

Ключові слова: напруження, пластичність, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, процеси холодного редукування, деформовність, пластична деформація, кривизна траєкторій деформацій, використаний ресурс пластичності, траєкторія навантаження, технологічна спадковість, сплав системи W-Ni-Fe.

ABSTRACT

Gutsaluk O.V. Improvement of the process of cold reduction of short cylindrical blanks by the methods of technological mechanics. - Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.03.05 "Processes and machines of pressure treatment". - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2019

The dissertation is directed to the solution of the important scientific and technical problem of increasing the efficiency of the process of cold reduction by providing recommendations on the angle of inclination of the working cone of the matrix and the relative compression of the workpiece based on the use of methods of technological mechanics. This used the phenomenological theory of deformability in the processing of workpieces with a relative length (up to diameter) 2..5 on the basis of powder alloys of the W-Ni-Fe system with ensuring trouble-free molding.

Formed alloy map of W-Ni-Fe system (W- 89%, Ni - 7,5%, Fe - 3,5%), containing flow curve, standard mechanical characteristics, plasticity diagram and calibration

graph: hardness - stress - deformation. A simulation model of the reduction process is developed. The analysis of stress-strain state, which allowed to determine the parameters of the reduction process (compression, angle of the matrix, coefficient of friction) and features of its mechanics in terms of uneven deformations, deformation paths, contact stresses.

The analysis of the stress-strain state in the reduction process, which is represented in the form of deformation paths in coordinates, dimensionless indices of the stress state - the accumulated intensity of deformations showed that in some areas of the workpiece simple ways of deformation are realized. This allows to estimate the used plasticity resource to use the simplest deformation criteria, on the basis of which engineering dependencies have been developed to determine the limit values of technological parameters depending on the physical and mechanical properties of the material being processed. The deformation paths in the surface deformation cell are characterized by considerable curvature. In the specified zone is realized volumetric stress state, which caused the need to calculate the used plasticity resource using a modified criterion V. A. Ogorodnikov, taking into account the influence of the third invariant of the stress tensor and the history of deformation.

The expediency of using deformation criteria of deformability to determine the used material plasticity resource of the workpiece material in its characteristic zones is considered, taking into account the curvature of the deformation paths. In particular, for the ways of deformation of small curvature, an engineering mathematical apparatus for calculating the plasticity resource used in the characteristic sections of the workpiece material subjected to cold plastic reduction has been developed. Thus, an engineering dependence was obtained that allows one to calculate the matrix point for a single-cycle reduction, which ensures a fault-free formation.

It is shown that the nature of the distribution of contact stresses can be the basis for the development of rational geometry of the contour of the matrix. In axisymmetric reduction, matrices based on second-order curves should be used to reduce the deformation force and increase the residual plasticity resource.

Theoretical and experimental studies of the influence of the angle of inclination of the tool and the amount of compression on the prediction of technological heredity have been performed.

The research results were implemented at the Institute of Superhard Materials. V. M. Bakul (Kyiv) in the form of providing techniques and recommendations for improving the technological process and determining its rational parameters, which gives a significant reduction in time for technological preparation, reducing the number of defective products. The results of the dissertation were also incorporated into the educational process of Vinnitsa National Technical University.

Research methods. The theoretical studies are based on the methods of applied theory of plasticity, phenomenological theory of deformability of metal, ITU.

Physico-mechanical characteristics of the studied materials were determined with the use of modern devices and equipment. The experiments were carried out on the equipment of the Department of OMPM VNTU. Full-scale testing and physical modeling of the reduction process were performed at the Institute of Superhard Materials. VN Bakul, NAS of Ukraine. Experimental verification of the results of theoretical calculations was carried out using the hardness method.

Mathematical statistics methods were used to evaluate the accuracy of the results obtained and the degree of convergence, theoretical and experimental studies.

Scientific novelty of the obtained results.

1. The ways of deformation of metal in characteristic points of short blanks, depending on the basic technological parameters of the process of direct extrusion (reduction), were first constructed, and the location of hazardous zones on the sign of exhaustion of the plasticity of metal is substantiated;

2. For the first time, a material map for the W-Ni-Fe alloy system was formed, which consists of a flow curve, a plasticity diagram and a graph of hardness-strain-strain relationships. The regularities of the mechanics of the process of reduction of short cylindrical blanks are determined, in particular the stress-strain state in the process, the magnitudes of contact stresses and energy-power characteristics, including for materials with a similar rheology to the investigated alloy, have been determined;

3. The method of estimating the deformability of the workpiece metal in the process of cold reduction has been further developed, which, unlike the existing ones, sets limits to the use of deformability criteria depending on the curvature of the deformation path, the magnitude of the hydrostatic pressure and the index taking into account the influence of the third invariant of the tensor;

4. The method of estimating technological heredity for products obtained by cold forming methods, which differs from the existing ones, consists in determining the value of the following parameters: hardness of the product, uneven distribution of deformations and residual plasticity, which allows to determine the rational technological parameters of cold melting. W-Ni-Fe systems.

The practical significance of the results obtained .:

1. The results of studies of the physical and mechanical properties of the material of the alloy of the W-Ni-Fe system (W - 89%, Ni - 7.5%, Fe - 3.5%), among which the hardening curve, plasticity diagram, tare graphs HV hardness - the intensity of the stresses σ_i - the intensity of the deformations ϵ_i ;.

2. Methodical recommendations for the selection of phenomenological deformation criteria in the calculations of the plasticity resource used for the characteristic areas of the workpiece in the process of its reduction.

3. The technique of determining the technological parameters of the reduction process, which allows to obtain workpieces with predicted properties without technological failures in the study of the behavior of rheologically similar materials; taking into account the impact of deformation history; deformation gradient.

