

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 приповерхневому 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 формування.

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 принципіві 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 e_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 «ХПИ», 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 «ХПИ», 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 сталеві малоуглецевої 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-ій 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-ій 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 38X2МЮА)», 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 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 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 конференція 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	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

e_1, e_2, e_3 – головні логарифмічні деформації;

\bar{e}_i – накопичена інтенсивність деформації;

e_i – інтенсивність деформації;

e_p – накопичена інтенсивність деформації до моменту руйнування
(гранична деформація);

σ_i – інтенсивність напружень;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальні напруження на площадках, перпендикулярних до
координатних осей y_z, x_y, z_x ;

$\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z$ – нормальні напруження в циліндричній системі координат;

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ – дотичні напруження в площинах yz, xy, zx ;

$\tau_{rz}, \tau_{\varphi r}, \tau_{z\varphi}$ – дотичні напруження в циліндричній системі координат;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні нормальні напруження $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$;

σ – гідростатичний тиск;

σ_{ij} – компоненти тензора напружень при скороченому записі;

S_{ij} – компоненти девіатора напружень при скороченому записі;

$I_1(T_\sigma), I_2(T_\sigma), I_3(T_\sigma)$ – інваріанти тензора напружень;

$I_1(D_\sigma), I_2(D_\sigma), I_3(D_\sigma)$ – інваріанти девіатора напружень;

$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i} = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}}$ – показник напруженого стану;

$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}}$ – показник напруженого стану, що враховує третій інваріант

тензора напружень;

$\eta = \eta(\bar{e}_i)$ – шлях деформування часток матеріалу;

$e_p = f(\eta)$ – діаграма пластичності;

$\sigma_i = f(e_i)$ – крива текучості матеріалу;

$\lambda_1 = \ln \frac{e_p(\eta=0)}{e_p(\eta=1)}$, $\lambda_2 = \ln \frac{e_p(\eta=-1)}{e_p(\eta=0)}$ – коефіцієнти чутливості пластичності до

зміни схеми напруженого стану;

$e_p = \int \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon_{ij} d\varepsilon_{ij}$ – міра пластичності, накопичена інтенсивність деформацій до моменту руйнування;

цієї до моменту руйнування;

ε_{ij} – компоненти тензора пластичної деформації;

r_0, z_0 – Лагранжові координати;

r, z – Єйлерові координати;

ψ – використаний ресурс пластичності;

ω – коефіцієнт, що враховує вплив історії деформування на пластичність;

m – коефіцієнт, що враховує нерівномірність деформацій;

$\delta = \frac{d_{загот} - d_{інстр}}{d_{інстр}}$ – відносний обтиск – величина, що характеризує умовну

деформацію заготовки у відносних одиницях;

МСЕ – метод скінченних елементів;

НДС – напружено-деформований стан;

НС – напружений стан.

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_1 – 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 ОМІМ 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.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Процеси осесиметричного деформування заготовок

Для обробки осесиметричних заготовок використовують різні методи пластичного деформування: дорнування, волочіння, редукування, осесиметричне видавлювання. Всі ці технологічні процеси об'єднує ряд особливостей та закономірностей при обробці внутрішніх і зовнішніх поверхонь. Це – траєкторії головного руху; «об'ємний напружений стан»; наявність позаконтактних зон деформування, що відрізняються складною геометричною формою та специфічними особливостями напружено-деформованого стану [21], [22].

Великий внесок в розвиток теорії та технології осесиметричних процесів деформування внесли Л. Е. Альшевський, С. І. Губкин, Г. С. Гун, Г. Д. Дель, М. З. Єрманок, В. Л. Колмогоров, В. А. Огородніков, А. А. Поздєєв, І. Я. Тарновський та інші [4], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33].

При виготовленні осесиметричних виробів часто використовують технологічні процеси, які отримали свій розвиток в працях М. А. Батлер, Г. Д. Деля, А. В. Киричека, І. В. Кудрявцева, В. Н. Подураєва, М. Є. Попова, В. А. Огороднікова, О. А. Розенберга, В. М. Смелянського, А. Г. Сусллова, Ю. Г. Шнейдера та інших [21], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41].

На сьогоднішній день пластичне деформування осесиметричних деталей успішно розвивається в дослідженнях [21], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50]. В роботі [51] здійснено повний аналіз напружено-деформованого стану при осесиметричному видавлюванні металів з різною зміцнюваністю, отримані контактні напруження для матриць різної геометрії. При цьому напружений стан визначено експериментально-розрахунковим способом без використання гіпотези Хаара-Кармана.

В роботі [52] показано вплив геометрії матриць на використаний ресурс пластичності заготовок, що видавлюються через матриці різної геометрії. При цьому використаний ресурс пластичності розраховано за допомогою феноменологічних критеріїв руйнування, що враховують вплив об'ємної схеми напруженого стану на накопичення пошкоджень. У вказаній роботі також наведені інженерні формули, що дозволяють визначати максимальний обтиск для будь-яких матеріалів, знаючи їх механічні характеристики.

Для вирішення цих задач розглянемо стан проблеми деформовності заготовок в процесах обробки металів тиском, тобто, можливість матеріалу заготовки витримувати формозміну без порушення суцільності, а також отримання заготовок з необхідними фізико-механічними властивостями.

Таким чином, аналіз вказаних робіт дозволяє зробити висновок, що процеси осесиметричного деформування заготовок можуть забезпечити технологічну спадковість у вигляді необхідних фізико-механічних характеристик, але для вивчення сплаву W-Ni-Fe, вибраного нами, необхідно знати його вихідні характеристики та розробити технологічні параметри, що забезпечують необхідні фізико-механічні властивості, що висувуються до виробів.

1.2 Технологічний процес редукування

1.2.1 Технологічний процес редукування циліндричних заготовок

Процес редукування (рис 1.1), порівняно з іншими процесами осесиметричного деформування, дає можливість отримати точніші та якісніші вироби на основі заготовок з відносно малою довжиною. Характерною особливістю процесу є те, що він здійснюється з відносно малими натягами.

Процес редукування здійснюється шляхом проштовхування заготовки по схемі стискання через робочий інструмент – матрицю (фільєру). Практичне використання редукування за іншими схемами (таблиця 1.1) не отримало широкого використання в зв'язку зі складністю технологічного оснащення.

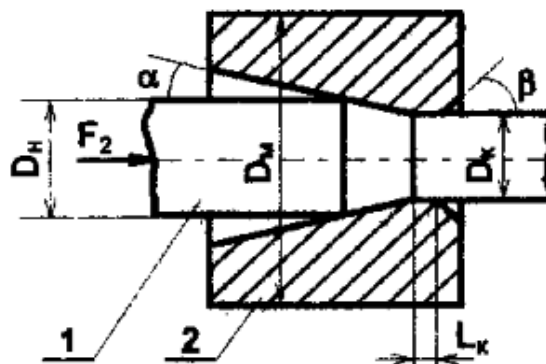


Рисунок 1.1 – Схема охоплювального деформування (редукування),
де 1 – заготовка, 2 – матриця

Залежно від кількості ступенів обробки редукування може бути одноступінчастим чи багатоступінчастим (рис. 1.2).

Осесиметрична постановка задач холодного пластичного деформування з використанням процесу редукування має ряд переваг для конкретних випадків деформування: швидкість виготовлення виробу, велика точність розмірів, шорсткість заготовки близька до фінішної.

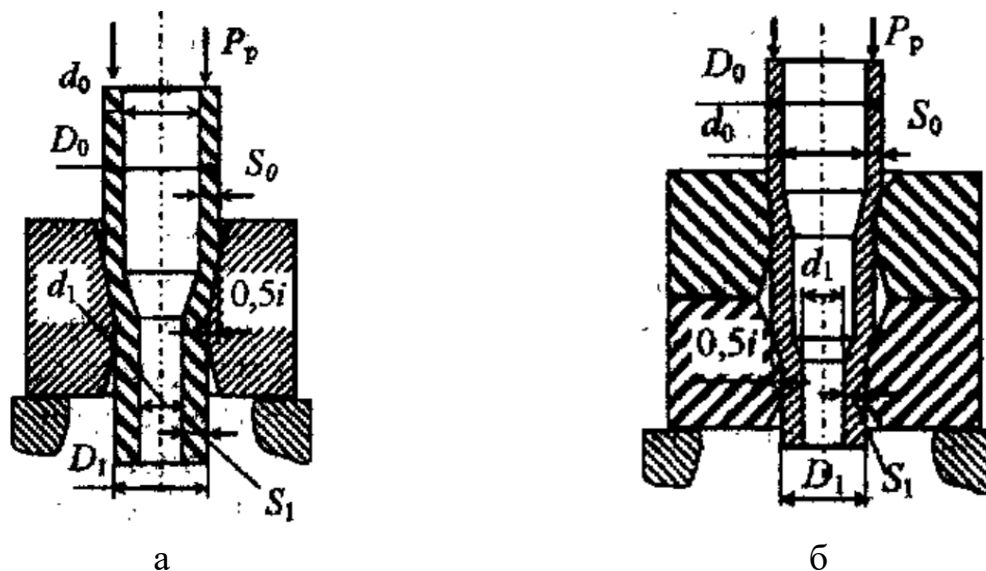
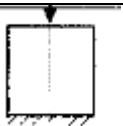
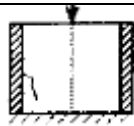
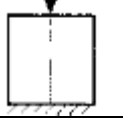
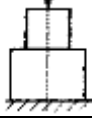
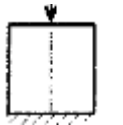
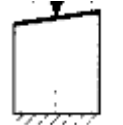
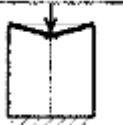
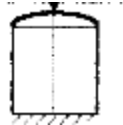
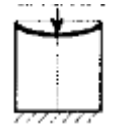
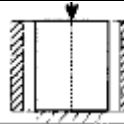
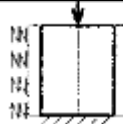
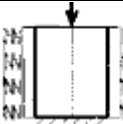
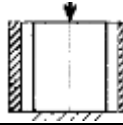
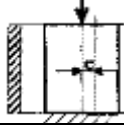
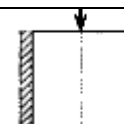
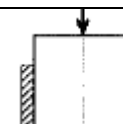
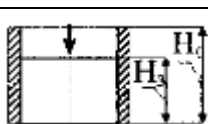
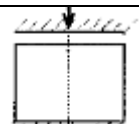
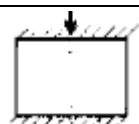
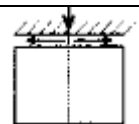


Рисунок 1.2 – Схеми редукування: а – одноступінчастого;
б – багатоступінчастого

Таблиця 1.1 – Класифікація силових схем при передачі зусиль деформування

Вид заготовки	Суцільна		Трубчаста		
					
Форма заготовки	Гладка		Ступінчаста		
					
Форма поверхні контакту	Плоска		Конусна	Криволінійна	
	Паралельна	Нахилена		Випукла	Ввігнута
					
Вид обойми	Жорстка		Пружна	Пружно-пластична	
					
Розташування обойми	Коаксіальне			Ексцентричне	
					
Довжина обойми	$H_0 = H_3$		$H_0 < H_3$	$H_0 > H_3$	
					
Характер тертя в контакті	$f=0$		$f=1$	$0 < f < 1$	
					

Відносно простий процес редукування має і ряд труднощів під час виробництва, а саме: відшарування, викривлення, обриви, тріщини. В матеріалах роботи буде досліджено шляхи уникнення бракувальних ознак виробу.

1.2.2 Напружено-деформований стан в процесі редукування циліндричних заготовок

Розрахунок напружено-деформованого стану процесу редукування здійснюється для зразка циліндричного перерізу. Значно впливають на зміну напружено-деформованого стану: γ – кут нахилу матриці, δ – абсолютне значення обтиску, величина осьового зусилля. Дослідження напружено-деформованого стану здійснюється для забезпечення необхідних фізико-механічних характеристик в процесі деформаційного зміцнення. В процесі редукування інструменту передує наплив матеріалу (рис. 1.3).

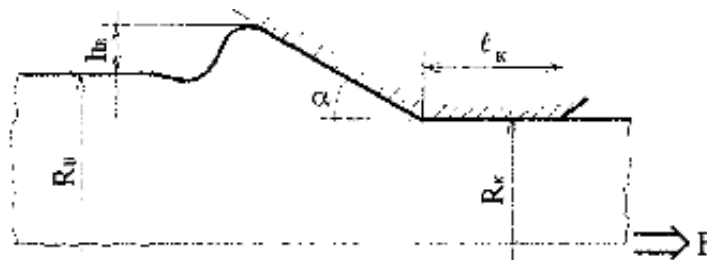


Рисунок 1.3. – Форма позаконтактної деформації при редукуванні [21]

В роботі [21] встановлено, що головні компоненти тензора напружень в місці напливу матеріалу, незалежно від параметрів процесу, є розтягувальними. Технологічні параметри процесу найсуттєвіше впливають на величину напливу. Автори розглядають процеси охоплювального деформування без врахування протяжності зон, в яких процеси знаходяться в несталій стадії. Величина таких зон відіграє значну роль для заготовок з відносно малими розмірами.

Наявність розтягувальних позаконтактних зон встановлено в роботах [22], [23], хоча експериментально це підтверджено не було. Виникнення напливу сплаву зменшує потрапляння мастила на контактувальні поверхні, збільшує площу контакту, збільшує значення коефіцієнта тертя. Величина напливу впливає на втомну міцність [34] шляхом розвитку мікротріщин.

В осередку деформацій спостерігають перехід від стискальних поверхневих напружень до розтягувальних напружень в центрі заготовки [21]. Суттєве значення величини радіальних напружень є однією з причин руйнування заготовки та

інструменту. Зусилля редукування заготовки має величину на 15–20% більшу, ніж при волочінні [53]. Напружено-деформований стан редукованої заготовки характеризується, відповідно, вищими значеннями напружень (рис. 1.4). Відповідно, процеси редукування та волочіння мають спільну механіку. Однак, процес волочіння на даний час досліджено в межах усталеної частини процесу без врахування розмірів неусталеної частини заготовки. Оскільки в процесі редукування використовуються заготовки обмеженої довжини, то є необхідним забезпечити максимальні розміри усталеної зони заготовки при необхідній технологічній спадковості. При цьому слід розробити рекомендації на обмеження вхідних параметрів процесу редукування на основі результатів моделювання з використанням методу скінченних матеріалів (МСЕ), проаналізувати особливості механіки процесу редукування при різних параметрах процесу редукування..

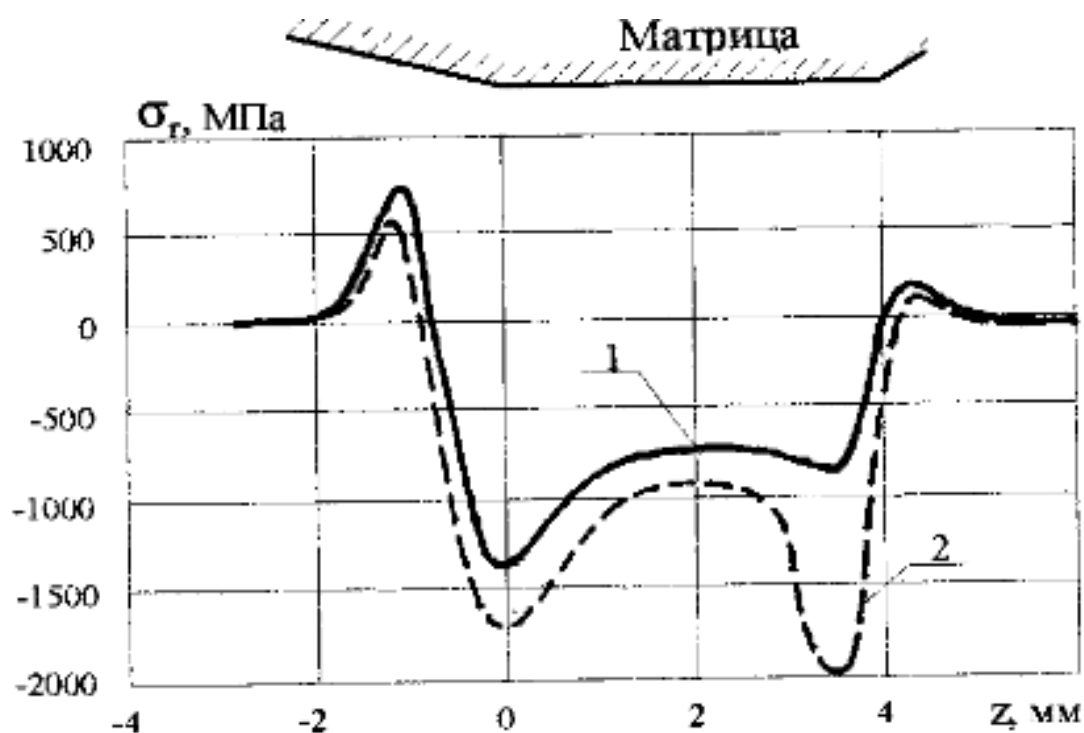


Рисунок 1.4 – Розподіл радіальних напружень при охоплювальному деформуванні (1 – волочіння, 2 – редукування) [21]

Для передачі навантажень деформування заготовці доцільним є використання технологічних обойм (рис. 1.5), оскільки вони дають можливість отримати точніші поверхні контакту, регулювати залишковий напружений стан та напру-

жений стан осередка деформацій заготовки. Плоскопаралельне навантаження є найбільш простим та поширеним видом навантаження при редукуванні. Обробка неоднорідного матеріалу може виконуватись при складніших формах поверхонь навантаження.

При редукуванні без змащення торців автори [21] стверджують, що найбільша інтенсивність тиску припадає на периферійні шари заготовки, коли при використанні мастил на торцях заготовки максимальні зусилля зосереджені в центральних шарах заготовки. В результаті торці циліндра набувають чашевидної форми.

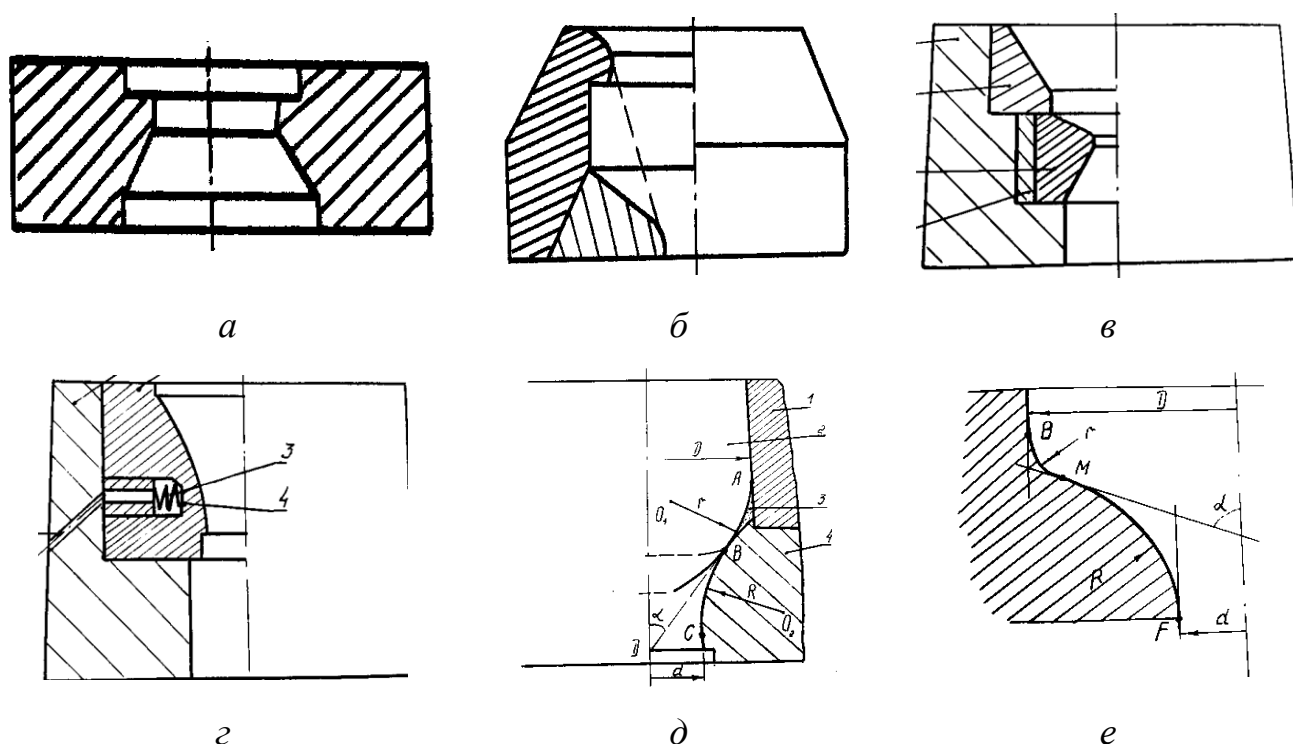


Рисунок 1.5 – Матриці

В роботах [54], [55], [56], [57], [58], [59] кінематика течії металу враховується у вигляді зміни контуру матриці. М. М. Вахутинським [54] запропоновано виконувати контур матриць у вигляді дуг кіл. На його думку така конструкція (рис. 1.5, д) мінімізує нерівномірність деформацій. Ю. П. Глебов пропонує будувати профіль матриці за клотоїдою з мінімальною кривиною на вихідній ділянці та максимальною кривиною на входній ділянці матриці (рис. 1.5, е). Р. І. Непершин в своїх працях стверджує, що профіль ідеальної матриці має дві ділянки –

прямолінійну та ввігнуту [57]. На його думку, в таких матрицях лінія току за наявності дотичних напружень збігається з контуром матриці, але водночас вектори швидкостей частинок, що рухаються, не збігаються з напрямками головних напружень. Дослідження матриць з ввігнуто-випуклим профілем здійснено у роботі [58]. Автор надає перевагу клиновим матрицям, які, на його думку, мають менші зусилля формозміни та забезпечують більш рівномірне розподілення деформацій (механічних властивостей).