4. The results of the work were implemented at the Institute of Superhard Materials. V.M. Bakul Kyiv and the educational process of Vinnitsa National Technical University.

In the dissertation the new solution of the current scientific and technical problem is obtained: improvement of the process of cold reduction of short cylindrical billets by the methods of technological mechanics.

The personal contribution of the applicant is that the ideas of the co-authors of the publications were not used in the dissertation. All fundamental theoretical and

experimental results were obtained by the author independently. In the research, the results of which are published in co-authorship, the author obtained the following results: the author performed experimental studies related to the formation of a map of the material, analyzed the results, built a flow curve, a plot of hardness-stress-strain, plasticity diagram [1], [2], [7]; the author has determined the quantitative value of the error of deformation criteria of fracture for the ways of deformation of different curvatures [3], [4], [5]; the author created a simulation model of the reduction process, obtained the basic dependencies for the calculation of the parameters of the mechanics of the reduction process, on the basis of which a stress-strain state for the reduction process was obtained [6]; the author developed a method of estimating the influence of process parameters on technological heredity and quality of the obtained products [8].

Keywords: stress, plasticity, stress-strain state, finite element method, cold reduction processes, deformability, plastic deformation, curvature of deformation trajectories, used plasticity resource, load trajectory, technological inheritance, W-Ni-Fe system alloy.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] O. V. Hrushko, O. V., Hutsalyuk, O. V., Andreev, I. V., Mel'nychenko and V. V., Studenets', «Mechanical Characteristics of Alloys of the W–Ni–Fe System», *Materials Science*. № 54(1), pp. 88-95, 2018.

[2] А. В. Грушко, Т. И. Молодецкая, О. В. Гуцалюк и Р. С. Ткаченко, «Деформированное состояние в условиях поперечного изгиба толстолистовой широкой заготовки», *Вісник НТУ «ХПІ», Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. № 46(952), с. 204-212, 2012.

[3] В. А. Федотов, О. В. Гуцалюк и Р. С. Ткаченко, «Выбор критериев разрушения в задачах обработки металлов давлением», *Вісник ХНУ, Збірник наукових праць. Серія: Технічні науки*. №6(219), с. 20-26, 2014.

[4] В. А. Огородников, А. В. Грушко и А. В. Гуцалюк, «Выбор критериев деформируемости при оценке использованного ресурса пластичности в процессах обработки металлов давлением», *Вісник НТУ «ХПІ», Збірник наукових праць. Се-*

рія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. № 43(1086), с. 127-136, 2014.

[5] В. А. Огородников, А. В. Грушко и А. В. Гуцалюк, «История деформирования, определяющая применение феноменологических критериев разрушения в процессах обработки давлением», *Науковий журнал «Вісник машинобудування та транспорту»*. Випуск 1, с. 67-77, 2015.

[6] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Моделювання процесу редукування циліндричних заготовок з визначенням основних параметрів деформованого стану», *Обработка материалов давлением*. № 1(42), с. 57-62, 2016.

[7] І. В. Андреев, О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк, В. В. Мельниченко та С. Ф. Студенець, «Механічні характеристики сплавів системи W-Ni-Fe», *Міжнародний науково-технічний журнал «Фізико-хімічна механіка матеріалів»*. № 1(54), с. 57-62, 2018 .

[8] О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк та Ю. О. Слободянюк «Спосіб відбору партій сталевий маловуглецевої катанки для волочіння дроту з прогнозованими механічними характеристиками», Пат.123757 Україна, МПК G01N 3/08, G01N 3/28 № u 2017 08508, Бюл. №5, заявл. 19.08.2017, опубл. 12.03.2018.

[9] В. А. Огородников та О. В. Гуцалюк «Параметри напруженого стану діаграм пластичності» на *XLI-й регіональній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студ. університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області*. Вінниця, ВНТУ, 14 – 15 травня 2012. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2012/inmt>.

[10] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Побудова діаграм руйнування в залежності від параметра напруженого стану, що враховує властивості металу» на *XLII-й регіональній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області*. Вінниця, ВНТУ, 21 – 22 березня 2013. [Електронний ре-

сурс]. Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2013/inmt>.

[11] О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк та Р. С. Ткаченко, «Вплив історії деформування на пластичність», на Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції: Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи, 23 – 26 квітня 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=16&mat=105>.

[12] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Карта важкого сплаву системи вольфрам-нікель-залізо для процесів холодної обробки тиском» на VI-й Міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти”, м. Київ, 16-17 грудня 2015 - с.1 Режим доступу: <https://kpi.ua/15-12-14>.

[13] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Моделювання МКЕ процесу редукування циліндричних заготовок з важкого сплаву системи вольфрам-залізо-нікель» на VII-й Міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти” Київ-Херсон, 30 травня – 03 червня, 2016, с.2.

[14] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Моделювання процесу редукування коротких циліндричних заготовок на основі сплаву системи вольфрам-нікель-залізо» на Міжнародній інтернет конференції «Теоретичні і практичні проблеми теорії пластичності та обробки металів тиском» Вінниця, 26 – 27 жовтня 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://omdconf.vntu.edu.ua/publish_ua.html.

[15] О. В. Гуцалюк, «Деякі аспекти механіки редукування циліндричних заготовок із забезпеченням безвідмовного формоутворення» на VIII-й Міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти” Київ – Херсон, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 29 травня – 02 червня 2017, с.3.

[16] О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк та Г. А. Лічман, «Карта матеріалу ствола (сталь 38Х2МЮА)», на XLVI -й Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту, Вінниця, ВНТУ, 27 – 28 березня 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all->

[fmt/all-fmt-2017/paper/view/3032](https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2017/paper/view/3032).

[17] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Деформовність коротких циліндричних заготовок в процесі їх редукування» на *XLVI -ій Науково-технічній конференції факультету машинобудування та транспорту*, Вінниця, ВНТУ, 27 – 28 березня 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2017/paper/view/3038>.

[18] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Моделювання напруженого стану в процесах вісесиметричного пластичного деформування», на *X-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти”* Київ-Херсон НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 3 – 7 червня 2019, 1 с. Режим доступу: <http://kntu.net.ua/ukr/Pro-universitet2/Novini-universitetu/H-Mizhnarodna-naukovo-tehnichna-konferenciya-Teoretichni-ta-praktichni-problemi-v-obrobci-materialiv-tiskom-i-yakosti-fahovoyi-osviti>.

[19] В. А. Огородников, М. И. Побережный и О. В. Гуцалюк, «Матрица для редуцирования сплавов W-Ni-Fe обеспечивающая снижение контактных напряжений и улучшение механических свойств изделия» на *1-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019»*, Вінниця, ВНТУ, 13 – 15 травня 2019, с.

[20] О. В. Гуцалюк, «Технологічні відмови в процесі редукування» на *XLVIII-ій Науково-технічній конференції факультету машинобудування та транспорту*, Вінниця, ВНТУ, 22 березня 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2019/index>.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	16
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	23
1.1 Процеси осесиметричного деформування заготовок.....	23
1.2 Технологічний процес редукування	24
1.2.1 Технологічний процес редукування циліндричних заготовок	24
1.2.2 Напружено-деформований стан в процесі редукування циліндричних заготовок	27
1.2.3 Зміна фізико-механічних властивостей важких сплавів типу W-Ni-Fe в процесі спікання.....	32
1.2.4 Методи пластичного деформування які впливають на властивості сплаву системи W-Ni-Fe після деформації.....	35
1.3 Деформовність заготовок в процесах обробки металів тиском.....	37
1.3.1 Діаграми пластичності.....	37
1.3.2 Критерії деформовності.....	39
1.3.3 Оцінювання деформовності заготовок з використанням критеріїв деформовності.....	42
Висновки до розділу.....	43
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКИ, ОБЛАДНАННЯ, КАРТА СПЛАВУ W-Ni-Fe.....	45
2.1 Передумови формування карти матеріалу для процесу редукування.....	45
2.2 Обладнання	46
2.3 Карта матеріалу W-Ni-Fe	48
2.3.1 Крива течії матеріалу	48
2.3.2 Діаграма пластичності сплаву W-Ni-Fe.....	53
2.3.3 Градувальний графік твердість – інтенсивність напружень–інтенсивність деформацій.....	56
2.4 Фізико-механічні характеристики отриманих заготовок сплаву W-Ni-Fe	58
Висновки до розділу.....	58
РОЗДІЛ 3 МЕХАНІКА ПРОЦЕСУ РЕДУКУВАННЯ.....	60
3.1 Передумови для моделювання процесу редукування за допомогою МСЕ.....	60
3.1.1 Вибір та обґрунтування методів дослідженн.....	60

	15
3.1.2 Особливості моделювання за допомогою МСЕ.....	62
3.2 Аналіз кінематики деформування процесу редукування	65
3.2.1 Постановка задачі.....	65
3.2.2 Технологічні відмови.....	66
3.3 Напружено-деформований стан в процесах редукування циліндричних заготовок.....	70
3.3.1 Вибір меж технологічних параметрів.....	70
3.3.2. Аналіз результатів розрахунку деформованого стану	72
3.3.3 Особливості напруженого стану процесу редукування	78
3.3.4 Контактні напруження при редукуванні	80
3.3.3 Моделювання характеристик напруженого стану в процесі редукування для матеріалів з подібною реологією.....	82
Висновки до розділу.....	84
РОЗДІЛ 4 ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ДЕФОРМОВНОСТІ ТА ЇЇ ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ В ТЕХНОЛОГІЇ РЕДУКУВАННЯ.....	86
4.1 Математична модель процесу з застосуванням теорії деформовності..	86
4.2 Деформовність циліндричних заготовок в процесі їх редукування	89
4.3 Практичне використання результатів досліджень.....	98
4.3.1 Технологічне оснащення: пристрій для редукування сплаву типу W-Ni-Fe	98
4.3.2 Одноциклове редукування циліндричних заготовок зі сплаву типу W-Ni-Fe.....	100
4.3.3 Багатоциклове редукування зразків з сплаву типу W-Ni-Fe.....	107
Висновки до розділу.....	116
ВИСНОВКИ	118
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	121
ДОДАТКИ.....	132
Додаток А Показники твердості по перерізу шліфа	
Додаток Б Програмний модуль по автоматизованому розрахунку параметрів напружено-деформованого стану	
Додаток В Акти впровадження	
Додаток Г Список публікацій здобувача за темою дисертації	

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. В зв'язку з появою нових матеріалів та застосуванням існуючих матеріалів у виробках спеціального призначення, в виробках, до яких висуваються особливі вимоги до механічних властивостей, виникає необхідність обробки цих матеріалів ефективними методами обробки тиском. Наприклад, використання спеченого сплаву системи W-Ni-Fe в виробках спеціального призначення регламентується конкретними вимогами до механічних властивостей виробу (нерівномірність розподілу деформацій та твердості, максимальна залишкова пластичність тощо). Для обробки таких вісесиметричних заготовок, які, як правило, мають співвідношення довжини до діаметра 2..5 (далі - короткі) можуть бути запропоновані низка методів холодного пластичного деформування (волочіння, пресування, кування, тощо). Зважаючи на особливості технології отримання вихідних заготовок та їх розмірів в Інституті Надтвердих Матеріалів ім. В. М. Бакуля (Відділ № 20 - Формування прецизійних елементів складно-профільних виробів) була розвинута технологія прямого видавлювання цих заготовок з відносно невеликими обтисками (натягами), яка отримала назву редукування. Даний спосіб забезпечує високу точність і якість виробів та є одним з ефективних способів холодної формозміни коротких циліндричних заготовок з прогнозованими механічними характеристиками. Визначення параметрів процесу є предметом досліджень багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених, зусилля яких були спрямовані, головним чином, на енергосилові параметри процесів. Разом з тим, питання технологічної механіки, до яких відноситься гранична формозміна заготовок, формування фізико-механічних властивостей матеріалів, забезпечення технологічної спадковості на основі моделі (карти) матеріалу, щоб попередити бракування внаслідок руйнування металу недостатньо відображені в науково-технічній літературі. У зв'язку з викладеним, завдання подальшого розвитку і вдосконалення технологічних процесів редукування на основі формування карт матеріалів, розробки розрахункових моделей і практичних рекомендацій щодо вибору