Серед перерахованих вище робіт спостерігається протиріччя висновків їх авторів, що може бути наслідком некоректного використання моделей процесу пресування. В роботах [52], [60], [61] автори використовують реальні технологічні вироби з різними властивостями й уже на їхній основі здійснюють аналіз впливу форми інструмента на кінематику та напружено-деформований стан виробу. Такий підхід дав можливість авторам визначити, що кінематика не залежить від властивостей матеріалу, а механічні характеристики виробів, відпресованих через випукло-ввігнуті матриці, вищі, ніж у аналогів, відпресованих через інші матриці [59]. В цій роботі здійснено дослідження впливу вхідних параметрів процесу волочіння на механічні характеристики виробу. Було показано, що поетапне збільшення обтиску сприяє подрібненню структури виробу. Також було встановлено, що кінчна матриця має в осередку деформації значення інтенсивності деформацій в 1,3–1,5 раза більше, ніж сігмоїдальна. Швидкість пресування при одному і тому ж обтиску не має значного впливу. Кінчні матриці забезпечують більше значення використаного ресурсу пластичності, ніж сігмоїдальні. Сігмоїдальна матриця дозволила покращити показники виходу придатної продукції в деяких випадках в 2–3 рази. Подальший пошук оптимальної геометрії інструменту зупинився на кривій другого порядку (брахістохроні), яка забезпечує траєкторію найшвидшого спуску.

Профіль такої матриці (рис. 1.6, а) описується рівнянням [59]

$$\begin{aligned} z &= \frac{R_0}{2\sqrt{\lambda}} (\sqrt{\lambda} + 1) \left(\varphi - \frac{\sqrt{\lambda} - 1}{\sqrt{\lambda} + 1} \sin \varphi \right), \\ r &= \frac{R_0}{2\sqrt{\lambda}} (\sqrt{\lambda} + 1) \left(1 - \frac{\sqrt{\lambda} - 1}{\sqrt{\lambda} + 1} \cos \varphi \right), \end{aligned} \quad (1.1)$$

де $R_0 = \frac{R_r + r_0}{r}$ – радіус формувального конуса; R_x – радіус контейнера; r_0 – радіус пресованого прутка; $\lambda = \frac{R_x^2}{r_0^2}$ – обтиск; r – поточний радіус матриці; φ – кут повороту формувального круга, що використовується від 0^0 до 180^0 .

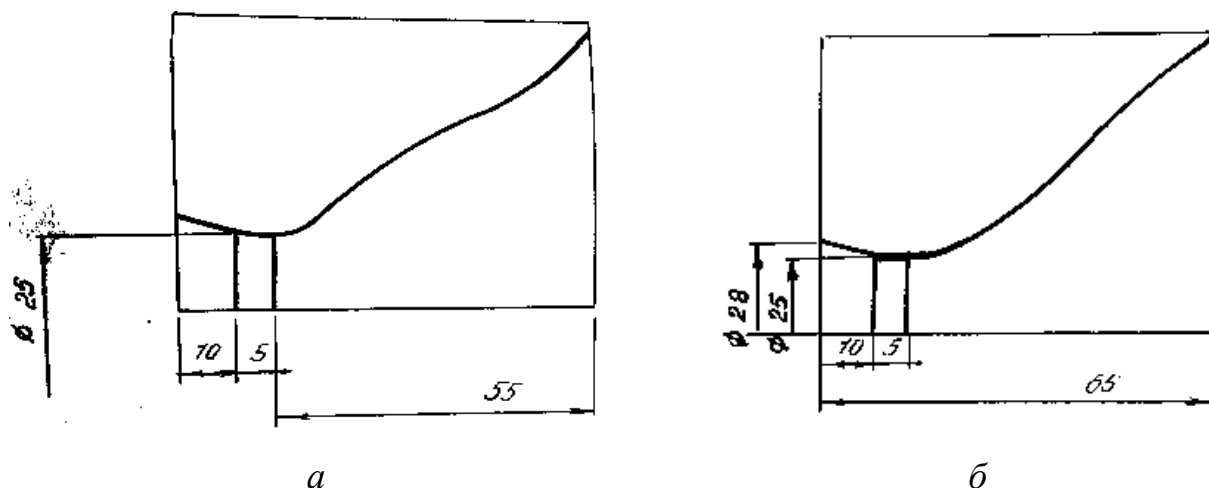


Рисунок 1.6. – Матриці на основі кривих другого порядку

Також має місце використання матриці з профілем, виконаним у вигляді синусоїди (рис. 1.6, б), яка описується рівнянням [59]:

$$r = \frac{R_x}{2\sqrt{\lambda}} \left[(\sqrt{\lambda} + 1)(\sqrt{\lambda} - 1) \cos z \frac{2\sqrt{\lambda}}{R_x(\sqrt{\lambda} - 1)} \right], \quad (1.2)$$

де r безпосередньо пов'язаний з z .

Використання матриць такої геометрії дало можливість забезпечити мінімальну витрату металу.

Варто звернути увагу на те, що використання матриць сігмоїдального профілю дозволяє збільшити ресурс пластичності деформованого металу [40] та запобігти браку чи руйнуванню оброблюваного матеріалу, однак складність їх виготовлення схиляє до використання інструменту простішої форми. Використання матриць з прямолінійним профілем поверхні серйозно спрощує технологію виготов-

лення інструменту, тому їх використання є більш розповсюдженим і, в подальшому, в роботі буде здійснено аналіз впливу кутів нахилу матриці та обтиску на результати деформування.

1.2.3 Зміна фізико-механічних властивостей важких сплавів типу W-Ni-Fe в процесі спікання

Розвиток різних галузей виробничо-господарської діяльності супроводжується підвищенням вимог до характеристик матеріалів, які в подальшому будуть використовуватися в складних умовах роботи. Прикладом таких є спечений сплав системи W-Ni-Fe, що може бути використаний для виготовлення сердечників спеціального призначення. Для забезпечення необхідної технологічної спадковості виробу здійснимо аналіз впливу структури сплаву на характеристики виробу.

Розмір зерна вольфраму (W) в процесі спікання пропорційний тривалості спікання ($R^3 \sim \tau$). На ріст зерен вольфраму впливає температура, величина об'ємної частки твердої фази та коефіцієнт дифузії атомів твердої фази. В результаті збільшення часу спікання знижується міцність сплаву, збільшуються розміри зерен вольфраму, збільшується пористість. Значення величини пористості більше 1% сприяє зменшенню твердості.

Структура вольфрамових сплавів характеризується вмістом вольфраму, що, в свою чергу, через значну пористість сприяє погіршенню характеристик міцності, твердості та пластичності. Для вольфрамових сплавів важливим є зменшення структурної пористості. Відношення вмісту Ni/Fe суттєво впливає на фізико-механічні властивості сплаву W-Ni-Fe. Система знаходиться у фазовій рівновазі тоді, коли відношення Ni/Fe знаходиться в межах від 0,5 до 30. Для цих співвідношень Ni/Fe досліджено механічні властивості сплавів при квазістатичній швидкості деформацій [62]. Дані дослідження відбувалися й після відпалу сплаву у вакуумі (VA) чи вакуумного відпалу з подальшим гартуванням (VA+Q). Для сплавів з такою обробкою значення границі міцності при розтягу та відносного видовження (ϵ) наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Квастатичне випробування W-Ni-Fe сплавів різного складу на розтяг [63]

№ сплаву	Склад, % (за масою)	Співвідношення Ni/Fe	Після VA		Після VA + Q	
			σ_m , МПа	ϵ , %	σ_m , МПа	ϵ , %
1	93W-2,33Ni-4,67Fe	0,5	дуже крихкий		дуже крихкий	
2	93W-3,50Ni-3,50Fe	1,0	897	18,7	916	27,5
3	93W-4,20Ni-2,80Fe	1,5	918	25,3	924	30,9
4	93W-4,67Ni-2,33Fe	2,0	927	23,8	936	31,8
5	93W-4,90Ni-2,10Fe	2,3 (7:3)	936	29,5	940	31,4
6	93W-5,25Ni-1,75Fe	3,0	922	29,3	934	34,0
7	93W-5,60Ni-1,40Fe	4,0 (8:2)	942	27,4	958	33,5
8	93W-5,83Ni-1,17Fe	5,0	943	31,8	955	35,5
9	93W-6,00Ni-1,00Fe	6,0	936	15,8	951	35,5
10	93W-6,22Ni-0,78Fe	8,0	–	–	974	35,5
11	93W-6,36Ni-0,64Fe	10,0	–	–	978	33,1
12	93W-6,56Ni-0,44Fe	15,0	–	–	992	37,3

Міцність при розтягу та відносне видовження в обох випадках обробки значно збільшилися, матеріал став менш крихким. Найбільшою міцністю характеризуються сплави, що були піддані відпалу з подальшим загартовуванням. Результати експериментів у вигляді залежності відносного видовження (ϵ) та границі міцності при розтягу (R_m) від співвідношення Ni/Fe наведені на рисунку 1.7.

Осадження крихкої фази на границях зерен вольфраму стало причиною зниження механічних властивостей для сплавів 1 і 2 (табл. 1.2) Покращення механічних властивостей спостерігалось у сплавах 4–8 після відпалу з загартуванням. Осадження W-Ni фази у сплаві 9 стало одною з причин погіршення його властивостей.

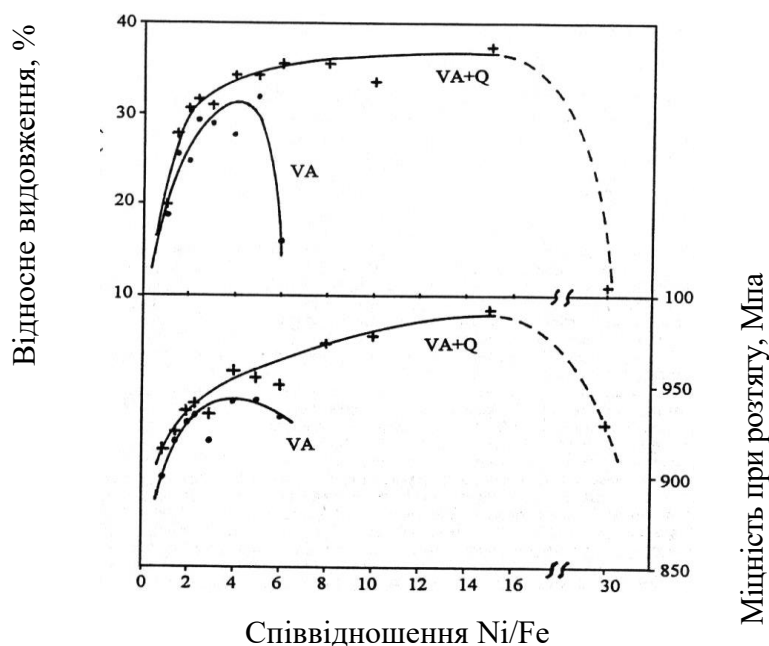


Рисунок. 1.7 – Загальна залежність межі міцності при розтягу і відносного видовження для $0,5 \leq \text{Ni/Fe} \leq 30$

Найвищі значення міцності та відносного видовження спостерігаються у W-сплавів, у структурі яких відсутня інтерметалідна фаза розподілу «W-твердий розчин» (інтерметаліди Ni_xW). При співвідношенні $\text{Ni/Fe} = 2..4$ інтерметалід не утворюється, а при нагріві W-сплавів із співвідношенням $5 < \text{Ni/Fe} < 15$ до $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (загартування після відпалу) інтерметаліди розщеплюються.

В матеріалах роботи [64] сказано, що стан монокристалічності частинок вольфраму (W) значно впливає на фізико-механічні властивості його сплавів. В літературних джерелах дослідження впливу вихідного стану компонентів сплавів практично не проводилося. В подальшому нами буде використаний сплав, виготовлений за технологією спіканням з вмістом, щодо маси, W – 89% та співвідношення частки Ni до частки Fe 7/3.

На основі викладеного вище можна зробити висновок, що на механічні властивості сплаву W-Ni-Fe впливає багато факторів: вихідна сировина, склад сплаву, його структура, умови спікання та термічної обробки спечених заготовок [64]. Та-

ким чином, в подальшому нами буде використовуватися спечений сплав, що має в своєму складі W – 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%.

1.2.4 Методи пластичного деформування, які впливають на властивості сплаву системи W-Ni-Fe після деформації

Методи деформаційного зміцнення, що можуть бути застосовані до W-сплаву, умовно розділяють за температурою обробки на методи холодного пластичного деформування (ХПД) та гарячого деформаційного зміцнення (ГДЗ). В подальшому нами розглядаються процеси ХПД.

Зауважимо, що ефективну обробку матеріалів, зокрема W-сплаву можна здійснити:

а) поворотний обтиск (радіальне кування) – робоча температура $t=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ [65], [66],

б) холодне прокатування (плющення) – $t = 600\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ [67].

Кращі результати методи деформаційного зміцнення дають при їх комбінованому застосуванні. В матеріалах роботи [68] показано, як після гарячої екструзії (рівно-каналне пресування) додатково проводять холодне прокатування (плющення). Після умовно холодної обробки часто застосовують гарячу. В матеріалах [65], [66] після роторного кування проводять високотемпературний відпал (деформаційне старіння). Також практикується виконання деяких видів обробки багаторазово чи позмінно (наприклад, прокатування (плющення).

Гідроекструзія (рис. 1.8) характеризується передачею зусилля за допомогою стиснутої рідини [68].

Рідина під тиском поршня переміщує заготовку через матрицю. На виході з матриці заготовка зміцнюється та зменшується її площа поперечного перерізу. Значення тиску в процесі гідроекструзії може досягати величини 1600 МПа та має такі переваги: низька собівартість, простота створення великих тисків.

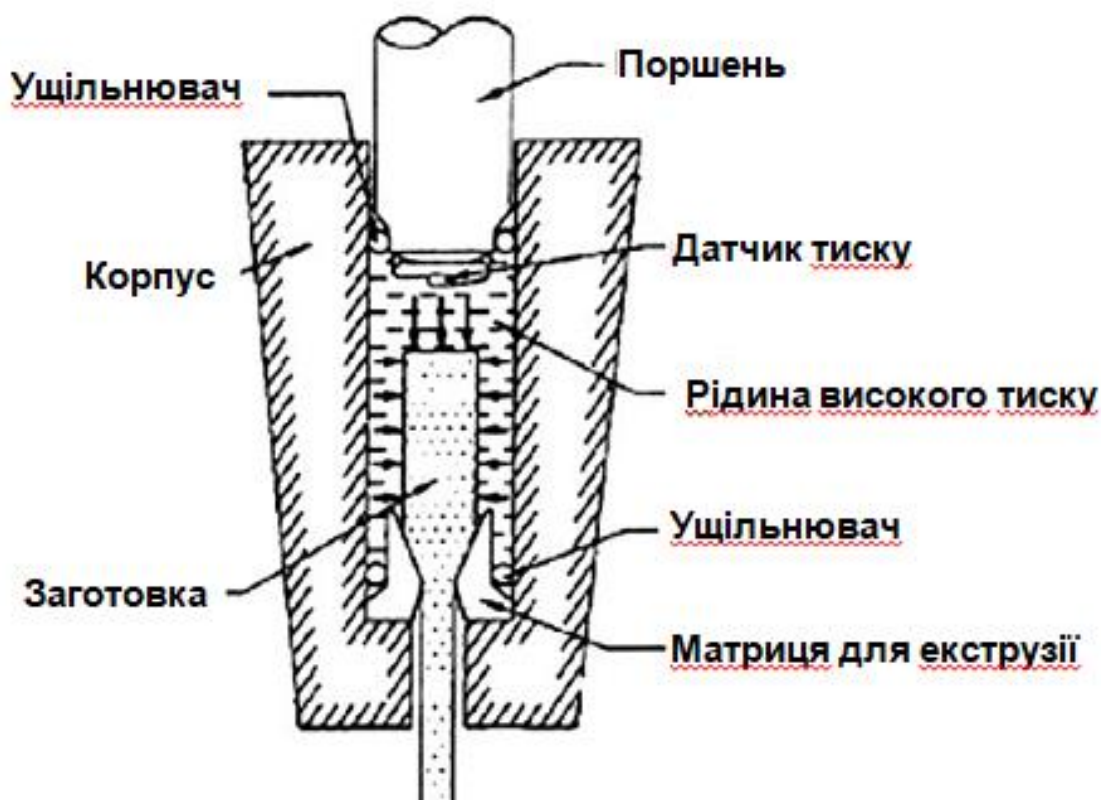


Рисунок 1.8 – Схема гідроекструзії вольфрамового сплаву [68]

Недоліком процесу є складність забезпечення герметичності обладнання [69]. В матеріалах роботи [68] гідроекструзія проводилась при скачкоподібному нарощенні тиску (крок 0,5 МПа) з витримкою 3 хв для порошків з розмірами 2,5–3 мкм. В результаті отримували деформацію 28%, 59% та 85%. Для гідростатичної екструзії з деформацією 75% використовувалась матриця, показана на рис. 1.9, яка може забезпечити отримання виробів з необхідним рівнем механічних властивостей. В такій матриці складно-профільна поверхня забезпечує формування вольфрамового сплаву. В параграфі вказані варіанти формування геометрії матриць, що забезпечують мінімальний ресурс пластичності порівняно з матрицями, що мають прямолінійний профіль поверхні.

Дослідження рівно-канального кутового пресування вольфрамового сплаву виконано в роботах [70], [71]. Принципова схема процесу рівно-канального пресування зображена на рис. 1.10.

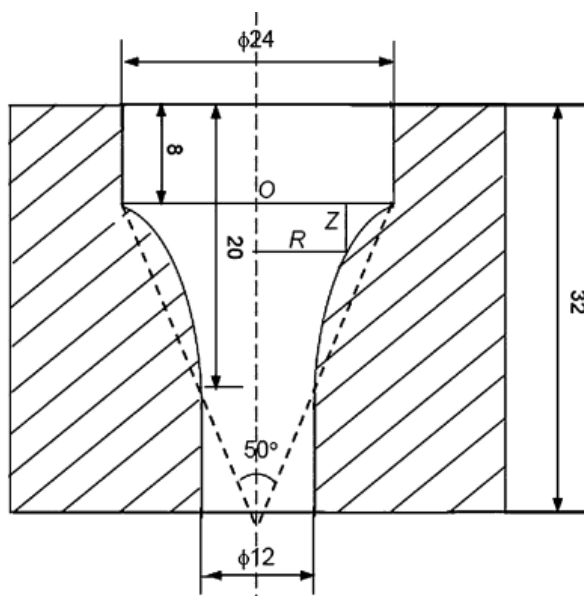


Рисунок 1.9 – Матриця для гідроекструзії вольфрамового сплаву з деформацією 75%.