технологічних режимів з метою підвищення ефективності процесів редукування коротких циліндричних заготовок є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до Закону України "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки" (Відомості Верховної Ради України, 2011 р., № 4, ст. 23; 2014 р., № 2-3, ст. 41) та постанови Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 р. № 942 "Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року" (зі змінами від 23 серпня 2016 р. № 556) за напрямком «Створення та застосування технологій отримання, зварювання, з'єднання, діагностики та оброблення конструкційних, функціональних і композиційних матеріалів». Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ і наукової школи "Розвиток феноменологічної теорії руйнування матеріалів при великих пластичних деформаціях та розробка на цій основі нових та удосконалення існуючих технологій обробки металів тиском". Автор був виконавцем держбюджетних науково-дослідних робіт ВНТУ, передбачених планами Міністерства освіти і науки України та виконаних на кафедрі опору матеріалів та прикладної механіки (ОМПМ) ВНТУ: № держреєстрації 0112U001366; № держреєстрації 0114U003458; № держреєстрації 0116U004711; госпоговірної теми № держреєстрації 0117U005540; а також теми III-2-15 (тема виконувалась в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесів холодного редукування на основі дослідження напружено-деформованого стану, деформовності, оцінки технологічної спадковості заготовок та удосконалення технологічних режимів редукування коротких заготовок.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені і вирішені такі основні завдання:

- встановити шляхи і проблеми розвитку холодної обробки циліндричних заготовок редукуванням;

- сформувати карту матеріалу сплаву системи W-Ni-Fe (W – 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%), яка містить криву зміцнення, діаграму пластичності, тарувальні графіки твердість HV – інтенсивність напружень σ_i – інтенсивність деформацій ϵ_i ;

- виконати аналіз напружено-деформованого стану циліндричних заготовок з відносною довжиною 2..5 в процесі редукування методом скінченних елементів (МСЕ) та здійснити аналіз механіки вказаного процесу при варійованих параметрах процесу;

- провести аналіз критеріїв деформовності, з метою їх застосування в процесах редукування; проаналізувати шляхи деформування в процесі редукування та виявити їх особливості, що істотно впливають на деформовність; розробити розрахунковий апарат оцінки раціональних параметрів процесу редукування на основі оцінки деформовності заготовок з використанням феноменологічних критеріїв деформування з врахуванням комплексу факторів, що роблять істотний вплив на пластичність;

- розробити рекомендації щодо оцінки показників технологічної спадковості на стадії прогнозування технологічного процесу редукування для сплаву системи W-Ni-Fe.

Об’єкт дослідження. Холодне пластичне деформування циліндричних заготовок.

Предмет дослідження. Закономірності процесу редукування коротких циліндричних заготовок, механіка процесу, деформовність та технологічна спадковість виробів.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень покладено методи прикладної теорії пластичності, феноменологічна теорія деформовності металу, МСЕ.

Фізико-механічні характеристики досліджуваних матеріалів визначали із застосуванням сучасних приладів і обладнання. Експерименти проводилися на обладнанні кафедри ОМППМ ВНТУ. Натурні випробування та фізичне моделювання процесу редукування виконувались в Інституті надтвердих матеріалів ім.

В. М. Бакуля НАН України. Експериментально перевірка результатів теоретичних розрахунків проводилась із застосуванням методу твердості.

Для оцінки точності отриманих результатів і ступеня збіжності, теоретичних і експериментальних досліджень використовувалися методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів.

- *Вперше* побудовано шляхи деформування металу в характерних точках коротких заготовок в залежності від основних технологічних параметрів процесу прямого видавлювання (редукування) та обґрунтовано розташування небезпечних зон за ознакою вичерпання ресурсу пластичності металу;

- *Вперше* сформовано карту матеріалу для сплаву системи W-Ni-Fe, яка складається з кривої течії, діаграми пластичності та графіка залежностей «твердість-напруження-деформації». Встановлені закономірності механіки процесу редукування коротких циліндричних заготовок, зокрема визначено напружено-деформований стан в процесі, величини контактних напружень та енергосилових характеристик в т. ч. для матеріалів з подібною реологією до дослідженого сплаву;

- *Отримав подальший розвиток* метод оцінки деформовності металу заготовок в процесі холодного редукування, який відмінно від існуючих встановлює межі використання критеріїв деформовності в залежності від кривини шляху деформування, величини гідростатичного тиску і показника, що враховує вплив третього інваріанту тензора напружень;

- *Набув подальшого розвитку* метод оцінювання технологічної спадковості для виробів, отриманих способами холодного формоутворення, який відмінно від існуючих полягає у визначенні величини таких параметрів: твердості виробу, нерівномірності розподілу деформацій та залишкової пластичності, що дозволяє визначити раціональні технологічні параметри холодного редукування коротких заготовок зі сплаву системи W-Ni-Fe.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Результати досліджень фізико-механічних властивостей матеріалу

сплаву системи W-Ni-Fe (W – 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%), серед яких крива зміцнення, діаграма пластичності, тарувальні графіки твердість HV – інтенсивність напружень σ_i – інтенсивність деформацій ϵ_i ;

2. Методичні рекомендації щодо вибору феноменологічних критеріїв деформування при розрахунках використаного ресурсу пластичності для характерних зон заготовки в процесі її редукування;

3. Методика визначення технологічних параметрів процесу редукування, яка дозволяє отримати заготовки з прогнозованими властивостями без технологічних відмов при вивченні поведінки реологічно подібних матеріалів; врахування впливу історії деформування; градієнта деформацій.

Особистий внесок здобувача. У дисертації не використовувалися ідеї співавторів публікацій. Усі принципові теоретичні й експериментальні результати отримані автором самостійно. При виконанні досліджень, результати яких опубліковані в співавторстві, автором отримані наступні результати: автор виконав експериментальні дослідження, що пов'язані з формуванням карти матеріалу, проаналізував отримані результати, побудував криву течії, градувальний графік твердість-напруження-деформації, діаграму пластичності [1], [2], [7], [9], [10], [12], [16]; автор встановив кількісну величину похибки деформаційних критеріїв руйнування для шляхів деформування різної кривини [3], [4], [5], [11], [17]; автором сформована імітаційна модель процесу редукування, отримані основні залежності для розрахунку параметрів механіки процесу редукування, на основі яких отримано напружено-деформований стан для процесу редукування [6], [13], [14], [18]; автором розвинута методика оцінки впливу параметрів процесу на технологічну спадковість та якість одержаних виробів [8], [15], [19], [20].

Публікації. Матеріали та основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 20 наукових роботах, з них 5 статей у спеціалізованих фахових виданнях згідно переліку МОН України, 1 публікація у закордонному виданні (входить до наукометричної бази «Scopus»), 12 тез у збірниках доповідей міжнародних наукових конференцій. За результатами досліджень отримано патент України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 143 сторінки машинописного тексту, з них 110 сторінок основного тексту, 63 рисунка і 9 таблиць. Список використаних джерел містить 102 найменування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] O. V. Hrushko, O. V., Hutsalyuk, O. V., Andreev, I. V., Mel'nychenko and V. V., Studenets', «Mechanical Characteristics of Alloys of the W–Ni–Fe System», *Materials Science*. № 54(1), pp. 88-95, 2018.
- [2] А. В. Грушко, Т. И. Молодецкая, О. В. Гуцалюк и Р. С. Ткаченко, «Деформированное состояние в условиях поперечного изгиба толстолистовой широкой заготовки», *Вісник НТУ «ХПІ», Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. № 46(952), с. 204-212, 2012.
- [3] В. А. Федотов, О. В. Гуцалюк и Р. С. Ткаченко, «Выбор критериев разрушения в задачах обработки металлов давлением», *Вісник ХНУ, Збірник наукових праць. Серія: Технічні науки*. №6(219), с. 20-26, 2014.
- [4] В. А. Огородников, А. В. Грушко и А. В. Гуцалюк, «Выбор критериев деформируемости при оценке использованного ресурса пластичности в процессах обработки металлов давлением», *Вісник НТУ «ХПІ», Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. № 43(1086), с. 127-136, 2014.
- [5] В. А. Огородников, А. В. Грушко и А. В. Гуцалюк, «История деформирования, определяющая применение феноменологических критериев разрушения в процессах обработки давлением», *Науковий журнал «Вісник машинобудування та транспорту*. Випуск 1, с. 67-77, 2015.
- [6] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Моделювання процесу редукування циліндричних заготовок з визначенням основних параметрів деформованого стану», *Обработка материалов давлением*. № 1(42), с. 57-62, 2016.
- [7] І. В. Андреев, О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк, В. В. Мельниченко та С. Ф. Студенець, «Механічні характеристики сплавів системи W-Ni-Fe», *Міжнародний науково-технічний журнал «Фізико-хімічна механіка матеріалів»*. № 1(54), с. 57-62, 2018 .
- [8] О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк та Ю. О. Слободянюк «Спосіб відбору партій сталеві малоуглецевої катанки для волочіння дроту з прогнозованими меха-

нічними характеристиками», Пат.123757 Україна, МПК G01N 3/08, G01N 3/28 № 11 2017 08508, Бюл. №5, заявл. 19.08.2017, опубл. 12.03.2018.

[9] В. А. Огородніков та О. В. Гуцалюк «Параметри напруженого стану діаграм пластичності» на *XLI-й регіональній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студ. університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області*. Вінниця, ВНТУ, 14 – 15 травня 2012. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2012/inmt>.

[10] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Побудова діаграм руйнування в залежності від параметра напруженого стану, що враховує властивості металу» на *XLII-й регіональній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області*. Вінниця, ВНТУ, 21 – 22 березня 2013. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2013/inmt>.

[11] О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк та Р. С. Ткаченко, «Вплив історії деформування на пластичність», на *Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції: Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи*, 23 – 26 квітня 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=16&mat=105>.

[12] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Карта важкого сплаву системи вольфрам-нікель-залізо для процесів холодної обробки тиском» на *VI-й Міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти”*, м. Київ, 16-17 грудня 2015 - с.1 Режим доступу: <https://kpi.ua/15-12-14>.

[13] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Моделювання МКЕ процесу редукування циліндричних заготовок з важкого сплаву системи вольфрам-залізо-нікель» на *VII-й Міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти” Київ-Херсон*,

30 травня – 03 червня, 2016, с.2.