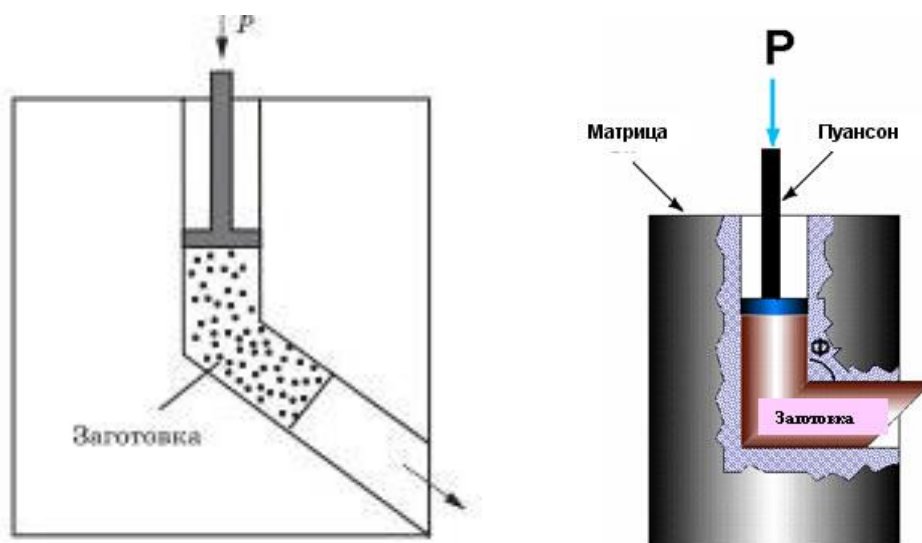


Рисунок 1.10 – Принцип методу рівно-канального пресування

1.3 Деформовність заготовок в процесах обробки металів тиском

1.3.1 Діаграми пластичності

Далі в роботі буде розглянуто розвиток і вдосконалення технології отримання коротких циліндричних заготовок методом осесиметричного редукування. В цьому випадку може виникнути технологічна відмова у вигляді можливого

руйнування сплаву W-Ni-Fe в процесі його формозміни. В зв'язку з цим виникає задача оцінювання можливості сплаву деформуватися без руйнування. Сучасні феноменологічні критерії руйнування містять в собі механічні характеристики вхідного (перед формозміною) матеріалу та, за прийнятою термінологією [24], карту матеріалу. На сьогоднішній день існує величезна кількість довідників, які містять стандартні механічні характеристики тих, чи інших матеріалів. Однак, цієї інформації недостатньо для розрахунку деформаційних критеріїв руйнування, оскільки слід володіти даними про вигляд функціональних характеристик матеріалу (крива зміцнення, діаграма пластичності, тарувальні графіки твердість HV – інтенсивність напружень σ_i – інтенсивність деформацій ϵ_i). Розгляд та аналіз діаграм пластичності визначає зміст даного пункту.

Огляд робіт, в яких відображені результати досліджень деформовності металів при обробці тиском, здійснено в роботах [4], [5] за участі автора. В даних джерелах розглянуто феноменологічні критерії деформовності, в структуру яких входять діаграми пластичності. Їх отримують експериментально шляхом дослідження матеріалу в умовах лінійного або плоского напруженого стану. Для оцінювання деформовності заготовок в процесах об'ємного напруженого стану діаграми пластичності будують в координатах: накопичена інтенсивність деформацій до моменту руйнування

$$e_p = \int_0^{\epsilon^*} \dot{\epsilon}_i d\tau, \quad (1.3)$$

показники напруженого стану, які враховують інваріанти тензора напружень,

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i} = \frac{I_1(T\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}}; \quad (1.4)$$

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \times \sigma_2 \times \sigma_3}}{\sigma_i} = \frac{I_3(T\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}}, \quad (1.5)$$

а також параметр Надаї-Лоде

$$\mu_{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (1.6)$$

де $\dot{\varepsilon}_i$ – інтенсивність швидкостей деформацій, ε^* – гранична деформація до моменту руйнування, τ – час деформування, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження, σ_i – інтенсивність напружень, $I_1(T\sigma)$ – перший інваріант тензора напружень, D_{σ} – девіатор напружень, χ – показник напруженого стану, що враховує третій інваріант тензора напружень, $I_3(T\sigma)$ – третій інваріант тензора напружень.

Діаграми пластичності апроксимуються різними функціями, найбільш вдалі з них характеризуються мінімальною кількістю експериментальних даних, отриманих дослідженням матеріалу в умовах одноосного напруженого стану (розтяг – $\eta = 1$; стиск – $\eta = -1$; кручення – $\eta = 0$).

Досить поширеною є така апроксимація [24]:

$$e_p = e_{p0} \exp(-\lambda_{1,2}\eta), \quad (1.7)$$

де e_{p0} – пластичність металу при зсуві; $\lambda_{1,2}$ – чутливість пластичності металу до зміни схеми напруженого стану (λ_1 при $0 \leq \eta \leq 2$ і λ_2 при $-2 \leq \eta \leq 0$).

Значною величиною збігання з експериментом характеризується також апроксимація Г. Д. Деля [25], що використовується при $-3 \leq \eta \leq 0$

$$e_p = \frac{e_{p-1}e_{p0} \exp(-\eta)}{e_{p-1} + \eta[e_{p-1} - 2,72e_{p0}]}, \quad (1.8)$$

де e_{p-1} – пластичність металу при одноосному стиску.

Вказані експотенціальні функції (1.5) та (1.6) при від’ємних значеннях показника напруженого стану η з достатньою точністю описують пластичність металу [24], [25]. При додатних значеннях показника напруженого стану η спостерігається немонотонність залежності пластичності від показника η [72]. Показник функції діаграми пластичності, який враховував би немонотонність і був би розповсю-

джений на всі процеси холодного пластичного деформування, на даний момент ще не сформований. Роботи Г. Д. Деля вказують на те, що в межах конкретного матеріалу існує параметр, що впливає на його пластичність. Діаграми пластичності набули свого використання у вигляді функції матеріалу у моделях руйнування.

1.3.2 Критерії деформовності

Руйнування матеріалу заготовки в процесі її обробки чи руйнування деталі в процесі її експлуатації настає тоді, коли значення ресурсу пластичності досягає певного критичного значення. Якщо величину ресурсу пластичності нормувати на одиницю, то момент руйнування за різних умов навантаження можна описати деякою функцією, яку називають діаграмою пластичності. Існування такої залежності в координатах $e_p = f(\eta)$ описано в працях Смірнова-Аляєва [73]. Деформаціям руйнування передують спочатку пружні деформації, потім пластичні деформації. Графічне відображення зміни деформацій в пластичній області в координатах $e_p = f(\eta)$ називають шляхом деформування [52]. Умови деформування можуть забезпечити як лінійне відображення шляху деформування, так і у вигляді деякої функції. Обмеження для шляху деформування накладається критеріями деформовності.

На даний момент існує велика кількість критеріїв, які були використані для розв'язання задач в конкретних процесах деформування. Відповідно, сфера застосування таких критеріїв досить незначна (наприклад, критерії Кокрофта, Гофманнера та інших). Використання експериментально побудованих діаграм пластичності для врахування залежності пластичності від схеми напруженого стану було показано в роботі [74]. Оцінювання ресурсу пластичності заготовки в процесах деформування, історією деформування яких можна знехтувати, здійснюються за формулою Г. А. Смірнова-Аляєва [4], [73]

$$\psi = \frac{\bar{e}_i}{e_p(\eta)} \leq 1. \quad (1.9)$$

У випадку простого навантаження врахування впливу історії деформування на основі лінійної теорії накопичення пошкоджень було забезпечено критерієм В. Л. Колмогорова [23], [28]

$$\psi = \int_0^{e_p^*} \frac{\overline{de}_i}{e_p(\eta)} \leq 1. \quad (1.10)$$

Врахування нелінійного накопичення пошкоджень здійснено у роботах [51], [52] шляхом використання критерію

$$\psi = \int_0^{\overline{e}_i^*} \left(1 + a \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_i} \right) \frac{\overline{e}_i^{a \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_i}}}{[\overline{e}_p(\eta)]^{1 + a \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_i}}} \leq 1 \quad (1.11)$$

Більшу точність при нелінійному накопиченні пошкоджень має критерій В. А. Огороднікова [24] у вигляді

$$\psi = \int_0^{\overline{e}_i^*} \left(1 + a \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right) \right) \frac{[\overline{e}_i(\eta, \chi)]^{a \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right)}}{[\overline{e}_p(\eta, \chi)]^{1 + a \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right)}} \leq 1, \quad (1.12)$$

який також враховує схему напруженого стану, похідну від функції шляху деформування та вплив третього інваріанта на пластичність у вигляді показника напруженого стану χ .

Розглянуті деформаційні критерії можуть бути використані для розрахунку використаного ресурсу пластичності в довільній ділянці заготовки, однак обґрунтування їхнього раціонального використання для процесу редукування до цього часу не проводилось. Також відсутня інформація про вплив вхідних параметрів процесу редукування на величину використаного ресурсу пластичності та технологічну спадковість.

1.3.3 Оцінювання деформовності заготовок з використанням критеріїв деформовності

Під оцінюванням деформовності будемо розуміти оцінювання здатності заготовки піддаватися пластичному деформуванню без руйнування. Аналітично-експериментальне оцінювання деформовності здійснюється за рахунок використання деформаційних критеріїв, які містять карту матеріалу. Розрахунок значень критеріїв можливий тоді, коли наявна інформація про напружено-деформований стан на різних стадіях деформування, а також в найбільш небезпечній області деформованого тіла відома залежність величини деформацій від показників напруженого стану η , χ і ступеня деформації $\bar{\epsilon}_i$. Інформація про напружено-деформований стан має містити значення компонентів тензора напружень.

Відповідно до гіпотези Хаара-Кармана, що радіальне напруження прирівнюється до одного з двох головних напружень в меридіальній площині при осесиметричному деформуванні, можна розраховувати на основі осьових напружень величину зусилля деформування з достатньою точністю [51], але використання даної гіпотези для розрахунку напруженого стану приводить до суттєвих похибок.

Забезпечення деформування без руйнування можливе з використанням умови [75]

$$e_{i_{\max}} \leq e_{zp}(\eta). \quad (1.13)$$

На жаль, дана умова не враховує вплив історії деформування на накопичення пошкоджень. Для того, щоб забезпечити виконання процесу редукування без руйнування заготовки, потрібно враховувати вплив історії деформування на накопичення пошкоджень.

Оцінка деформовності для процесу редукування дасть можливість забезпечити в процесі деформування необхідні фізико-механічні характеристики заготовки. Дана задача може бути вирішена методами феноменологічної теорії деформовності на основі тензорних моделей (1.10)–(1.11). Суть тензорних моделей руйнування полягає в тому, що за міру пошкоджень слугує тензор другого рангу, тобто,

в загальному випадку критерій руйнування має враховувати направлений характер пошкоджень. В роботах А. А. Ільюшина, Г. Д. Деля, В. М. Михалевича та інших [76], [77], [78] даний підхід мав розвиток для великих пластичних деформацій. В результаті критерій деформовності набув вигляду [78]

$$\Psi_{ij} = \int_0^{e_i} \left(1 - a + 2a \frac{e_i}{e_p(\eta)} \right) \beta_{ij} \frac{de_i}{e_p(\eta)}, \quad (1.14)$$

де $\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_i}$ – напрямний тензор швидкостей деформацій, $a = const$.

Умова руйнування матиме вигляд

$$\Psi_{ij} \cdot \Psi_{ij} = 1. \quad (1.15)$$

Стала a підбирається таким чином, щоб забезпечити умову (1.11).

В загальному випадку тензор накопичення пошкоджень подають у вигляді лінійного функціонала

$$\Psi_{ij} = \int_0^t \Pi(t, \tau) \cdot \dot{\varepsilon}_{ij}(\tau) d\tau, \quad (1.16)$$

де $0 \leq \tau \leq t$ – час; $\Pi(t, \tau)$ – функція пам'яті; $\dot{\varepsilon}_{ij}(\tau)$ – тензор швидкостей деформацій.

Тензорні моделі враховують ступінь пошкоджень матеріалу у вигляді залишкової пластичності та її анизотропії, а також розрахунок деформовності заготовок. Тобто, використання тензорних моделей дозволяє прогнозувати технологічну спадковість.

Висновки до розділу

Аналіз сучасного стану розвитку процесів холодної обробки циліндричних заготовок, зокрема редукуванням показав таке:

1. Відсутність інформації щодо функціональних характеристик складових карт матеріалу сплавів системи W-Ni-Fe (зокрема, 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. В літературі відсутні систематизовані дослідження механіки процесу редукування коротких циліндричних заготовок (з відносною довжиною 2..5). Одним з найкращих сучасних методів, із врахуванням особливостей цього процесу єМСЕ. зокрема з використанням методу скінченних елементів (МСЕ);
3. Питання холодного пластичного редукування, оцінки деформовності в процесі редукування за допомогою сучасних критеріїв на сьогодні не вивчалось. З`ясовано, що для коректної оцінки деформовності та технологічної спадковості в процесі редукування необхідно провести аналіз щодо коректного застосування критеріїв деформовності для такого процесу.
4. Відсутні рекомендації, які б давали можливість здійснити оцінку показників технологічної спадковості для подальшого прогнозування технологічного процесу редукування, зокрема на основі сплаву системи W-Ni-Fe.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ, ОБЛАДНАННЯ, КАРТА СПЛАВУ W-Ni-Fe

2.1 Передумови формування карти матеріалу для процесу редукування

В теорії обробки металів тиском, де розглядаються кінцеві деформації та стандартні механічні характеристики матеріалу (границя міцності, границя текучості, відносне залишкове звуження та зміцнення), вони не можуть повною мірою описати механіку процесів обробки металів тиском. З метою оцінювання напружено-деформованого стану холоднодеформованих заготовок крім стандартних механічних характеристик необхідно формувати «карту матеріалу» – криву течії $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ (пункт 2.3.1), діаграму пластичності в координатах $e_p = f(\eta)$ (пункт 2.3.2), градуальні графіки твердість-напруження-деформації, інтенсивність деформацій (пункт 2.3.3). Технологічний паспорт матеріалу, або карта матеріалу складається з сукупності зазначених функцій [24].

Отримання зазначених функцій пов'язано з експериментальними даними, які отримані з дослідів на одноосний розтяг, одноосний стиск в умовах лінійного напруженого стану та кручення. Методика цих досліджень буде розглянута в даному розділі.

З метою оцінювання можливості деформування заготовок зі сплаву W-Ni-Fe та отримання необхідних фізико-механічних властивостей заготовок в подальшому будуть використані феноменологічні критерії деформовності, які дають можливість оцінити деформовність без руйнування заготовок. Для вирішення проблеми призначення (підбору) технологічних параметрів процесу, які забезпечують якість виробів, в подальшому буде сформована математична модель фізичних процесів зміни якісних показників. Такою моделлю є модель руйнування металу при його обробці. В роботах [23], [24], [25] показана доцільність використання феноменологічних критеріїв руйнування, які дозволяють на стадіях проектування процесів обробки металів тиском прогнозувати використаний ресурс пластичності заготовок. Використаний ресурс пластичності пов'язаний з такими якісними по-

казниками матеріалу заготовок, як напруження текучості, накопичена інтенсивність деформацій, залишкові напруження, границя міцності, ресурс пластичності. Особливе значення серед переліченого має використаний ресурс пластичності деформованих заготовок, безрозмірна величина якого має бути менша одиниці ($\psi < 1$).

В розглянутих вище (див. п. 1.3.2) феноменологічних критеріях руйнування за міру пластичності прийнята накопичена інтенсивність деформацій до моменту руйнування (поява магістральної тріщини). Ця величина і є мірою пластичності. Вона залежить від властивостей матеріалу, напруженого стану та його зміни, температурно-швидкісних умов деформування. Для оцінювання деформовності та прогнозування руйнування заготовок в процесах обробки металів тиском таким чином будуть задіяні феноменологічні критерії руйнування, використання яких ґрунтується на отриманні дослідним шляхом діаграм пластичності та інформації про напружено-деформований стан в процесах обробки металів тиском [23], [24], [25].

Так і виникає необхідність формування карти матеріалу, яка містить механічні характеристики (діаграму пластичності, криву текучості, залежність $HV - \sigma_t - \varepsilon_i$). Вказані параметри карти матеріалу і будуть розглянуті в наступних підрозділах.

2.2 Обладнання

Дослідження на стиск [79] були виконані за допомогою гідравлічного преса ПММ-125 (рис. 2.1), який забезпечує максимальне навантаження 1,23 МН при швидкості переміщення штока 2 мм/сек. Зразки поміщали в обойму, яка унеможлилювала перекид зразків.

Дослідження на розтяг [80] виконувались з допомогою розривної машини Р-20 (рис. 2.2). В процесі розтягу здійснювався запис діаграми розтягу в координатах: зусилля (Н) – абсолютне переміщення (мм). Точність навантаження 50 Н.



Рисунок 2.1 – Прес ПММ-125

Експериментальні дослідження на кручення [81] проводились з використанням крутильної машини МК-50 (рис. 2.3).

Дослідження твердості виконано з допомогою твердоміра Вікерса (рис. 2.4).



Рисунок 2.2 – Розривна машина Р-20



Рисунок 2.3 – Крутильна машина МК-50



Рисунок 2.4 – твердомір Вікерса ТП-7Р-1

2.3 Карта матеріалу W-Ni-Fe

2.3.1 Крива течії матеріалу

В теорії обробки металів тиском при ізотропному зміцненні застосовують одну з найважливіших механічних характеристик матеріалу – криву течії, апроксимовану Свіфтом у вигляді

$$\sigma_i = A_c (e + \varepsilon_i)^{n_c}, \quad (2.1)$$

або за П. Людвігом [82]

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^n, \quad (2.2)$$

де σ_i – інтенсивність напружень, ε_i – інтенсивність деформацій, A та n – коефіцієнти апроксимації.

Наведена крива течії не залежить від виду напруженого стану та визначається виключно властивостями матеріалу.

Варто відмітити, що для ізотропних матеріалів коефіцієнти A та n в формулі (2.2) мають фізичний зміст: A – інтенсивність напружень при інтенсивності деформацій, що дорівнюють одиниці, $A = \sigma_i$ (при $\varepsilon_i = 1$), n – показник степеня, що дорівнює інтенсивності деформацій, яка відповідає максимальному навантаженню на умовній діаграмі розтягу $P = f(\Delta l)$ (рис. 2.5).

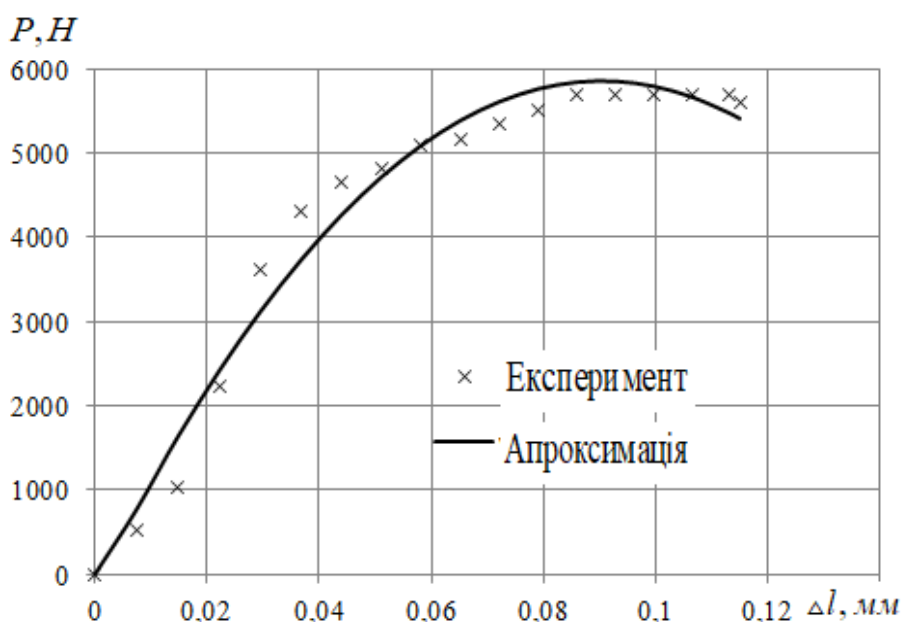


Рисунок 2.5 – Умовна діаграма розтягу сплаву W-Ni-Fe

Механічні випробування зразків сплаву в умовах розтягу здійснювалися так: із спечених заготовок виготовляли стандартні циліндричні зразки на розтяг (діаметр $d_0 = 8$ мм, робоча довжина $l_0 = 40$ мм) та на стиск (діаметр $D_0 = 10$ мм, висота $H_0 = 15$ мм). Зразки осаджували до різних ступенів деформації аж до руйнування в обіймі без перекосів на гідравлічному пресі ПММ-125.