[14] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Моделювання процесу редукування коротких циліндричних заготовок на основі сплаву системи вольфрам-нікель-залізо» на *Міжнародній інтернет конференції «Теоретичні і практичні проблеми теорії пластичності та обробки металів тиском»* Вінниця, 26 – 27 жовтня 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://omdconf.vntu.edu.ua/publish_ua.html .

[15] О. В. Гуцалюк, «Деякі аспекти механіки редукування циліндричних заготовок із забезпеченням безвідмовного формоутворення» на *VIII-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти”* Київ – Херсон, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 29 травня – 02 червня 2017, с.3 .

[16] О. В. Грушко, О. В. Гуцалюк та Г. А. Лічман, «Карта матеріалу ствола (сталь 38Х2МЮА)», на *XLVI -ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту*, Вінниця, ВНТУ, 27 – 28 березня 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2017/paper/view/3032>.

[17] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Деформовність коротких циліндричних заготовок в процесі їх редукування» на *XLVI -ій Науково-технічній конференція факультету машинобудування та транспорту*, Вінниця, ВНТУ, 27 – 28 березня 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2017/paper/view/3038>.

[18] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Моделювання напруженого стану в процесах вісесиметричного пластичного деформування», на *X-ій Міжнародній науково-технічній конференції “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти”* Київ-Херсон НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 3 – 7 червня 2019, 1 с. Режим доступу: <http://kntu.net.ua/ukr/Pro-universitet2/Novini-universitetu/H-Mizhnarodna-naukovo-tehnicna-konferenciya-Teoretichni-ta-praktichni-problemi-v-obrobci-materialiv-tiskom-i-yakosti-fahovoyi-osviti>.

[19] В. А. Огородников, М. И. Побережный и О. В. Гуцалюк, «Матрица для

редуцырования сплавов W-Ni-Fe забезпечуюча зниження контактних напружень і улучшение механічних властивостей изделия» на 1-й Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019», Вінниця, ВНТУ, 13 – 15 травня 2019, с.

[20] О. В. Гуцалюк, «Технологічні відмови в процесі редукування» на XLVIII-й Науково-технічній конференції факультету машинобудування та транспорту, Вінниця, ВНТУ, 22 березня 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2019/index>.

[21] С. А. Зайдес, А. Н. Исаев, *Технологическая механика осесимметрического деформирования*. Иркутск, Российская федерация: Изд-во ИрГТУ, 2007, 432с.

[22] В. Б. Квактун *Определение напряжений в очаге деформации при волочении*, №10 Київ, Україна: Сталь, 1973, 957с.

[23] В. Л. Колмогоров *Механика обработки металлов давлением*. Москва, СССР: Изд-во Металлургия, 1986, 688 с.

[24] В. А. Огородников, *Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении*. К., СРСР: УМК ВО, 1989.

[25].Г. Д. Дель, *Технологическая механика*. М. : Машиностроение, 1978.

[26] В. Л. Колмогоров *Напряжения. Деформации. Разрушение*. Москва, СССР: Изд-во Металлургия, 1970, 272 с.

[27] В. А. Огородников, А. В. Грушко «Моделирование процесса формообразования крутоизогнутых отводов на основе теории деформируемости», *Краматорськ, зб. наук. пр. Серія :Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 5-10, 2000.

[28] И. Я. Тарновский и др. *Теория обработки металлов давлением* Москва, СССР: Изд-во Металлургиздат, 1963, 672 с.

[29] С. И. Губкин *Теория обработки металлов давлением*. Москва, СССР: Изд-во Металлургиздат, 1947, 532 с.

[30] Г. Я. Гун *Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением*. Москва, СССР: Изд-во Металлургия, 1983, 352 с.

[31] А. А. Поздеев, Ю. И. Няшин, В. П. Трусов *Остаточные напряжения*.

Теория и приложение. Москва, СССР: Изд-во Наука, 1982, 111с.

[32] М. З. Ерманок *Прессование панелей из алюминиевых сплавов*. Москва, СССР: Изд-во Металлургия, 1976, 248 с.

[33] Л. Е. Альшевский *Тяговые усилия при холодном волочении труб*. Москва, СССР: Изд-во Металлургиздат, 1952, 147с.

[34] А. М. Розенберг, О. А. Розенберг *Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания*. Киев: Наукова думка, 1990, 320 с.

[35] А. Е. Попов *Основы теории листовой штамповки*. Москва, СССР: Изд-во: Машиностроение, 1968, 283 с.

[36] М. А. Батлер *Упрочнение деталей машин*. Москва, СССР: Изд-во: Машиностроение, 1968, 196 с.

[37] Ю. Г. Шнейдер *Технология финишной обработки давлением: Справочник*. Санкт-Петербург: Политехника, 1998, 414 с.

[38] В. М. Смелянский *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва: Машиностроение, 2002, 300 с.

[39] А. Г. Суслов *Качество поверхностного слоя деталей машин*. Москва: Машиностроение, 2000, 319 с.

[40] И. В. Кудрявцев *Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении*. Москва: Машгиз, 1951, 278с.

[41] В. Н. Подураев, В. С. Камалов *Физико-химические методы обработки*. Москва: Машиностроение, 1973 г, 346 с.

[42] В. А. Забродин . *Восстановление размеров деталей поверхностным пластическим деформированием*. Хабаровск: Изд-во Хабар, 2001, 105 с.

[43] В. Ю. Блюменштейн, «Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием», дис. . докт. техн. наук, МАМИ, Москва, 2002, 595 с.

[44] R. Sivak «Evaluation of metal plasticity and research on the mechanics of pressure treatment processes under complex loading» in *Eastern-European journal of enterprise technologies*, vol. 6/7, no. 90, P. 34-41, 2017.

[45] М. Е. Попов и др. *Технологические процессы поверхностного пластического деформирования. Монография.* Иркутск, Российская федерация: Изд-во ИрГТУ, 2007, 404с.

[46] А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, С. В. Баринов, С. А. Силантьев, «Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой», *Упрочняющие технологии и покрытия*, №6, с.13-18, 2008.

[47] Volodymyr Kukhar, Viktor Artiukh, Andrey Butyrin, Andrii Prysiazhnyi, «Stress-Strain State and Plasticity Reserve Depletion on the Lateral Surface of Workpiece at Various Contact Conditions during Upsetting», *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 692, P. 201–211, Springer, 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_22.

[48] Volodymyr Kukhar, Elena Balalayeva, Andrii Prysiazhnyi, Oleg Vasylevskyi, Iryna Marchenko, «Analysis of relation between edging ratio and deformation work done in pre-forming of workpiece by bulk buckling», *MATEC Web of Conferences*, Vol. 178, P. 02003 (6 p.), 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201817802003>.

[49] R. O. Tkachov, V. V. Kukhar, E. S. Klimov, A. H. Prysiazhnyi, «Development and Application of Tube End Forming Process with Combined Swaging and Local Differential Pre-Heating», *Materials Science Forum*, Vol. 946, pp. 755–760, 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.755>.

[50] В. В. Кухарь, Е. Ю. Балалаева, О. А. Тузенко, О. В. Василевский, «Неравномерность распределения показателей напряженно-деформированного состояния при ресурсосберегающих режимах протяжки заготовок с обкаткой в комбинированных бойках», *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного*

університету, Том 1, Випуск 1 (89), с. 22–26, Вінниця, 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: // <http://techjournal.vsau.org/files/pdfa/2403.pdf>

[51] Г. Д. Дель, В. А. Огородников, «Напряженное состояние при холодном пресовании», *Изв. ВУЗов, Цветная металлургия*, №4, с. 141-146, 1970.

[52] В. А. Огородников, *Оценка деформируемости металлов при обработке давлением*, Киев, Украина: Высшая школа, 1983.

[53] С. А. Зайдес, *Остаточные напряжения и качество калиброванного металла*, Иркутск, Российская федерация: Изд-во ИрГТУ, 1992, 200с.

[54] М. М. Вахутинский и др., «Матрица для горячего пресования металлов», Авт. Свидетельство № 365184, В 21, с. 32/01.

[55] М. М. Вахутинский и др., «Матрица для перссования труднодеформируемых металлов», Авт. Свидетельство № 365185, В 21, с. 32/01.

[56] В. И. Гаращенко, «Исследование поляризации-оптическим методом закономерностей взаимодействия пластически деформируемого тела с упругим инструментом», Автореферат кандидатской диссертации, 1974г.

[57] Р. И. Непершин, «Оптимальный профиль матрицы для пресования» в *Исследование процессов пластического течения*. Изд-во Наука, 1971 г.

[58] И. А. Смарагдов, «Пластическое формоизменение в матрицах с вогнуто-выпуклым контуром рабочей полости» в *Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением*, вып 3, Тула, 1975г.

[59] В. А. Огородников, В. М. Гаврилов, В. А. Райныш, «Матрица для пресования изделий», авт. с. 1152140А СССР, МКИЗ кл. 21 25.02., №363724; заявл. 1983г., опубл. 1985г.

[60] В. Г. Нахайчук, В. А. Огородников, В. М. Гаврилов «Пластичность слоистых материалов при волочении в условиях гидроэкструзии», *Физика и техника высоких давлений*, №12, с. 100-103, 1983.

[61] В. А. Огородников, В. Г. Нахайчук, «Методика расчета ресурса пластичности при осесимметричном выдавливании» в *Исследование в области пластичности и обработки металлов давлением*, Вып 5, Изд-во Тульского политехнического института, 1977.

[62] S. G. Caldwell, «Variation of Ni/Fe Ratio in W-Ni-Fe Heavy Alloys» *Tungsten and Tungsten Alloys*, №1, P. 89–96, 1992.

[63] С. С. Кипарисов, Л.С. Водопьянова, Ю.А. Эйдук, «Исследование структуры и свойств сплавов W-Ni-Fe при термической обработке», *Твердые сплавы и тугоплавкие металлы*, ВНИИТС, с. 280 – 287, 1976.

[64] Р.В. Минакова, И.С. Головина, В.М. Адеев, М.Е. Головкова, «Неоднородность распределения основных элементов и примесей в порошковых сплавах W-Ni-Fe», *Порошковая металлургия*, № 8, с. 81 – 88, 1990.

[65] A. Sunwoo, S. Groves, D. Goto, H. Hopkins, «Effect of matrix alloy and cold swaging on micro-tensile properties of tungsten heavy alloys», in *Mater Lett*, №60, p. 321–5, 2006.

[66] B. Katavić, Z. Odanović, M. Nikačević, «Investigation of the rotary swaging and heat treatment on the behavior of W- and γ -phases in PM 92.5W–5Ni–2.5Fe–0.26Co heavy alloy» in *Mater Sci Eng A* № 492, p. 337–54, 2008.

[67] Q. Wei, L. J. Kecskes, «Effect of low-temperature rolling on the tensile behavior of commercially pure tungsten» in *Mater Sci Eng A*, №491, p.62–69, 2008.

[68] Z. H. Zhang, F.C. Wang, S.K. Li et al., «Deformation characteristics of the 93W–4.9Ni 2.1Fe tungsten heavy alloy deformed by hydrostatic extrusion», *Mater. Sci. Eng. A.*, №435-436, p. 632–637, 2006.

[69] X. Gong, J. L. Fan, F. Ding, M. Song, B. Y. Huang, «Effect of tungsten content on microstructure and quasi-static tensile fracture characteristics of rapidly hot-extruded W-Ni-Fe alloys» in *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, №30, p 71-77, 2012.