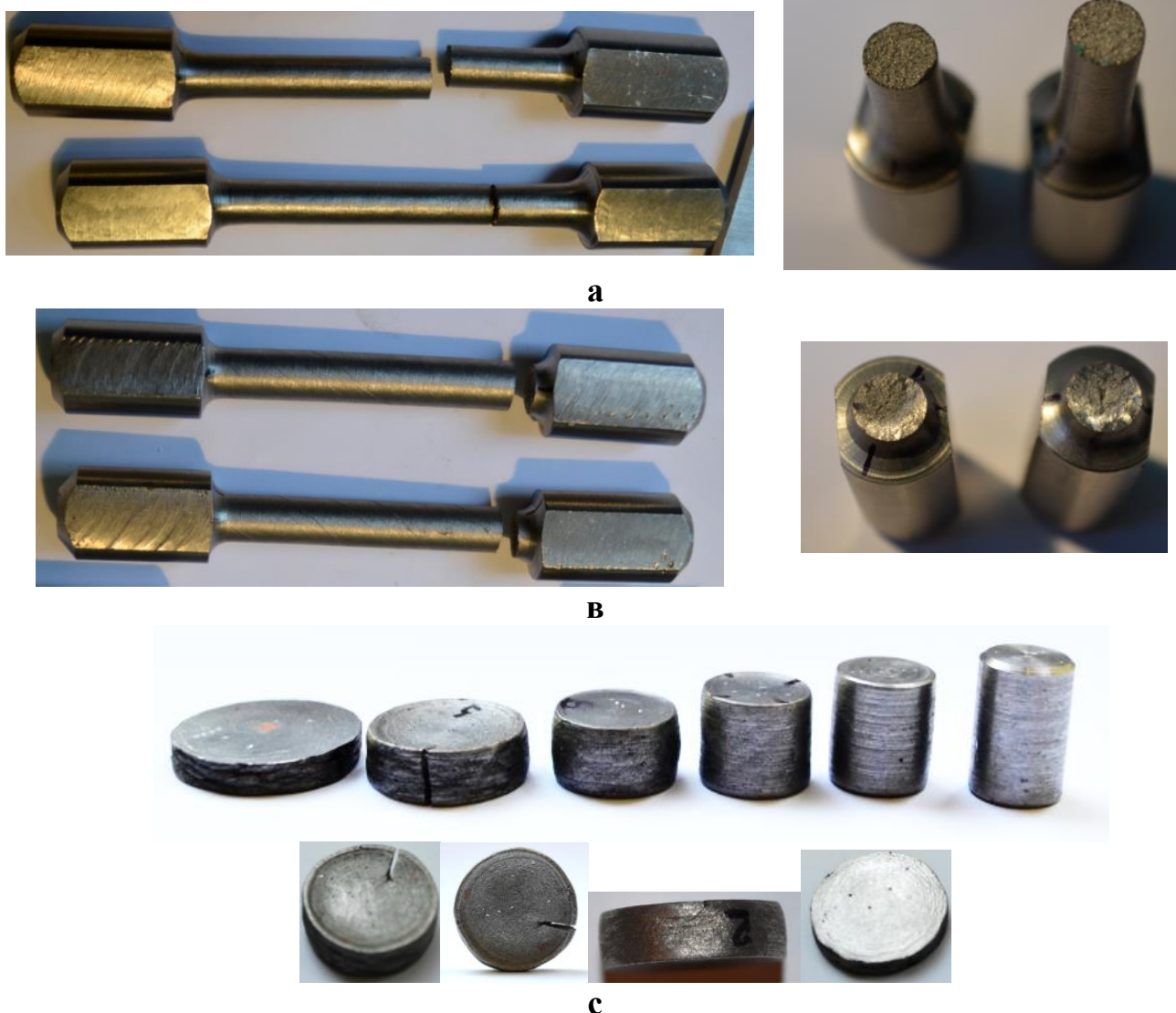


Рисунок 2.6 – Зразки із в сплаву типу W-Ni-Fe після випробувань
(а – розтяг, в – кручення, с – стиск)

В результаті випробувань на розтяг (рис. 2.6, а) зразки сплаву W-Ni-Fe руйнувались з утворенням шийки в місці розриву. Стискали зразки, використовуючи як мастило мідну фольгу зі змащенням торців літолом 24. Після кожного ступеня навантаження мідні прокладки змінювали. Тертя на торцях зразка було несут-

тєвим, що підтверджено відсутністю бочкоутворень на бічній поверхні (рис. 2.6, с). Зразки руйнувалися, в основному, шляхом відриву – магістральна тріщина утворювалась вздовж зразка (рис. 2.6, с), однак на деяких зразках спостерігали тріщину на поверхні під кутом 45° , що свідчить про руйнування за схемою зрізу. Це пояснюється деякою відмінністю схем напруженого стану через різні крайові умови на торцях досліджуваних зразків. Оскільки візуально форма зразків з різними типами руйнування відрізнялась несуттєво, то руйнування за стиском можна оцінити як крихко-пластичне.

Розрахунки деформування сплавів супроводжуються використанням кривих $\sigma_i = f(e_i)$, що описують зміну істинних напружень (інтенсивності напружень σ_i) від деформацій (логарифмічних деформацій e_i). Крива текучості для процесів холодного пластичного деформування далеко за межами границі текучості може бути апроксимована степеневою функцією (2.2).

Інтенсивність деформацій для осаджених зразків визначали за формулами:

а) малі деформації ($e_i \leq 0,3$)

$$e_i = \ln \frac{H_0}{H}, \quad (2.3)$$

де H_0 – висота вихідного зразка; H – висота зразка після деформування;

б) великі деформації ($e_i \geq 0,3$) – по діаметру

$$e_i = 2 \ln \frac{D}{D_0}, \quad (2.4)$$

де D_0 – діаметр вихідного зразка; D – діаметр зразка після деформування.

Значення граничної деформації при стиску досягло одиниці – циліндрична форма зразка при цьому суттєво спотворилась.

На основі отриманих результатів досліджень побудована крива текучості (рис. 2.7), яка апроксимована залежностями (2.1) та (2.2).

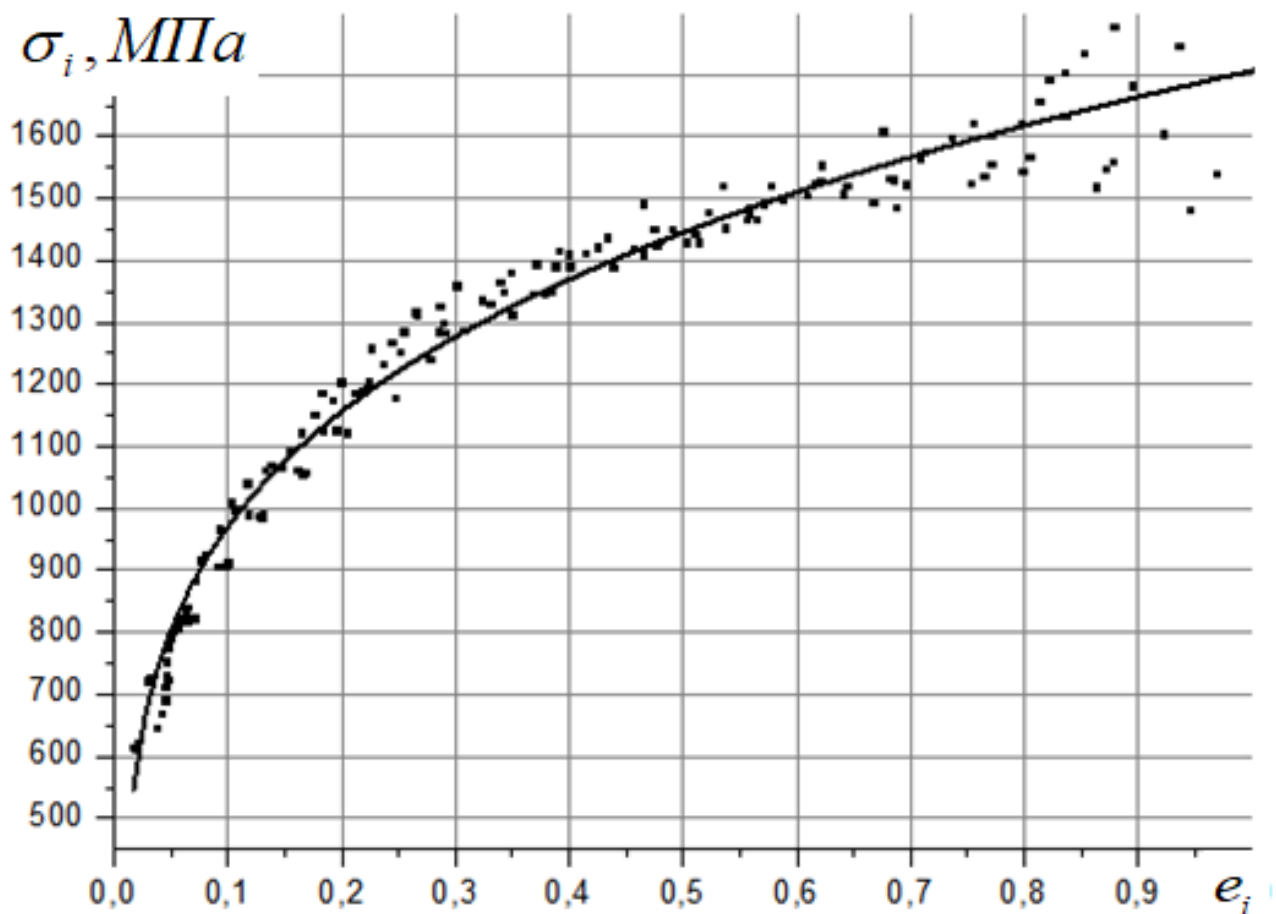


Рисунок 2.7 – Крива текучості сплаву W-Ni-Fe

В результаті статистичної обробки результатів на ЕОМ отримані коефіцієнти апроксимації для сплаву W-Ni-Fe: $A = 1731,6 \pm 9$ МПа; $A_c = 1709,6 \pm 9$ МПа; $n = 0,259 \pm 0,004$; $n_c = 0,236 \pm 0,006$; $e_0 = -0,009 \pm 0,002$. Сплав інтенсивно зміцнюється при пластичному деформуванні. Напруження текучості збільшується від початкового до максимального значення в 2,63 рази. Ступінь зміцнення $\frac{A}{\sigma_{0,2}} = 2,63$, показник $n = 0,259$ вказує на достатньо високу пластичність

Експерименти дали можливість для даного сплаву W-Ni-Fe отримати модуль Юнга ($E = 1,4 \cdot 10^{10}$ Па), границю міцності ($\sigma_s = 920$ МПа) та границю текучості ($\sigma_m = 650$ МПа).

Залежність твердості зміцненого сплаву від інтенсивності напружень має вигляд, близький до лінійного. Статистичний розкид даних для досліджуваного ма-

теріалу досить суттєвий, що пов'язано з його структурними особливостями та умовами експерименту.

Таким чином в даному пункті викладена методика і побудована крива текучості. Для наступного формування карти матеріалу потрібно мати діаграму пластичності. Метод її побудови розглянутий в наступному пункті.

2.3.2 Діаграма пластичності сплаву W-Ni-Fe

Тлумачення терміна «пластичність» в сучасному трактуванні виглядає так – це здатність матеріалу до формозміни без руйнування у вигляді макроскопічного порушення суцільності. Міра пластичності – накопичена інтенсивність деформацій до появи макротріщин $\varepsilon_i = \varepsilon_r$ (руйнування). Діаграма пластичності – це залежність пластичності від показника η , який характеризує жорсткість схеми напруженого стану. Побудова діаграми пластичності здійснюється на основі виконаних типових експериментів при простому деформуванні (розтяг, стиск, кручення). Отримані результати, апроксимують [24], [25].

Методика досліджень на розтяг та стиск була наведена вище. Крім того, зразки досліджувались в умовах кручення для отримання пластичності при показнику $\eta=0$. З цією метою за методикою [25] на робочу поверхню зразка наносили штангенциркулем риску, паралельну його поздовжній осі. Під час кручення інтенсивність напружень має вигляд

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2\pi r_0^3} \left(3M + \gamma \frac{dM}{d\gamma} \right), \quad (2.5)$$

де r_0 – радіус суцільного циліндричного зразка, який скручували; γ – кут зсуву на поверхні; $\gamma = \arctg \frac{\varphi r}{l} = 7,3$ (φ – абсолютний кут скручування в градусах; l – довжина зразка), M – крутний момент, прикладений до зразка.

Інтенсивність деформацій під час кручення (на поверхні)

$$e_i = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{3}}, \quad (2.6)$$

де α – кут зсуву на поверхні, який вимірюють на інструментальному мікроскопі між поздовжньою віссю зразка і рискою, проведеною вздовж його осі до експерименту.

Таким чином, за формулою (2.6) розраховують накопичені деформації при руйнуванні за показником $\eta = 0$, $\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}$, при крученні – $\sigma_1 = \tau$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = -\tau$. За формулою (1.5), $e_p(\eta = 1)$, розрахована пластичність при стиску.

В роботах Г. Д. Деля [24] та В. А. Огороднікова [25] на основі результатів дослідів зразків на розтяг, стиск, кручення та випробування зразків у камері високого тиску була розроблена методика побудови діаграм пластичності. В роботі [24] показано, що для діаграми пластичності (рис. 2.8) в діапазоні $-2 \leq \eta \leq 0$ справедливе рівняння:

$$e_p = \frac{e_p(\eta = 0)e_p(\eta = -1)\exp(-\eta)}{e_p(\eta = -1) + \eta[e_p(\eta = -1) - 2,72e_p(\eta = 0)]} = \frac{0,63 \cdot \exp(-\eta)}{0,92 - 0,93 \cdot \eta}, \quad (2.7)$$

де $e_p(\eta = -1)$ і $e_p(\eta = 0)$ – пластичність матеріалу, відповідно, при осьовому стиску зі змащенням і крученні.

Апроксимація діаграми пластичності для діапазону $-1 \leq \eta \leq 2$ може бути здійснена за допомогою рівнянь [25]

$$e_p(\eta) = 0,69 \cdot \exp(-0,3 \cdot \eta); \quad (2.8)$$

$$e_p(\eta) = 0,69 \cdot \exp(-1,75 \cdot \eta), \quad (2.9)$$

де η – показник напруженого стану, $e_p(\eta)$ – величина граничних деформацій.

На ділянці зміни показника напруженого стану $0 \leq \eta \leq 2$ граничні деформації розраховуються за формулою (2.9). На ділянці $-1 \leq \eta \leq 0$ граничні деформації розраховуються за формулою (2.8), для сплаву W-Ni-Fe величина граничних дефор-

мацій при типових дослідях складала $e_p(\eta=0) = 0,69 \pm 0,01$, $e_p(\eta=-1) = 0,92 \pm 0,09$, $e_p(\eta=1) = 0,12 \pm 0,005$.

На рисунку 2.8 наведена діаграма пластичності сплаву системи W-Ni-Fe.

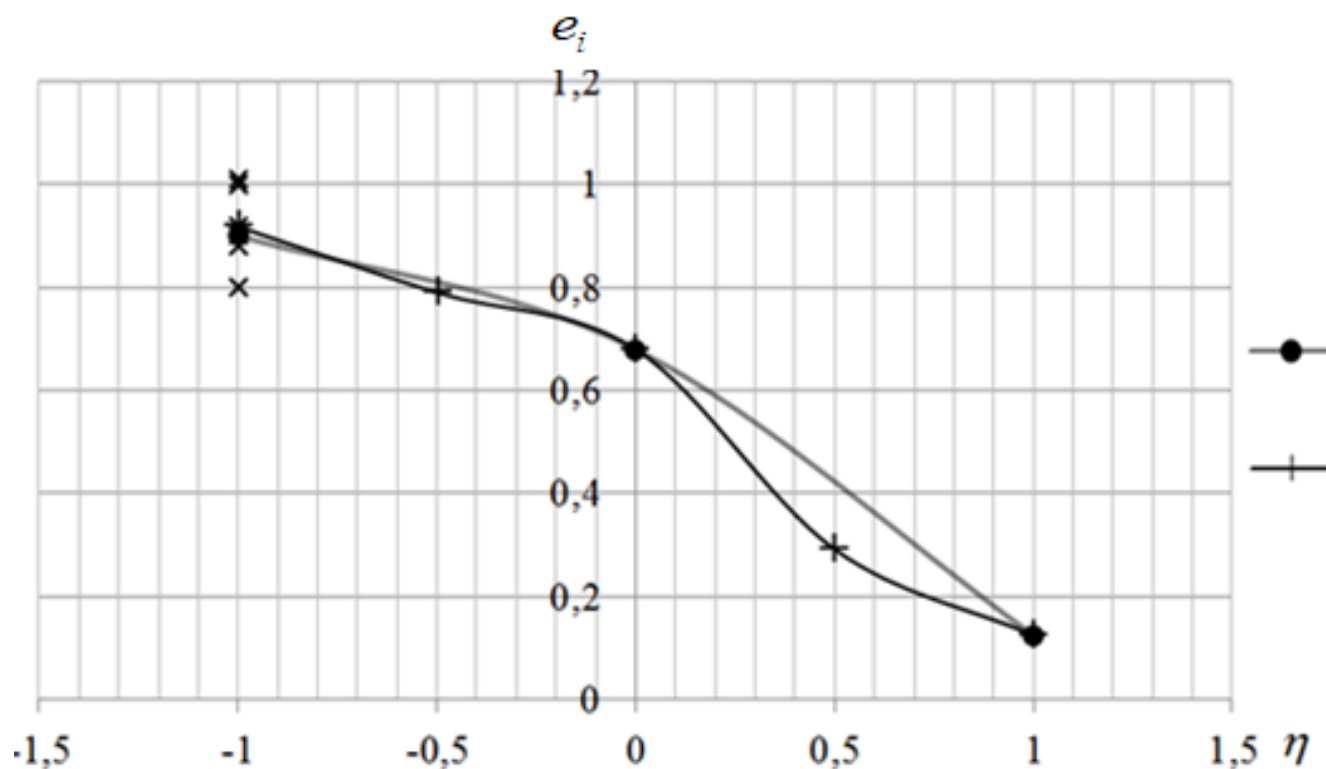


Рисунок 2.8 – Діаграма пластичності сплаву W-Ni-Fe

Сплав на основі вольфраму має відносно велику пластичність на ділянці напружень стиску, що дає можливість проводити його деформаційну обробку в холодному стані до відповідних значень накопичених деформацій. Коефіцієнти чутливості пластичності (ввійшли в рівняння 2.8-2.9) λ_1 та λ_2 до схеми напруженого стану в жорсткій ($\eta \geq 0$) і м'якій ($\eta < 0$) областях показника η значно відрізняються. Водночас область розтягувальних напружень характеризується значною чутливістю пластичності до схеми напруженого стану при малих пластичних деформаціях в умовах розтягу. Тому розтягувальні напруження варто враховувати при виборі схем пластичного деформування. Збільшення величини гідростатичного тиску несуттєво підвищує пластичність, оскільки у м'якій області ($\eta < 0$) чутливість пластичності до схеми напруженого стану є низькою (коефіцієнт λ_1) [52]

$$\lambda_1 = \ln \frac{e_p(\eta=0)}{e_p(\eta=1)}; \quad (2.10)$$

$$\lambda_2 = \ln \frac{e_p(\eta=-1)}{e_p(\eta=0)} = 0,3, \quad (2.11)$$

де λ_1 та λ_2 – коефіцієнти чутливості пластичності до зміни схеми напруженого стану.

2.3.3 Градувальний графік твердість – інтенсивність напружень – інтенсивність деформацій

На циліндричних зразках, які випробували на стиск (див. пункт 2.1.2), вимірювали твердість за Вікерсом при зусиллі на індентор 294 Н (в середньому 10 точок в різних місцях). Середня твердість кожного зразка відносно стабільна (відхилення складає до 3%).

Інтенсивність напружень в умовах лінійного напруженого стану

$$\sigma_i = \frac{4F}{\pi d^2}, \quad (2.12)$$

де F – зусилля деформування, d – діаметр деформованого зразка.

З метою отримання точок на кривій HV- σ_i - e_i , відповідних заданим напрямкам(σ_i), зразки деформували до сили F . Відповідно до залежності [72]

$$F = \sigma_i \frac{\pi}{4} d_0^2 \exp\left(\sqrt{\frac{\sigma_i}{A}}\right), \quad (2.13)$$

де A та n – орієнтувальні коефіцієнти апроксимації, які отримали при дослідженні зразка до максимального степеня деформації при апроксимації кривої текучості за формулою (2.2).

На рис. 2.9 наведено отриманий таким чином градувальний графік вольфрамowego сплаву типу W-Ni-Fe: твердість HV – інтенсивність напружень σ_i – інтенсивність деформацій e_i .

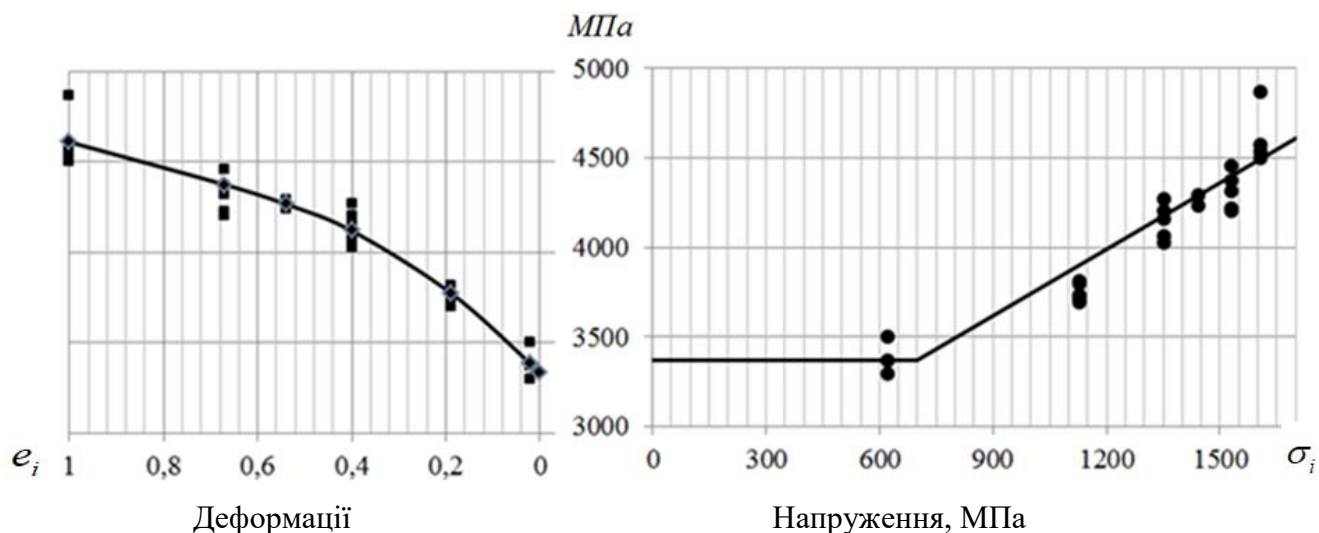


Рисунок 2.9 – Градувальний графік вольфрамового сплаву типу W-Ni-Fe (твердість (HV) – напруження – деформації)

В роботі [25] показано, що залежність $HV - \sigma_i - e_i$ побудована в умовах лінійного напруженого стану справедлива також в умовах плоского і об'ємного напруженого станів. Відповідно, вимірюючи твердість деформованого в умовах плоского чи об'ємного напружених станів, можна за твердістю визначати з допомогою вказаного графіка відповідну їй інтенсивність напружень і деформацій.