[70] S. N. Mathaudhu, A. J. deRosset, K. T. Hartwig, L. J. Kecskes, «Microstructures and recrystallization behavior of severely hot-deformed tungsten» in *Mater. Sci. Eng. A*, № 503, p. 28–31Ю. 2009.

[71] Q. Wei, T. Jiao, K. T. Ramesh, E. Ma, L. J. Kecskes, L. Magness, «Mechanical behavior and dynamic failure of high-strength ultrafine grained tungsten under uniaxial compression», in *Acta Mater* №54, p. 77–87, 2006.

[72] О. В. Грушко Карты материалов в холодной обработке давлением / О. В. Грушко - Вінниця : ВНТУ, 2015. – 347с.

[73] Г. А. Смирнов-Аляев, *Критерии пластичности степени деформируемости и начала разрушения металлов. Инженерные методы расчёта процессов обработки металлов давлением.* Москва, СССР: Изд-во Металлургиздат, 1964.

[74] Г.А. Смирнов-Аляев, *Механические основы пластической обработки металлов.* Москва: Машиностроение, 1962, 271с.

[75] И. О. Сивак, «Пластичность металлов при плоском напряжённом состоянии», *Совершенствования процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении*, Краматорск: ДГМА, с. 168-171, 2000.

[76] В. М. Михалевич, «Модели накопления повреждений для тел с начальной и деформационной анизотропией», *Изв. АН СССР. Металлы*, № 5, с. 144–151, 1993.

[77] В. М. Михалевич, *Тензорні моделі накопичення пошкоджень*, Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998, 195 с.

[78] А. А. Ильющин, «Об одной теории длительной прочности», *Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела*, № 4, с. 21–35, 1967.

[78] Г. Д. Дель, «Пластичность деформированного металла давлением», *Физика и техника высоких давлений*, № 11, с. 28–32, 1983.

[79] ГОСТ 25.503-80, *Расчёты и испытания на прочность методы механических испытаний металлов, Метод испытания на сжатие.* Москва, 1980.

[80] ГОСТ 1497-84, *Металлы, Методы испытаний на растяжение* Москва, 1984.

[81] ГОСТ 3665–80, *Металлы. Метод испытания на кручение*, Москва, 1980.

[82] П. Людвиг, «Основы технологической механики», *Расчеты на прочность: сборник научных трудов*, вып. 15, с. 130-166, 1970.

[83] Г. Д. Дель, В.А.Огородников, «Изменение твердости металла при немонотонном нагружении», *Изв. ТПИ*, 1972, с. 225.

[84] В. А. Огородников, «Приложение метода определения напряженно-деформированного состояния в пластичной области измерением твердости деформированного металла к решениям задач технологической механики», *Вопросы*

механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования, Сб. научных трудов института сверхтвердых материалов им. Бакуля В.М. НАН Украины, Сер. 1: Процессы механической обработки, станки и инструменты, Киев, с. 359-366, 2002.

[85] В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак, *Энергия. Деформации. Разрушение. (Задачи автотехнической экспертизы). Монография*, Винница, УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с. ISBN 966-641-117-2.

[86] Е. П. Унксов, *Инженерные методы расчёта усилий при обработке металлов давлением*. М.: Машгиз, 1955. – 280 с.

[87] В. Ф. Потапкин, «Метод полей линий скольжения в исследовании процессов прокатки», *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*. Зб. наук. пр., Краматорськ, с. 145–165, 2002.

[88] Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин *Теория процессовковки*. М.: Высш. школа, 1977, 295 с.

[89] Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши, *Механика пластических деформаций при обработке металлов*. М.: Машиностроение, 1968. – 504 с.

[90] В. А. Евстратов, *Теория обработки металлов давлением*. Харьков: Вища школа, 1981. – 248 с.

[91] И. С. Алиев, В. М. Гридасов, «Анализ процессов комбинированного выдавливания методом верхней оценки», *Сборник научных статей*. Краматорск: ДГМА, Вып. 3, с. 62–65, 1996.

[92] . М. Макушок и др., *Теоретические основыковки и горячейштамповки*. Минск: Наука и техника, 1968. – 408 с.

[93] Ю. М. Чижиков, *Теория подобия и моделирования процессов обработки металлов давлением*. М.: Металлургия, 1970. – 296 с.

[94] А. Ю. Муйземнек, «Моделирование процесса объемной штамповки», М.: CAE-Services, 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cae-services.ru/data/164M.pdf>.

[95] М. В. Илюшкин, «Моделирование процесса рубки профиля различными формами ножей», М.: CAE-Services, 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cae-services.ru/data/241M.pdf>.

[96] А. А. Богач, «Моделирование формования заготовки сильфона», М.: CAE-Services, 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cae-services.ru/data/231M.pdf>.

[97] М. В. Илюшкин, «Исследование процесса осадки цилиндрической заготовки в программе LS-DYNA», М : CAE-Services, 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cae-services.ru/data/246M.pdf>.

[98] А. Ю. Муйземнек, «Математическое моделирование процесса листовой штамповки», М. : CAE-Services, 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cae-services.ru/data/173M.pdf>.

[99] А. А. Восканьянц, А. В. Иванов, «Моделирование процесса поперечно винтовой прокатки на основе эйлера описания движения сплошной среды», *Наука и образование*, № 1, 2009. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/113356.html>.

[100] В. А. Лунев, *Математическое моделирование и планирование эксперимента*. СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 164 с.

[101] Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов, *Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов*. М. : Машиностроение, София-Техника, 1980. – 304 с.

[102] О. Н. John, *LS-DYNA : Theoretical manual*. Livermore : Livermore Software Technology Corporation, 1998. – 498 p.