В роботі [83] показано, що залежність $HV - \sigma_i - e_i$ справедлива і в умовах немонотонного навантаження. В такому випадку за твердістю можна визначати інтенсивність напружень, а вже з точністю гіпотези про єдину криву $\sigma_i = f(e_i)$ – інтенсивність деформацій. При цьому точність визначення інтенсивності деформацій e_i за твердістю залежить від деформацій Баушингера. Критерієм можливості визначення σ_i та e_i за твердістю є її зростання [84].

Таким чином, з допомогою градувального графіка $HV - \sigma_i - e_i$ можна за твердістю визначати σ_i та e_i в стаціонарних та нестаціонарних процесах пластичного деформування [72, 85], а також за твердістю можна відновити карту матеріалу у вигляді кривої текучості. В роботі [72] дано обґрунтування методу визначення коефіцієнтів апроксимації кривої текучості A та n зміною твердості за Лібом.

Підвищення твердості при збільшенні деформацій значне, що пов'язано з великою змінюваністю та відносно великою пластичністю при стиску. Результати досліджень подані у вигляді градуовального графіка (рис. 2.9).

В подальшому дана інформація може бути використана для оцінки технологічної спадковості редукованої заготовки за допомогою методу твердості.

2.4 Фізико-механічні характеристики отриманих заготовок сплаву W-Ni-Fe

З метою визначення придатності вольфрамових важких сплавів до застосування методу холодного пластичного деформування здійснено комплекс досліджень з визначення фізико-механічних властивостей сплавів на різних етапах їх виготовлення: після спікання, відпалу, деформаційного зміцнення, шляхом інденування зразків у місці розриву зразка на «розтяг». Результати визначення основних характеристик сплаву після вакуумного відпалу наведено у табл. 2.1.

З таблиці видно, що збільшення вмісту вольфраму на 1% у складі сплаву веде до збільшення границі міцності на 3,26%, збільшення відносного видовження на 17,6% та зменшення відносного залишкового звуження на 34%.

Таблиця 2.1 – Результати визначення фізико-механічних властивостей спечених сплавів системи W-Ni-Fe

Вміст вольфраму, %	Густина, г/см ³	Границя міцності при розтягу σ_0 , Мпа	Відносне подовження ϵ , %	Відносне звуження ψ , %
90	16,95	950,0	22,0	17,2
89	17,20	920,0	26,7	26,1

Висновки до розділу

1. Побудована крива течії сплаву W-Ni-Fe. Показано, що матеріал сплаву W-Ni-Fe інтенсивно зміцнюється: напруження текучості збільшується від початкового до максимального значення в 2,63 раза. Апроксимація кривої текучості у ви-

гляді степеневій функції дає коефіцієнти $A = 1709$ МПа, $n = 0,259$. При цьому ступінь зміцнення $\frac{A}{\sigma_{0,2}} = 2,63$, показник $n = 0,259$ вказує на достатньо високу пластичність (для ізотропних матеріалів $n = e_i$ в момент максимального навантаження на умовній діаграмі розтягу $P = f(\Delta l)$).

2. Побудована діаграма пластичності в координатах $e_p = f(\eta)$. Показано, що на ділянці від $\eta = -1$ до $\eta = 0$ коефіцієнт чутливості пластичності до схеми напруженого стану дорівнює $\lambda_2 = 0,3$, що характеризується незначним зростанням пластичності в зв'язку з «пом'якшенням» схеми напруженого стану. На ділянці $0 \leq \eta \leq 1$ коефіцієнт чутливості дорівнює $\lambda_1 = 1,75$; що характеризує більш інтенсивне зростання пластичності та є наслідком більш жорсткої схеми напруженого стану.

3. Побудовані тарувальні графіки твердість HV – інтенсивність напружень σ_i – інтенсивність деформацій e_i сплаву W-Ni-Fe. Показано, що залежність твердості HV від інтенсивності напружень σ_i практично лінійна, при цьому твердість зростає в 1,35 раза при зростанні напруження текучості в 2,7 раза. Зв'язок твердості HV від інтенсивності деформацій e_i має степеневу залежність. Отримано можливість перевірки технологічної спадковості точок заготовки на усіх стадіях обробки. Сформована карта матеріалу.

РОЗДІЛ 3

МЕХАНІКА ПРОЦЕСУ РЕДУКУВАННЯ

3.1 Передумови для моделювання процесу редукування за допомогою МСЕ

3.1.1 Вибір та обґрунтування методів дослідження

Вивчення механіки формозміни металу заготовки в процесі редукування полягає в знаходженні інформації, що стосується значень компонент тензора напружень, деформацій, швидкостей напружень в довільний момент часу та в довільній точці деформованої заготовки, а також у визначенні сили деформування, енергії формозміни та кінцевої форми заготовки.

Для нестационарних процесів пластичного деформування аналітичний розрахунок окремих параметрів в статично невизначених задачах осесиметричного навантаження деталей має значні труднощі, пов'язані з інтегруванням диференціальних рівнянь рівноваги та умовою пластичності. Тому, при вирішенні багатьох задач пружно-пластичного деформування активно використовують комп'ютерне моделювання в програмах, що базуються на використанні кінцево-елементного методу моделювання [6].

Особливістю формозміни процесу редукування є наявність великого осередка деформацій на ділянці, що не контактує з інструментом; геометрія цього осередка заздалегідь невідома. Використання таких методів дослідження формозміни металу, як інженерний метод [86], метод характеристик [86], [87], [88], метод верхньої і нижньої оцінок [89], [90], [91] здійснюється на основі відомої геометрії осередка деформації в процесі формозміни. Застосування даних методів ускладнюється відсутністю відомостей про зміну розмірів осередка деформування. Використання варіаційних методів [28], [92] супроводжується зниженням точності результатів, оскільки використовується заздалегідь прийняте поле переміщень (швидкостей деформацій). Перераховані недоліки теоретичних підходів не поширюються на експериментальні та експериментально-розрахункові методи, які, в

свою чергу, дають можливість врахування мінімальної зміни величини факторів процесу у вузькому інтервалі. Використання методів теорії подібності [29], [93], планування експерименту та розуміння впливу геометричних параметрів процесу в безрозмірному вигляді дозволяє більш широко використовувати математичні моделі зі збереженням необхідної точності.

Дослідження механіки процесу пластичної формозміни за допомогою чисельних методів є найбільш ефективним. Чисельні методи дозволяють отримати всі необхідні характеристики досліджуваного процесу та на їх основі в подальшому виконувати моделювання й аналізувати результати дослідження.

Програми та програмні комплекси, що існують на сьогоднішній день, дають можливість забезпечувати продуктивність їх універсального використання для різних типів процесів на основі МСЕ. Аналіз пластичної формозміни підтримується багатьма програмними комплексами, однак мають свої конкретні особливості.

Програми, що були розглянуті є спеціалізовані або універсальні. До універсальних програм належать: Marc, Ansys, Ls-Dyna. Дані програми дозволяють вивчати складні та нестандартні проблеми, але водночас потребують поглиблених знань в досліджуваних процесах й основ кінцево-елементного моделювання. Вони можуть бути використані в наукових, дослідницьких та науково-дослідницьких організаціях з метою детального та поглибленого вивчення процесів. До спеціалізованих програм належать такі: Dytran, Qform, Deform та ін. Вони призначені для вивчення певного класу задач, відносно прості у вивченні та використанні. Недоліком даних програм є відсутність можливості задання особливостей процесу в широких межах.

Можливості програмних комплексів охоплюють досить широкий спектр вирішуваних задач, тому їх використання ґрунтується на наявності доступу до того чи іншого продукту й досвідом роботи з ним. В даній роботі для оцінювання формозміни використано програмний комплекс Ls-Dyna. Даний комплекс програм зарекомендував себе у світовій практиці як один з найпотужніших. Можливості даного пакета програм дозволяють проводити наукові дослідження і вирішувати практично всі актуальні завдання механіки деформованого твердого тіла.

Програмний комплекс Ls-Dyna містить більше 350 різних моделей матеріалу з можливістю створення власних. Даний пакет спочатку призначався для розрахунків високодинамічних процесів, але його використання при моделюванні процесів обробки металів тиском показало, що Ls-Dyna має низку таких переваг перед подібними програмами: швидкість розрахунку, стійкість розрахунку в складних контактних умовах та в умовах нелінійної поведінки деформованого середовища, стабільність розрахунку, коректність вихідних даних. Моделювання з використанням Ls-Dyna дає можливість визначення потрібних параметрів процесу: напружено-деформований стан в перерізі заготовки в довільний момент часу, величини енергетичних параметрів процесів, значення контактних параметрів процесу, величини сил і моментів, нормальних і дотичних сил, значення параметрів процесу при пластичній деформації заготовки та ін.. Використання програмного комплексу Ls-Dyna мало місце в дослідженнях холодного об'ємного штампування [94]; операцій розділення профілю [95]; формування виробів «сильфон» [96]; осаджування циліндричної заготовки [97]; холодного листового штампування [98]; холодної поперечно-гвинтової прокочування [99].

Дані, отримані в результаті імітаційного моделювання за МСЕ, рівнозначні за точністю з результатами натурних експериментів, тому раціонально їх подальше використання для побудови загальних експериментально-розрахункових інженерних моделей, що усувають проведення розрахунків за МСЕ. При цьому використання методів планування експерименту є ефективним [100], [101].

3.1.2 Особливості моделювання за допомогою МСЕ

Аналіз пластичного деформування здійснюється, як правило, з використанням явної постановки задачі, яка передбачає інтегрування за тимчасовим параметром. Даний метод характеризується умовною стійкістю, параметром якої є критерій Куранта [102]. Крок інтегрування має бути меншим цього параметра, тоді процес розрахунку вважають стійким. Дана умова забезпечується автоматично і не вимагає втручання в налаштування програми.

Достовірність розрахунків перевірялась шляхом зіставлення отриманих даних натурних випробувань і результатів моделювання на предмет відповідності зусиль деформування (руйнування) та умов, за яких спостерігається руйнування заготовки (поздовжні та поперечні тріщини, задири, втрата стійкості). Врахування несприятливих умов процесу, шляхом корегування параметрів процесу, дало можливість отримання задовільного результату.

Вибір граничних умов, моделі матеріалу, розміру елемента і якість розбиття досліджуваної області є важливим питанням в процесі моделювання. Точність розрахунку може бути збільшена за рахунок зменшення величини сітки, на яку розбивається об'єкт моделювання, що, в свою чергу, спричинює зростання тривалості обчислення. В окремих випадках тривалість розрахунку досягає порядку тисяч годин на сучасному персональному комп'ютері. Значне зменшення величини сітки супроводжується накопиченням арифметичних помилок, що впливають на результат, тому суттєве подібнення, як правило, не виправдане.

Під час моделювання використана осесиметрична постановка задачі (*axisymmetric*), пуансон задавався абсолютно жорстким тілом (*rigid*), оскільки даний прийом дозволив зменшити час розрахунку при достатній точності отримуваних результатів моделювань [72]. Заготовка при моделюванні задавалася деформованим тілом. Використано тип кінцевих елементів – *plane162*, на які розбивалась деталь. Пластичні властивості оброблюваного матеріалу задавалися у вигляді степеневого закону (див. формулу 2.2). Відношення довжини заготовки до діаметра заготовки становить 3/1 (кількість елементів 600). Таке співвідношення є раціональним з точки зору оцінювання довжини нестационарних ділянок. Збільшення довжини заготовки від вказаних меж не дає більшої інформативності, оскільки збільшується лише довжина стаціонарної ділянки $l_{стац}$. Для прискорення розрахункових процедур додатково використовували принцип збільшення щільності матеріалу і швидкості руху інструменту до значень, що дозволяють не виходити за межі чисельних шумів. Тип контакту задавався з автоматичними налаштуваннями, відповідно до обраного класу завдання (*surface-surface*). Коефіцієнти тертя

вибиралися відповідно до рекомендацій [100], залежно від стану поверхні і мастила.

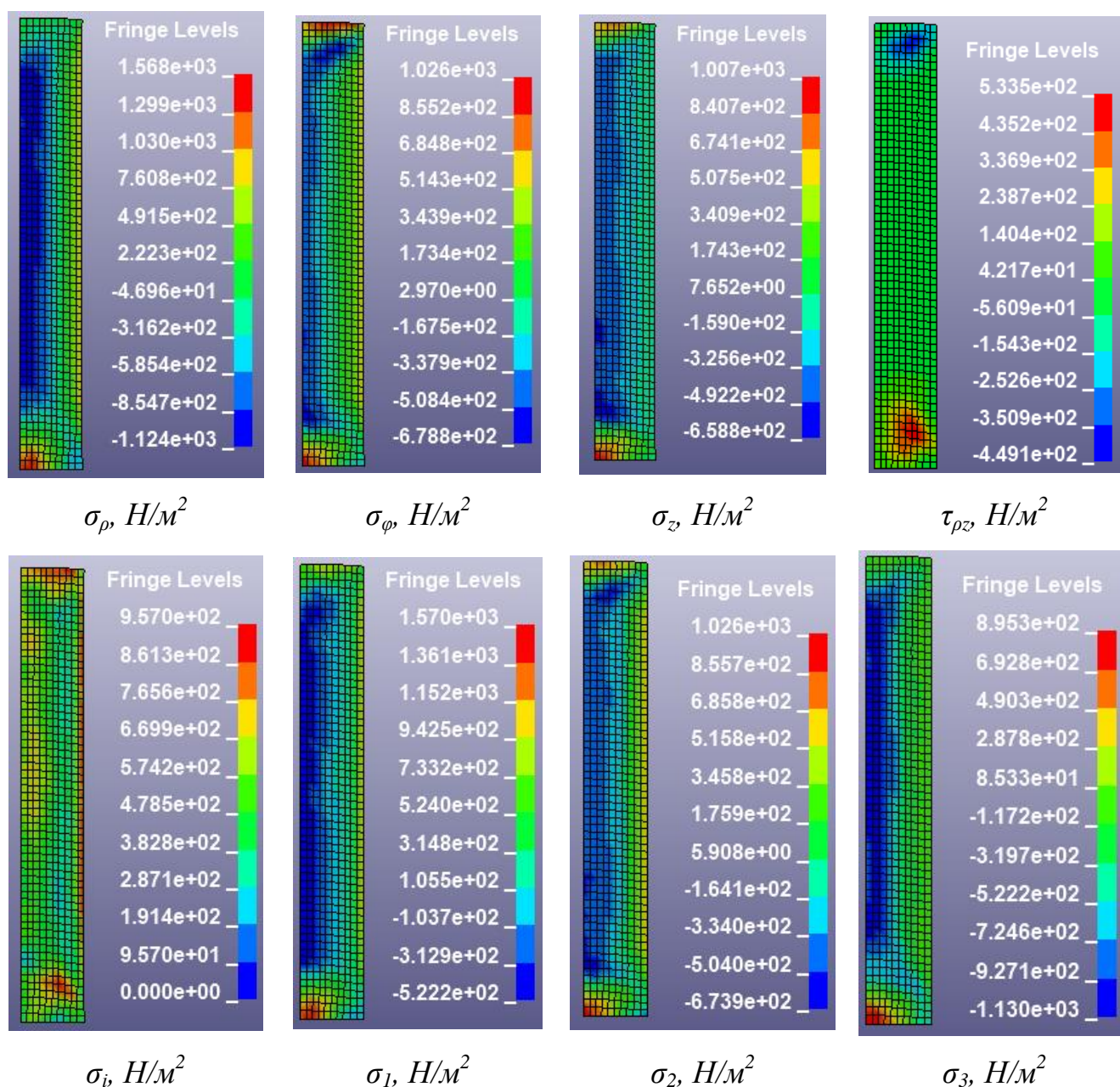


Рисунок 3.1 – Напружений стан в процесі редукування матеріалу заготовок сплаву W-Ni-Fe

Отримані дані у вигляді інформація про НДС використані для отримання шляхів деформування для характерних точок заготовки. Епюри напружень показані на рисунку 3.1 та деформацій на рисунку 3.2.

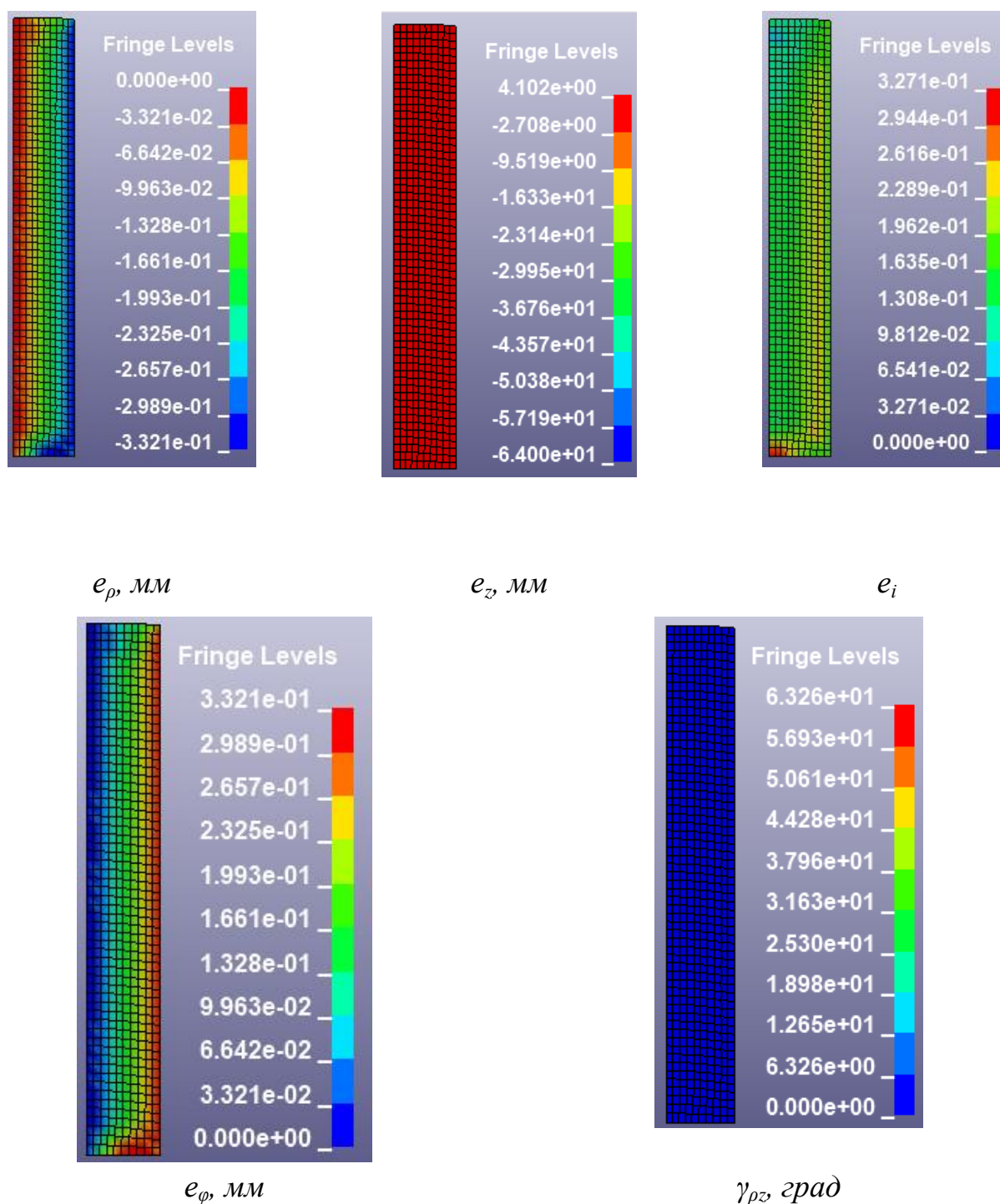


Рисунок 3.2 – Деформований стан в процесі редукування матеріалу заготовок сплаву W-Ni-Fe

3.2 Аналіз кінематики деформування процесу редукування

3.2.1 Постановка задачі

При моделюванні МСЕ розглянутого в роботі процесу редукування виходили з умови, що властивості матеріалу не впливають на кінематику процесу, який

описано нижче на прикладі спеченого сплаву W-Ni-Fe. Вивчався розподіл деформацій по перерізу заготовки при різних значеннях кута нахилу матриці та різних значеннях відносного натягу. В результаті спікання заготовки з матеріалу W-Ni-Fe отримують заготовку короткої довжини, тому забезпечення усталеного процесу в процесі її подальшої обробки стає важливим аспектом. Для забезпечення максимальної рівномірності деформацій по довжині заготовки контролювався розмір неусталених ділянок процесу.

Особливістю механіки процесу редукування є те, що в процесі формоутворення заготовки спостерігаються три характерні по довжині ділянки, які характеризуються неусталеним процесом на вході (виході) заготовки в інструмент (з інструменту) та усталеним процесом в середній частині заготовки. При виготовленні виробів, зокрема на основі нових порошкових спечених матеріалів, можна забезпечити необхідну технологічну спадковість в межах ділянки стаціонарності процесу, яка залежить від загальної довжини заготовки. Але особливістю виготовлення порошкових матеріалів є їх відносно невелика довжина, яка, зазвичай, складає 10..20 діаметрів, отже проблема зменшення величини ділянок нестационарного протікання процесу є актуальною для заготовок з таких матеріалів. Вирішення даної проблеми можливе шляхом надання рекомендацій щодо забезпечення сприятливих технологічних параметрів і прогнозування поведінки матеріалу в процесі формозміни. Попередньо з проведених експериментальних досліджень з'ясовано, що на кінематичні характеристики процесу найбільше впливають такі параметри, як кут нахилу матриці α ; величина відносного натягу пари інструмент-заготовка δ . Дослідження впливу цих параметрів процесу на механіку цінцевого формозмінювання дає можливість прогнозування поведінки матеріалу в процесі деформування.

3.2.2 Технологічні відмови

При певних значеннях технологічних параметрів можуть спостерігатися технологічні відмови у вигляді втрати стійкості, руйнування інструменту, руйнування заготовки (рис. 3.3). Визначення раціональних технологічних параметрів, що

забезпечують безвідмовність технологічного процесу та необхідну якість виробів, отриманих редукуванням, є важливою задачею при проектуванні процесу.

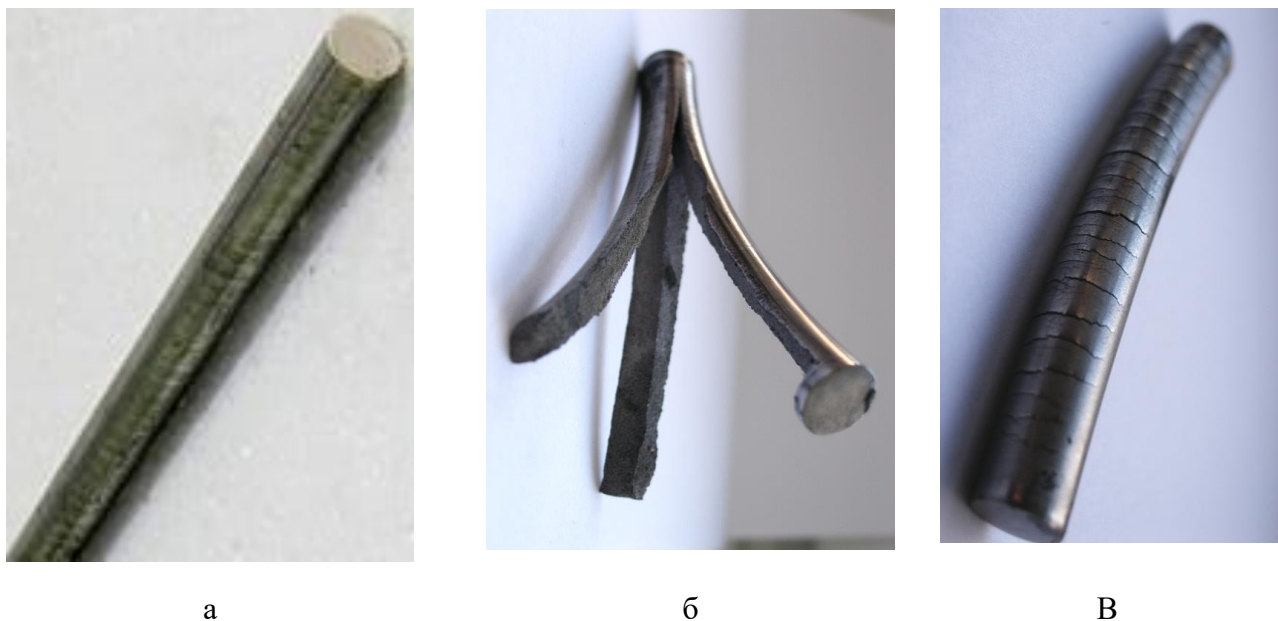


Рисунок 3.3 – Поведінка зразків системи W-Ni-Fe в процесі редукування при куті нахилу робочого конуса 7° (а – безвідмовне редукування, б – тріщина на осі симетрії зразка, в – тріщини на поверхні зразка)

Як було зазначено раніше, процес редукування дозволяє виконувати технологічну обробку заготовок відносно малих розмірів (щодо величини діаметра), в яких величини ділянок, що знаходяться в області нестационарного формоутворення, сягають значних розмірів. По довжині редукованої заготовки виникають ділянки з нерівномірними деформаціями, величини яких залежать від умов у контактній області. В літературних джерелах відсутні відомості про розрахунок довжини таких ділянок, дослідження їх механіки, зокрема напружено-деформованого стану.

В процесі дослідження необхідним є здійснення аналізу механіки процесу редукування коротких заготовок сплаву W-Ni-Fe з встановленням закономірностей між основними технологічними параметрами та розподілом інтенсивності накопичених деформацій (зміцнення).

Попередньо проведено моделювання процесу редукування для циліндричних заготовок із використанням МСЕ, оскільки він зарекомендував себе в світовій практиці стабільністю розрахунків і широкими можливостями на всіх етапах моделювання [25]. Циліндрична заготовка проштовхується через пуансон з деяким натягом (рис. 3.4).

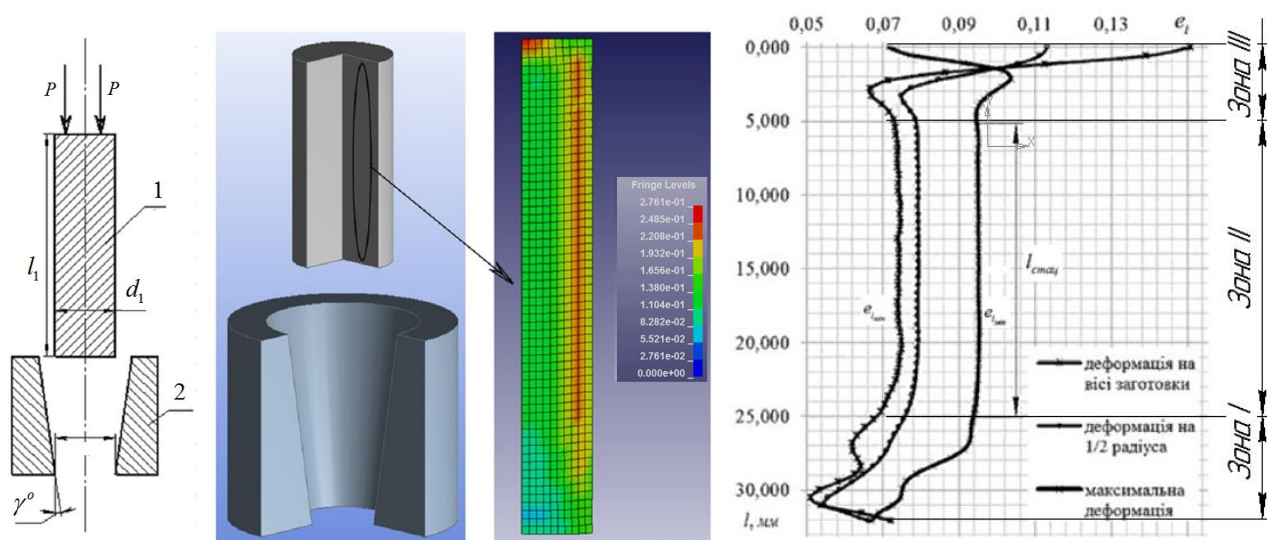


Рисунок 3.4 – Редукування заготовки (1 – заготовка, 2 – матриця)

Хід процесу редукування характеризується збільшенням площі контакту пари інструмент-заготовка шляхом збільшення їх відносного натягу або коефіцієнта тертя (рис. 3.5, а). При збільшенні площі контакту слід пам'ятати про забезпечення необхідної довжини інструменту (рис. 3.5, б), в протилежному випадку інструмент може зрізати хвилю матеріалу, що виникає перед інструментом.

Заготовка, що обробляється редукуванням, може викривити свою вісь через втрату стійкості, тому її довжина не має бути більшою за критичну (див. рис. 3.3,

б). Має виконуватись умова: $\frac{F_{\text{деф}}}{A_0} < \sigma_T$, де $F_{\text{деф}}$ – зусилля деформування; A_0 – площа поперечного перерізу зразка; σ_T – границя текучості.

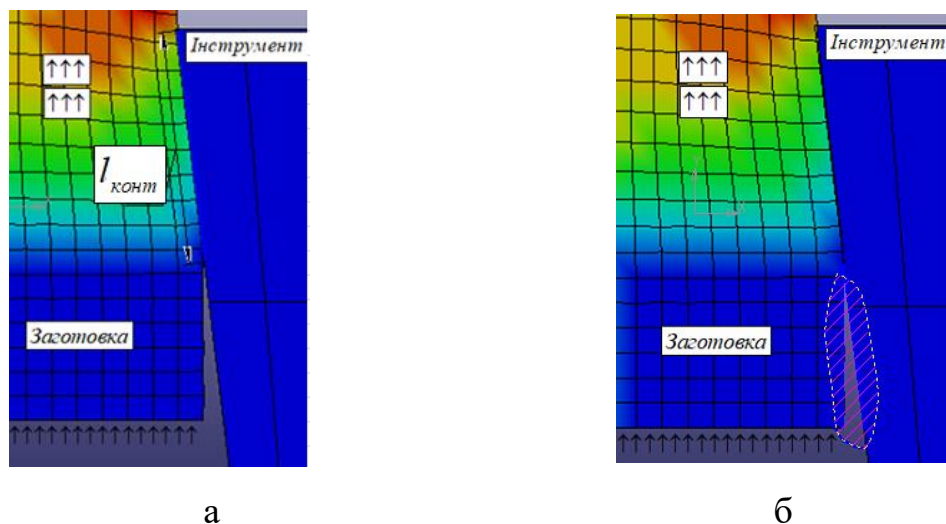


Рисунок 3.5 – Довжина контакту пари інструмент-заготовка

Аналіз поведінки металу при різних значеннях обтиску (тертя) показав, що, забезпечивши стійкість заготовки та необхідну довжину інструменту, має місце така технологічна відмова, як осадження заготовки до основного осередку деформації, що пов'язано з переходом металу в пластичну область (рис. 3.6). При цьому варто враховувати, що значення коефіцієнта тертя більше 0,12 спричиняє руйнування заготовки.

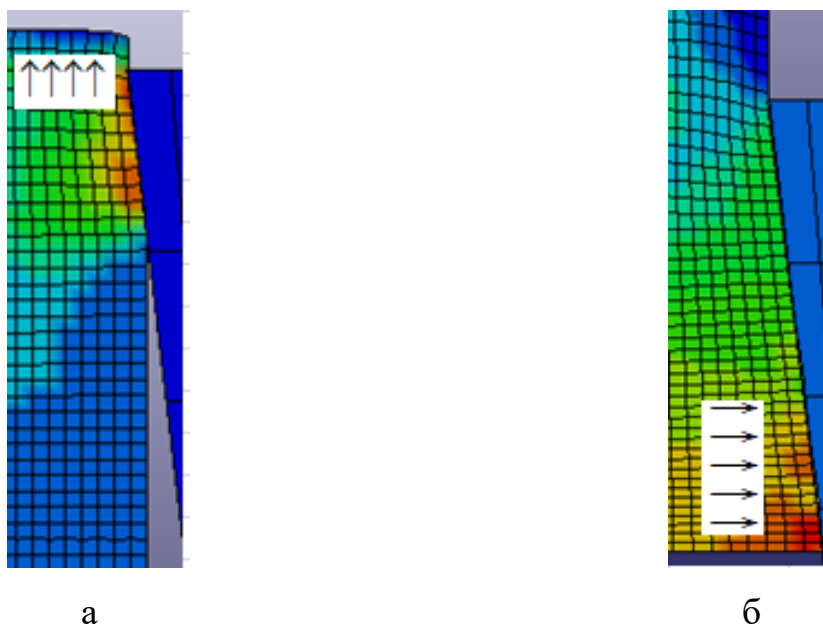


Рисунок 3.6 – Технологічна відмова, пов'язана з пластичним деформуванням металу перед інструментом

Відповідно, при здійсненні процесу редукування потрібно уникати таких відмов, як втрата стійкості, задири на поверхні заготовки, перехід металу у пластичну область перед інструментом.

3.3 Напружено-деформований стан в процесах редукування циліндричних заготовок

3.3.1 Вибір меж технологічних параметрів

За аналогії з [6] осередок деформації осесиметричного процесу редукування можна подати у вигляді сукупності кількох деформованих зон заготовки, що плавно переходять одна в одну внаслідок нерозривності деформацій. Схема процесу (див. рис. 3.4), розміщення осередку деформацій та розподіл деформацій по довжині для суцільних циліндричних заготовок, що використовуються в процесі редукування, показано вище.

Вибір величини відносних натягів ($\delta = 0,01..0,13$ з інтервалом $0,01$;) та значень кутів редукування ($\gamma = 3^\circ..15^\circ$ з інтервалом 2°) для подальших розрахунків здійснено на основі роботи [21], в якій досліджувалися подібні осесиметричні процеси.

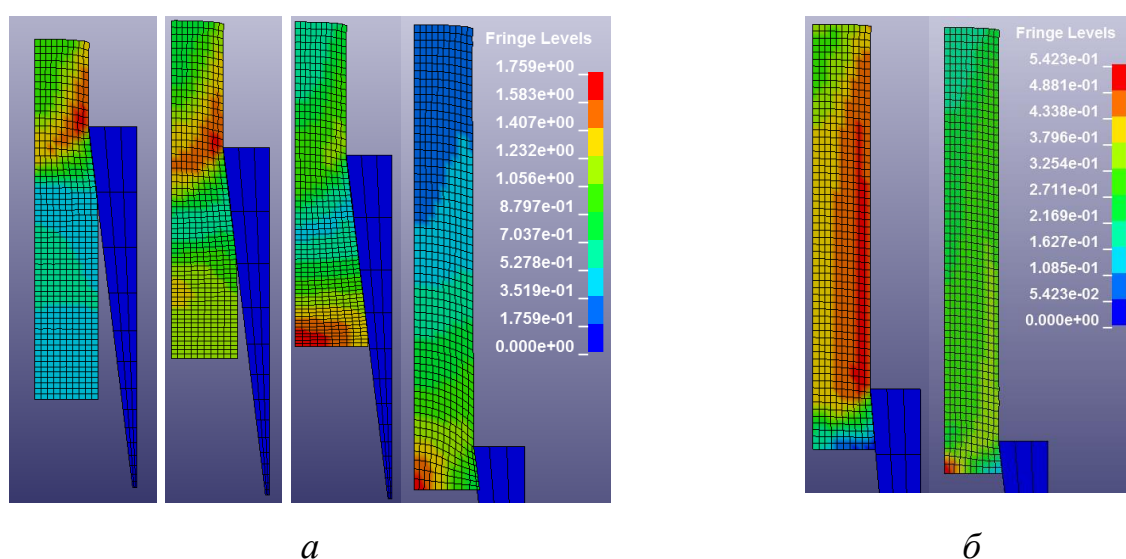


Рисунок 3.7 – Редукування заготовки при різних значеннях коефіцієнта тертя
(*a* – коефіцієнт тертя $f=0,12..0,16$; *б*- – коефіцієнт тертя $f=0,1$)

Фактором, що обмежує процес на закріпленій оправці, є несприятливі умови тертя в осередку деформації, які вимагають застосування високоефективних технологічних мастил і надійного кріплення оправки, спеціальної підготовки вихідної заготовки та раціонального вибору натягів (рис. 3.7).

Зіставлення результатів моделювання з різними значеннями коефіцієнта тертя f показало, що мінімальні величини коефіцієнта тертя сприяють більш рівномірному деформуванню заготовки по довжині та зменшенню величини ділянки нестационарності. При цьому величина зусилля деформування зразків з відношенням довжини до діаметра 50 мм/10 мм зі спеченого сплаву системи W-Ni-Fe (W – 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%.) при куті нахилу матриці 7^0 наведена у табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Максимальне значення зусилля деформування (кН) при $\gamma = 7^0$

		Значення коефіцієнта тертя f					
		0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,15
Величина відносного натягу δ	0,01	1,03	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05
	0,02	1,6	1,61	1,63	1,72	1,74	1,74
	0,03	1,77	1,77	1,76	1,75	1,72	1,76
	0,04	1,67	1,69	1,69	1,69	1,78	1,78
	0,05	1,63	1,66	1,66	1,65	1,66	1,7
	0,06	1,76	1,62	1,76	1,64	1,68	1,68
	0,07	1,6	1,69	1,74	1,75	1,8	1,76
	0,08	1,73	1,77	1,74	1,78	1,79	1,81
	0,09	1,56	1,77	1,82	1,82	1,93	1,92
	0,1	1,53	1,79	1,86	1,9	2,13	2,53
	0,11	1,56	1,59	1,9	1,97	-	-

З наведених результатів розрахунку можна зробити висновок, що значення коефіцієнта тертя $f \leq 0,1$ практично не впливає на енергосилові характеристики процесу. Цей висновок стосується й інших кутів нахилу інструменту ($\gamma=3..15^0$).

Крім того напружено деформований стан також слабо залежить від коефіцієнта тертя в межах $0,03 \leq f \leq 0,1$. Тому для імітаційного моделювання задавався коефіцієнт тертя $f = 0,1$ як одне зі значень, яке забезпечується в процесі з використанням рекомендованих технологічних мастил на основі даних роботи [21].

Розрахунок величини відносного натягу здійснено за формулою

$$\delta = \frac{d_{загот} - d_{інстр}}{d_{інстр}}, \quad (3.1)$$

де δ – величина відносного натягу; $d_{загот}$ – діаметр заготовки; $d_{інстр}$ – прохідний діаметр інструменту.

В процесі моделювання використано дані про механічні характеристики сплаву системи W-Ni-Fe, які наведені в попередньому матеріалі (підрозділ 2.2).

Дослідження процесу редукування було здійснено в таких діапазонах технологічних параметрів:

- а) кут нахилу матриці $\gamma = 3..15^0$;
- б) величина відносного натягу пари інструмент-заготовка $\delta = 0,01..0,13$;
- в) коефіцієнти апроксимації кривої течії: $A = 1731,6 \text{ МПа}$; $n = 0,259$;
- г) швидкість деформування $0,2 \text{ м/с}$;
- д) модуль пружності $E=2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$;
- е) коефіцієнт Пуассона $\mu= 0,3$;
- є) коефіцієнт тертя $f = 0,06..0,16$.

3.3.2 Аналіз результатів розрахунку деформованого стану

З результатів імітаційного моделювання, яке підтверджено експериментально, впливає, що відносний натяг δ суттєво впливає на механіку процесу редукування. Крім того, при великих значеннях відносного натягу розподіл деформацій по довжині зразка має значну нерівномірність та на виході заготовки з пуансона спостерігається суттєве зростання напружень (див. рис. 3.7). Моделювання процесу редукування при різних значеннях відносного натягу δ показало нам, що при

$\delta < 0,02$ спостерігається поверхневе зміцнення матеріалу заготовки, при $0,02 \leq \delta \leq 0,1..0,11$ – матеріал заготовки зміцнюється по всьому перерізу ($\delta \leq 0,1$ для $\gamma \leq 5^\circ$; $\delta \leq 0,11$ для $\gamma > 5^\circ$), при $\delta > 0,1..0,11$ – матеріал характеризується значною нерівномірністю зміцнення по довжині заготовки.

З графіків видно (рис. 3.8), що в процесі редукування суттєвих значень досягає інтенсивність деформацій в місці прикладення зусилля (максимальне значення на осі симетрії). Ця зона є найбільш небезпечною з точки зору руйнування.

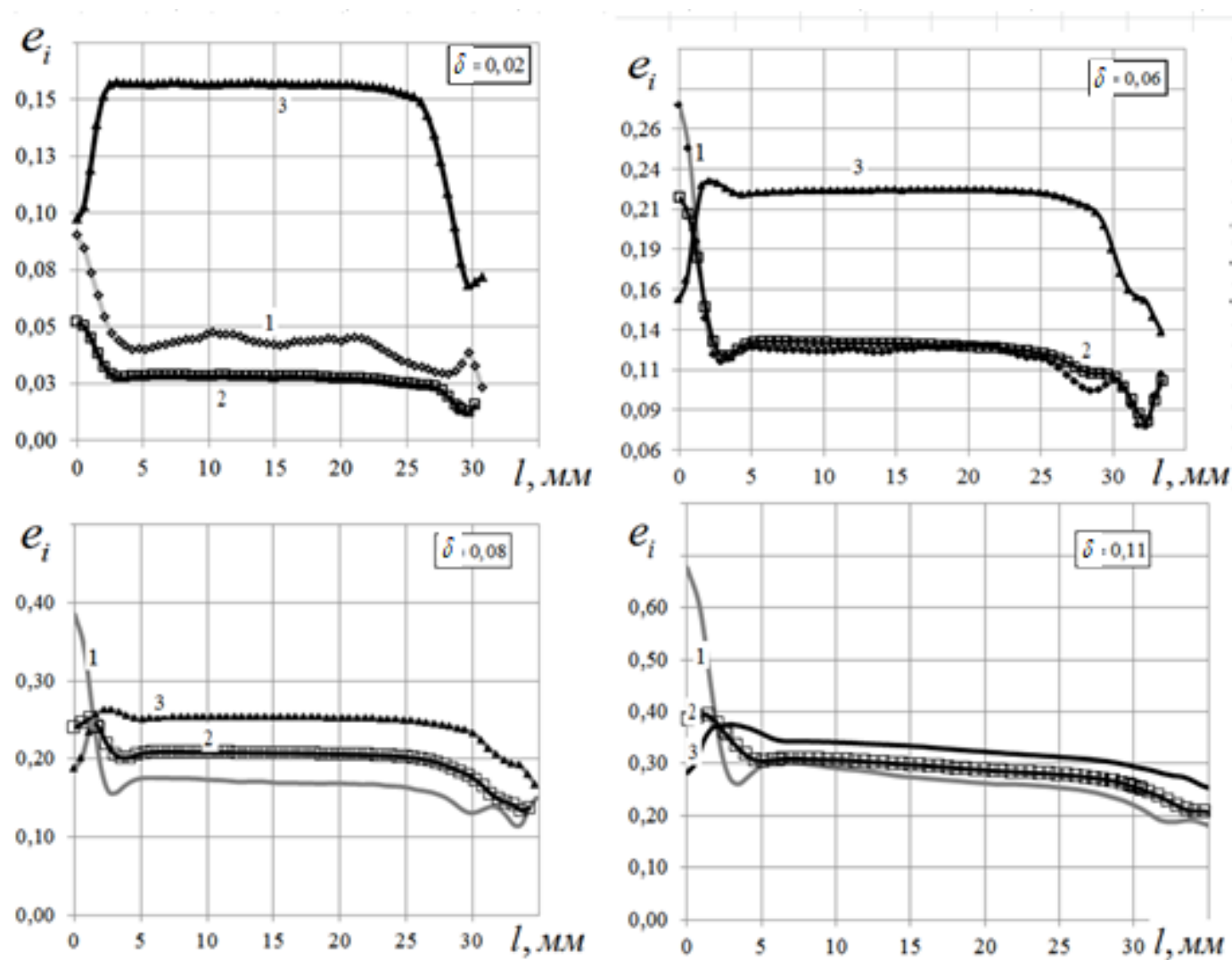


Рисунок 3.8 – Деформація заготовки при різних значеннях натягу
(1 – деформація на осі симетрії; 2 – деформація заготовки на 1/2 радіуса;
3 – деформація на поверхні)

Розподіл інтенсивності деформацій по перерізу стержня в стаціонарній ділянці має нерівномірність. Позначимо максимальне та мінімальне значення інтенсивності деформацій як $e_{i_{max}}$ та $e_{i_{min}}$ (рис. 3.9).

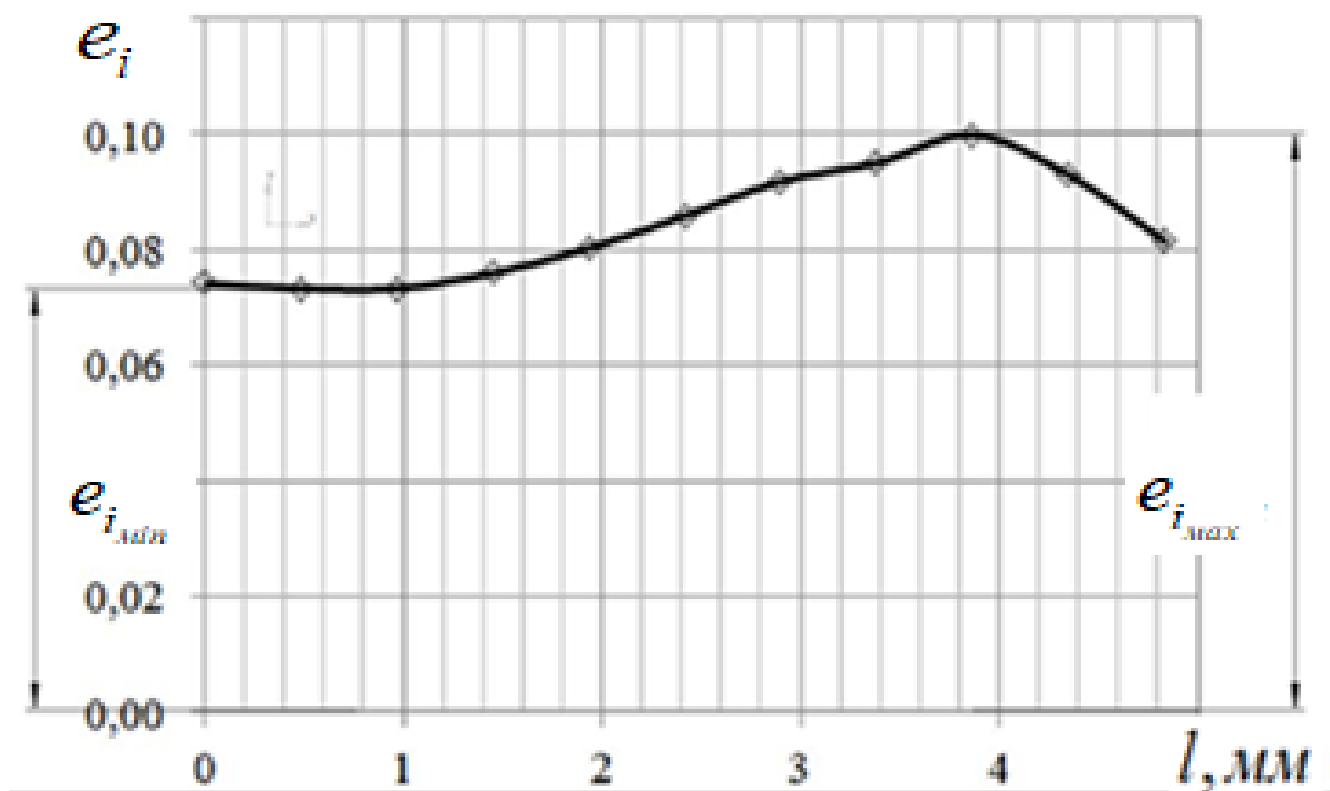


Рисунок 3.9 – Розподіл інтенсивності деформацій по перерізу стержня

За результатами моделювання отримали значення максимальної ($e_{i_{max}}$) та мінімальної ($e_{i_{min}}$) інтенсивностей деформацій в умовно стаціонарній ділянці при різних значеннях кута редукування γ та відносного натягу δ (рис. 3.9).

Використавши програму обробки статистичних даних «Origin Pro» апроксимуємо розрахункові значення максимальної (мінімальної) інтенсивностей деформацій залежності від кута редукування γ та відносного натягу δ (рис. 3.10).

Залежність $e_{i_{max}}$ від δ та γ , що зображена на рис. 3.10, знайдена у вигляді

$$e_{i_{max}} = e_{i0} + B \cdot \gamma^C + D \cdot (\delta)^K + F \cdot \gamma^C \cdot (\delta)^K, \quad (3.2)$$

де $e_{i0} = 0,034 \pm 0,0179$; $B = 0,00304 \pm 0,0014$; $C = 1.82 \pm 0,163$; $D = 4.24 \pm 1,24$; $K = 1.39 \pm 0,144$; $F = -0.0042 \pm 0,0046$.

Скорегований коефіцієнт детермінації $R^2_{adj} = 0,986$.

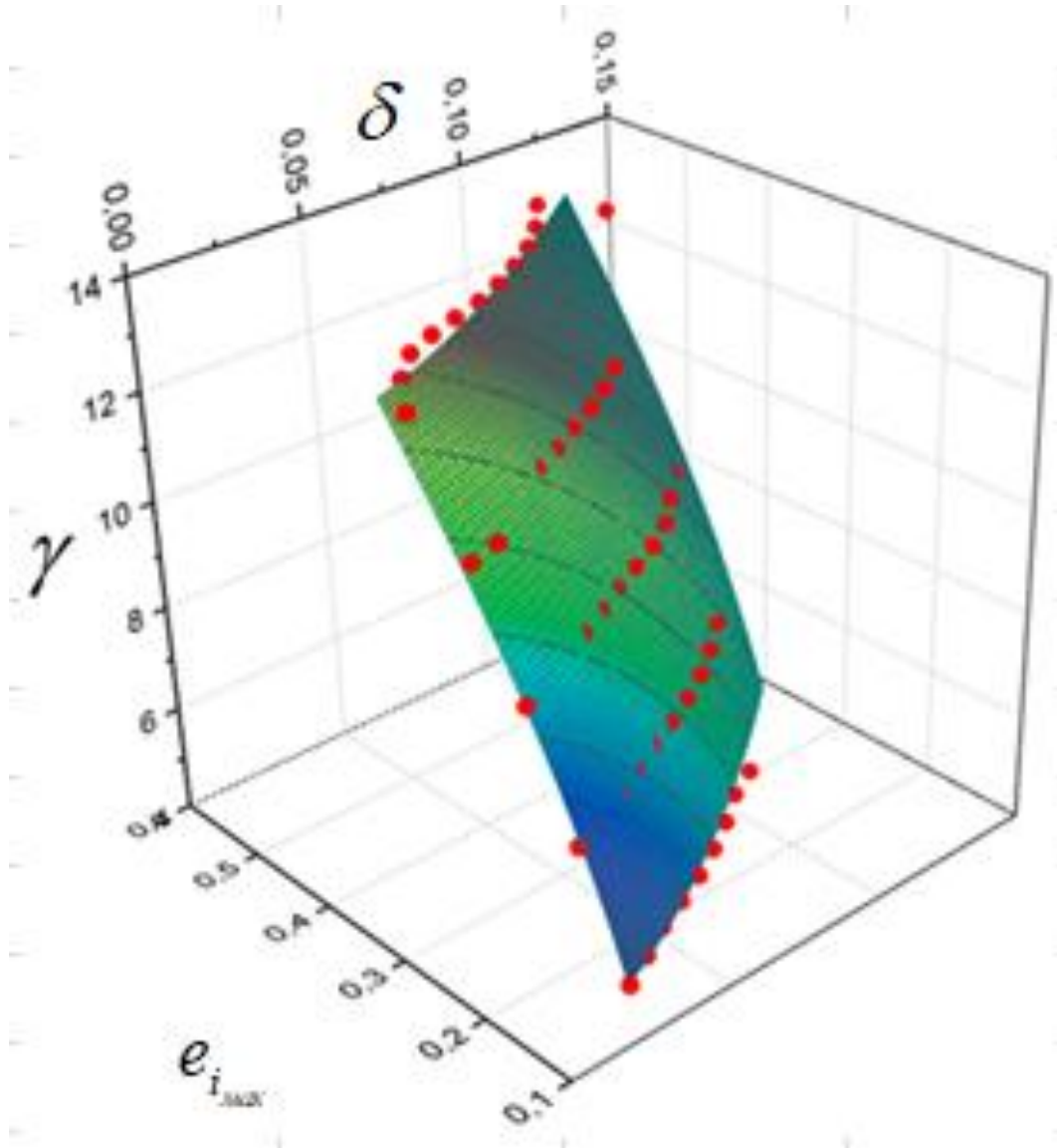


Рисунок 3.10 – Залежність e_i від δ та γ в координатах: максимальна $e_{i_{max}}$ (біля поверхні) інтенсивність деформацій в умовно стаціонарній ділянці: кут редукування γ – відносний натяг δ

Залежність $e_{i_{min}}$ від δ та γ , що зображена на рис. 3.11, знайдена у вигляді

$$e_{i_{min}} = e_{i0} + Q \cdot \gamma + R \cdot \delta + N \cdot \gamma^2 + V \cdot (\delta)^2 + M \cdot \gamma \cdot \delta, \quad (3.3)$$

де $e_{i0} = 0.074 \pm 0,0154$; $Q = -0,0123 \pm 0,0029$; $R = 0,223 \pm 0,184$;
 $N = 5,19 \cdot 10^{-4} \pm 1,54 \cdot 10^{-4}$; $V = 14,2 \pm 1,07$; $M = 0,084 \pm 0,0124$.

Скорегований коефіцієнт детермінації $R^2_{adj} = 0,991$;

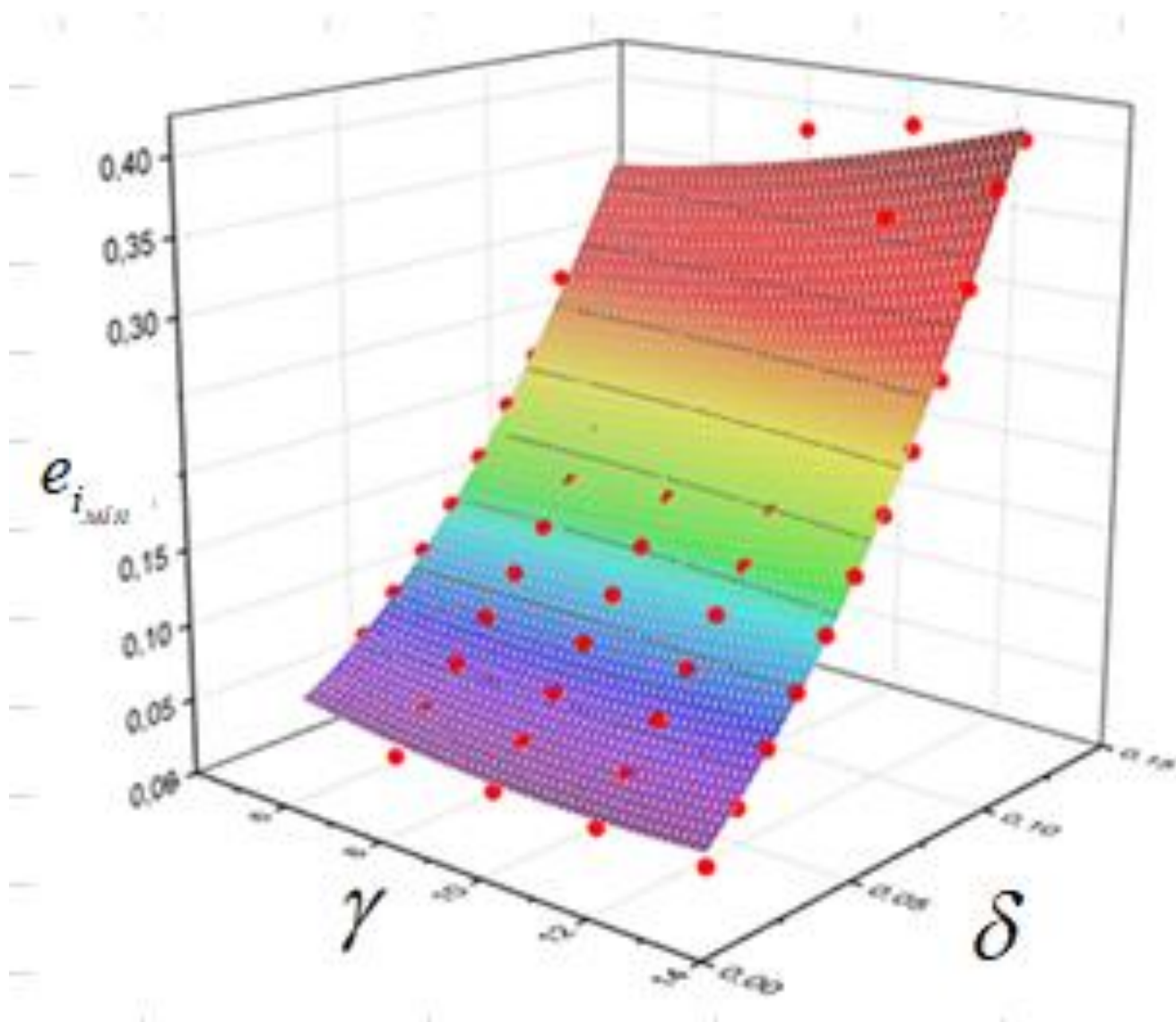


Рисунок 3.11 – Залежність e_i від δ та γ в координатах: мінімальна $e_{i_{min}}$ (на осі симетрії заготовки) інтенсивність деформацій в умовно стаціонарній ділянці: кут редукування γ – відносний натяг δ

Для забезпечення рівномірного наклепу по заготовці проведемо аналіз впливу γ , δ на інтенсивність деформацій. Введемо коефіцієнт нерівномірності деформацій у вигляді

$$m = \frac{e_{i_{min}}}{e_{i_{max}}} . \quad (3.3)$$

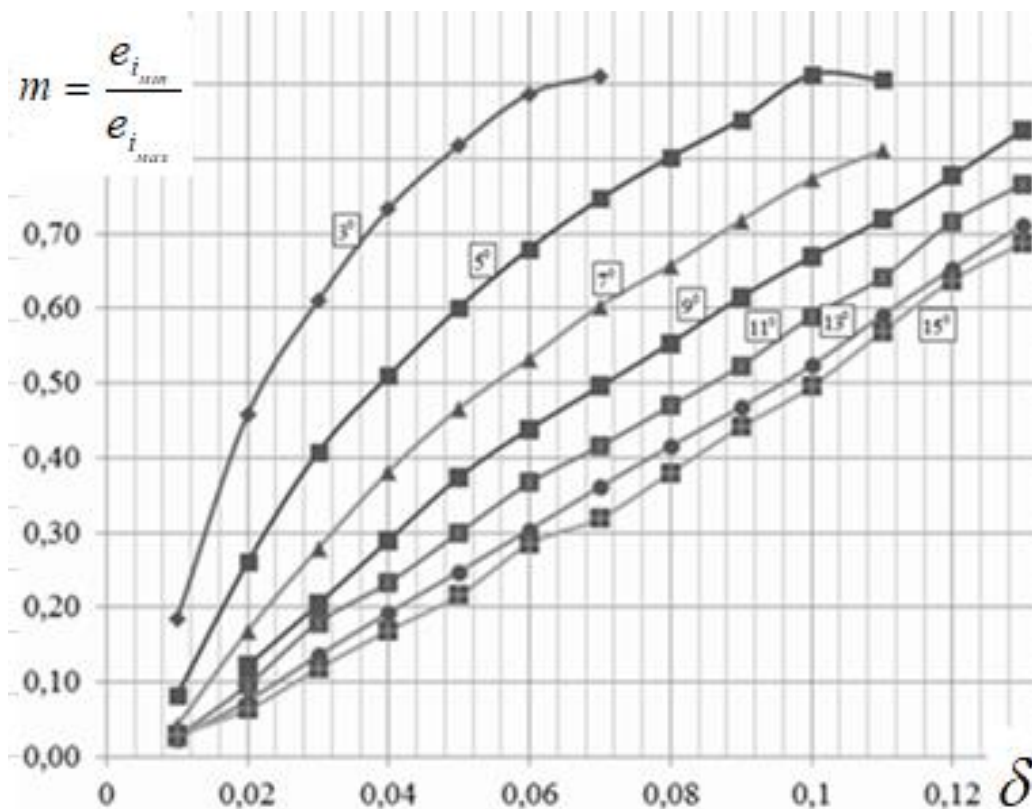


Рисунок 3.12 – Залежність m від натягу δ та кута γ

Залежність m від δ та γ (рис. 3.12) знайдена у вигляді

$$m = m_0 + X \cdot \gamma + Y \cdot \delta + Z \cdot \gamma^2 + L \cdot (\delta)^2 + J \cdot \gamma \cdot \delta, \quad (3.4)$$

де $m_0 = 0.586 \pm 0,267$; $X = -0,106 \pm 0,0045$; $Y = 10,5 \pm 0,569$; $Z = 0,0041 \pm 2,37 \cdot 10^{-4}$;
 $L = -14,96 \pm 3,835$; $J = -0,228 \pm 0,0296$.

Скорегований коефіцієнт детермінації $R^2_{\text{adj}} = 0,99$;

Отримана залежність (3.4) дає можливість оцінити нерівномірність деформацій по перерізу зразка без проведення натурних досліджень. Щоб забезпечити рівномірність розподілу деформацій по перерізу зразка варто використовувати коефіцієнт нерівномірності інтенсивності деформацій (m). Чим ближче значення m до одиниці, тим рівномірніше розподілені деформації по перерізу (див. рис. 3.10, 3.11).

3.3.3 Особливості напруженого стану процесу редукування

В роботі [6] за участі автора наведено рекомендації щодо безвідмовної реалізації формоутворення в процесі редукування. Для вивчення напруженого стану здійснено аналіз результатів розрахунку в межах рекомендацій. В даному пункті використано результати розрахунку процесу редукування при куті нахилу інструменту $\gamma=7^{\circ}$.

На рисунку 3.13 наведено результати розрахунку всіх компонентів тензора напружень $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}$ (в циліндричній системі координат $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_{\phi}, \tau_{rz}$) по контактній поверхні матриці. Відмітимо, що нормальні напруження стискальні. Вигляд функції, що описує зміну величини напружень в процесі деформування, має вигляд полінома другого степеня $\sigma = A + B(\Delta r) + C(\Delta r)^2$. Їх максимальне значення при різних обтисках змінюється в межах $-185 \geq \sigma \geq -1606$ МПа. Дотичні напруження змінюються за лінійним законом. При збільшенні обтиску їх величина збільшується.

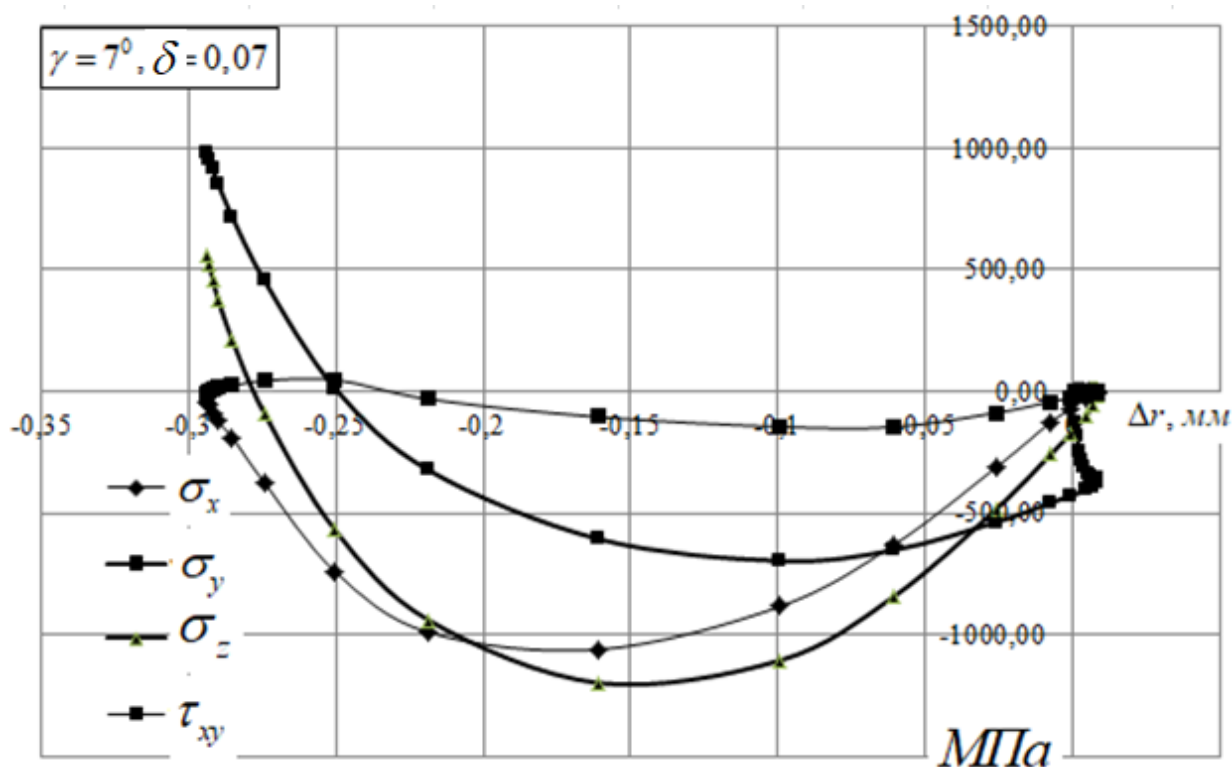


Рисунок 3.13 – Зміна величини компонент тензора напружень $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}$ в контактній області

В подальшому нас буде цікавити механіка процесу редукування при різній геометрії та різних величинах відносного обтиску. Розглянемо отримані нами результати розрахунку напруженого стану при значенні величини кута нахилу матриці $\gamma=7^0$ та різних величинах відносного обтиску ($\delta = 0,01-0,11$). В результаті розрахунку нами отримано компоненти тензора напружень σ_r , σ_z , σ_φ , τ_{rz} , також головні напруження σ_1 , σ_2 , σ_3 та їх інтенсивність σ_i .

На рисунку 3.13 показано залежність максимальних головних нормальних напружень від величини відносного обтиску для характерних зон деформування.

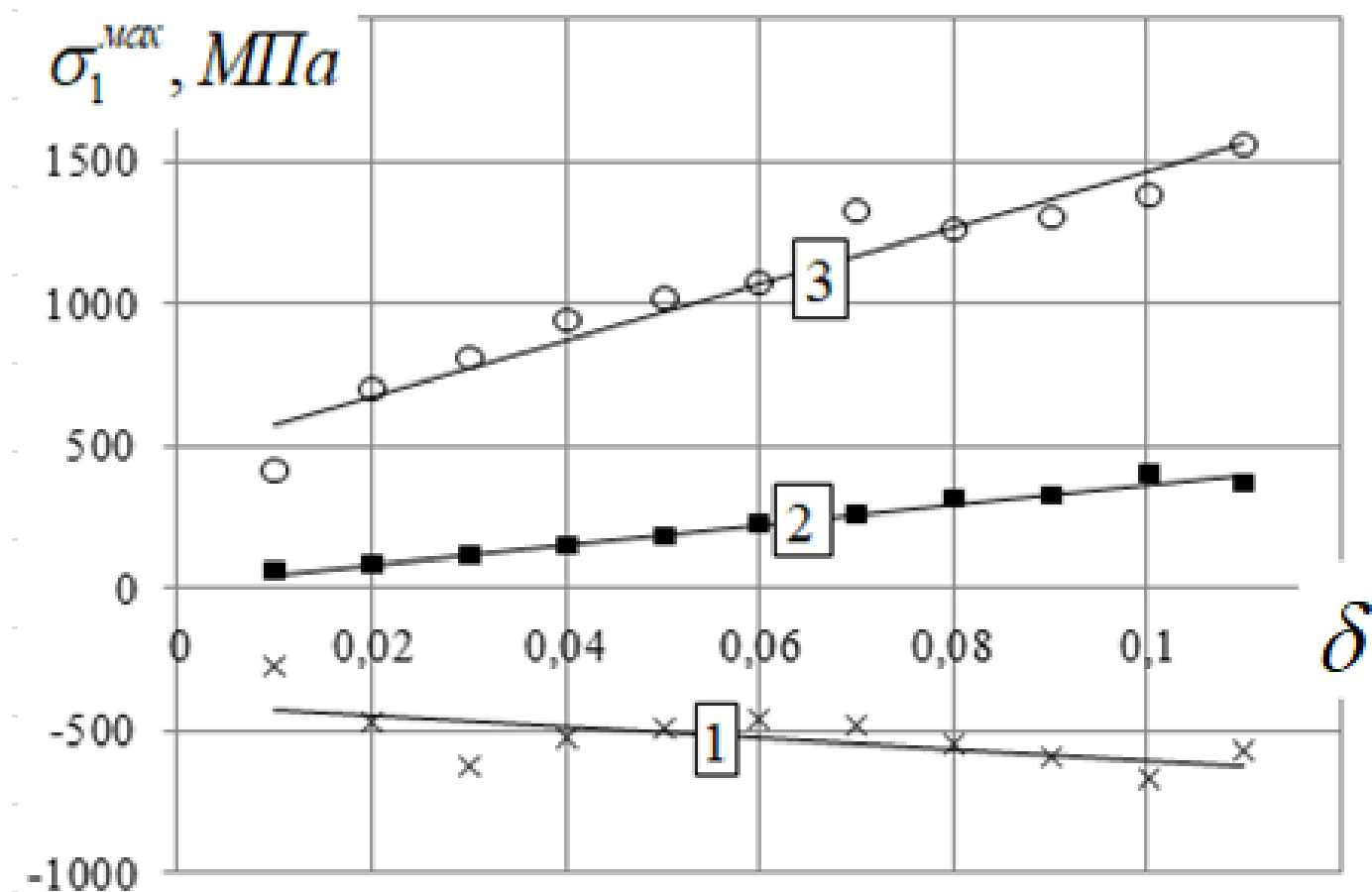


Рисунок 3.14 – Залежність максимальних головних нормальних напружень від величини відносного обтиску для: 1 – осі симетрії заготовки в межах встановленого процесу; 2 – осередку деформації в межах устанавленого процесу; 3 – небезпечній точці деформування

Як видно з рисунка 3.14, в зонах 2 і 3 спостерігаються розтягувальні напруження, що може стати причиною руйнування. В подальшому нами буде здійсню-

ватися оцінювання деформованих заготовок, що піддаються редукуванню, при цьому використаний ресурс пластичності матеріалу заготовок оцінюють за допомогою феноменологічних критеріїв руйнування. Ці критерії містять не тільки карти матеріалів (діаграми пластичності), але й шляхи деформування в координатах $[e_i = f(\eta), e_i = f(\chi), e_i = f(\mu_\sigma)]$, накопичена інтенсивність деформацій – безрозмірні показники напруженого стану [4].

Аналіз результатів розрахунку НДС у вказаних зонах (а саме: в зоні 3) показують, що саме в цих зонах потрібно розрахувати показники напруженого стану η , χ , μ_σ з метою побудови шляхів деформування в небезпечних зонах (див. формули 1.2, 1.7). Ці результати будуть викладені в розділі 4.

3.3.4 Контактні напруження при редукуванні

Практичний інтерес мають дані розрахунку полів напружень в осередку деформацій в зонах контакту матриці та заготовки. Значення контактних напружень σ_n , τ_n в зоні контакту дає можливість оцінити зносостійкості матриць, вибрати їх раціональний профіль.

Шляхом найпростіших перетворень перейдемо до циліндричної системи координат для контактних напружень на контурі матриці ($\sigma_{x \rightarrow \sigma_r}$, $\sigma_{y \rightarrow \sigma_z}$, $\sigma_{z \rightarrow \sigma_\phi}$, $\tau_{xy \rightarrow \tau_{rz}}$):

$$\sigma_n = \sigma_r \cdot \cos^2 \gamma + \sigma_z \cdot \sin^2 \gamma + \tau_{rz} \sin 2\gamma, \quad (3.5)$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_r + \sigma_z}{2} \sin 2\gamma + \tau_{xy} \cos 2\gamma, \quad (3.6)$$

На рис. 3.11 було наведено результати розрахунку компонент тензора напружень в контактній області, а на рис. 3.12 показані контактні напруження σ_n та τ_n , розраховані за формулами (3.5) та (3.6) для кута нахилу матриці $\gamma = 7^\circ$ та різних обтисків ($\delta = 0,01 \dots 0,11$).

Як видно з наведених результатів, дотичні контактні напруження розподілені вздовж контуру матриці досить рівномірно, з незначним зростанням до 200 МПа при максимальному обтиску.

Нормальні контактні напруження σ_n , що показані на рис. 3.13, розподілені по контуру нерівномірно. Максимальні значення σ_n знаходяться в межах $200 \geq \sigma_n \geq -1200$, тобто зростають зі збільшенням обтиску в 7,5 раза (див. рис. 3.12). Такий характер розподілення контактних напружень свідчить про необхідність зміни геометрії контуру матриці. В розділі 1 (підр. 1.2) нами наведені геометрії контуру матриць при осесиметричному видавлюванні, яке забезпечує зменшення зусилля деформування та мінімальний ресурс пластичності. Матриці з прямолінійною твірною (прямолінійні) мають розподіл напружень по поверхні контакту, показаний на рис. 3.15.

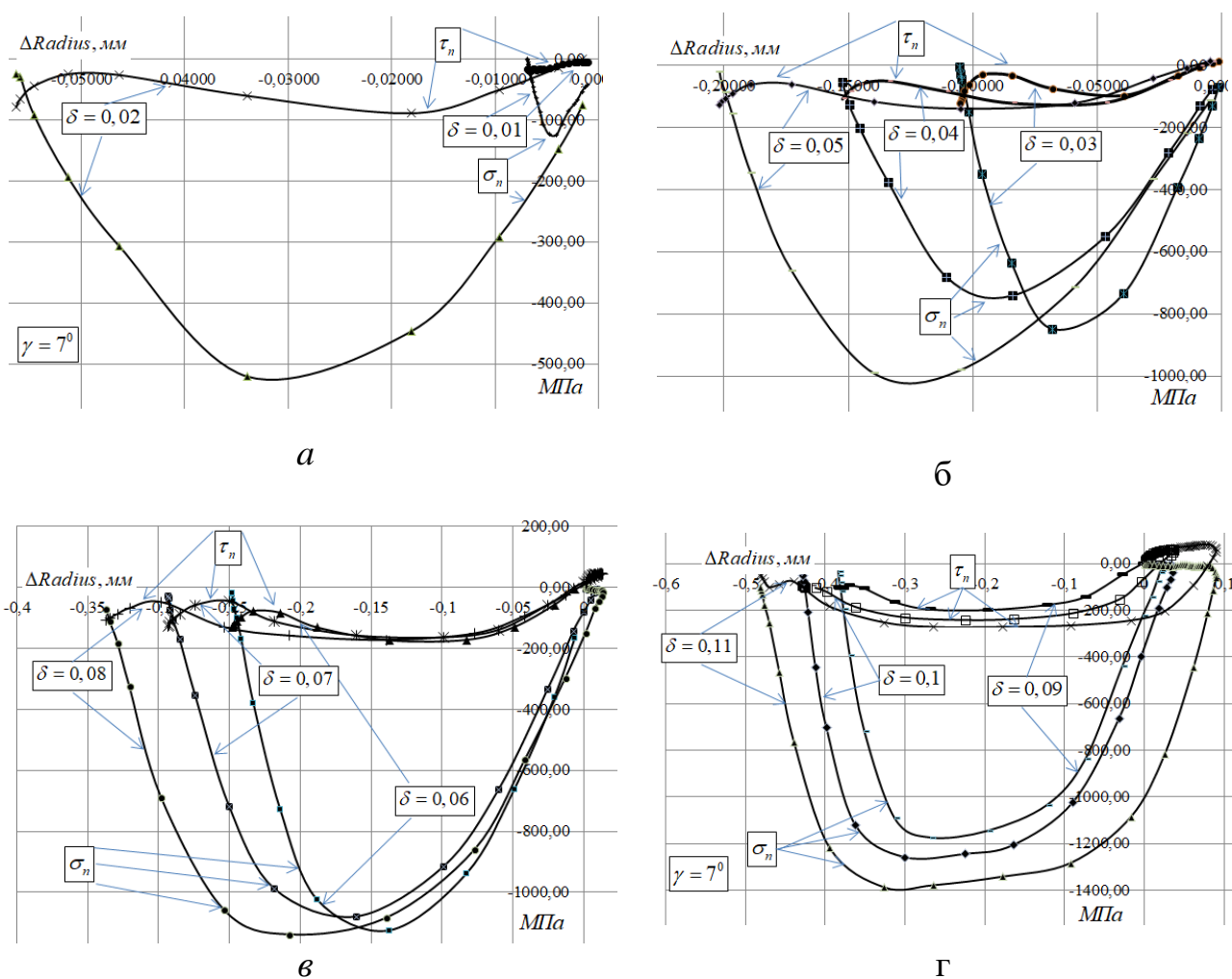


Рисунок 3.15 – Значення контактних напружень по контуру матриці для процесу редукування з кутом нахилу матриці $\gamma = 7^\circ$ та різних обтисків ($\delta = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,1; 0,11$)

Оскільки при інженерних розрахунках зазвичай використовують максимальні значення напружень, то покажемо залежність головних напружень від величини відносного обтиску (рис. 3.16).

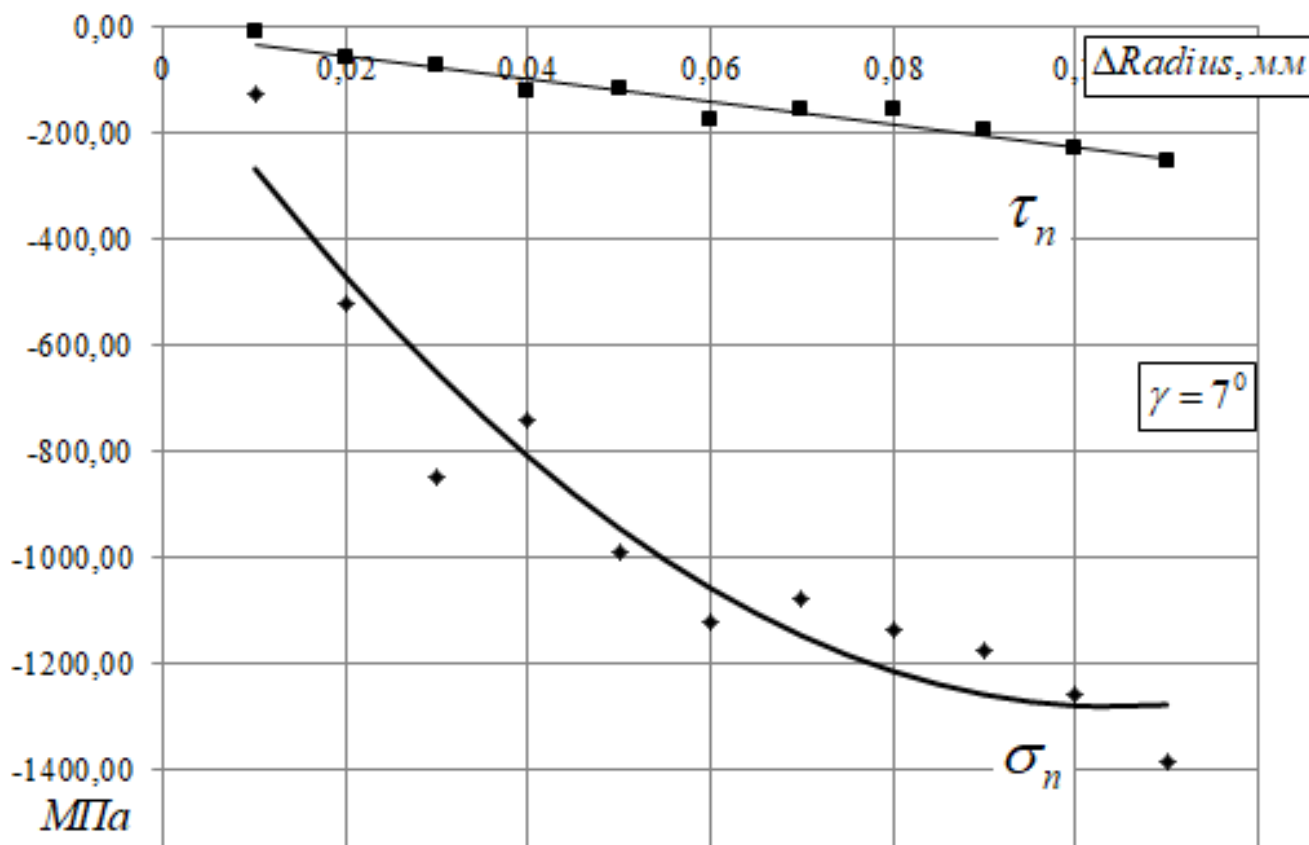


Рисунок 3.16 – Значення максимальних контактних напружень по контуру матриці для процесу редукування з кутом нахилу матриці $\gamma=7^\circ$

3.3.5 Моделювання характеристик напруженого стану в процесі редукування для матеріалів з подібною реологією

Використання в процесі моделювання процесу редукування матеріалу W-Ni-Fe не зводиться лише до розв'язання задачі використання даного матеріалу в конкретному технологічному процесі. Згідно з роботою [72], для матеріалів з подібною реологією, які характеризуються законом зміцнення (2.2), достатньо здійснити перерахунок величин напружень та зусиль, що отримані на модельному

матеріалі (W-Ni-Fe), за формулами [72], які для нашого випадку осесиметричного процесу набувають вигляду

$$\sigma'_{cp} = \sigma_{cp} \frac{\sigma'_i}{\sigma_i} = \sigma_{cp} \frac{A'}{1730^{3,861n'}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (3.7)$$

$$\sigma'_\varphi = \sigma_\varphi \frac{A'}{1730^{3,861n'}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (3.8)$$

$$\sigma'_z = \sigma_z \frac{\sigma'_i}{\sigma_i} = \sigma_z \frac{A'}{1730^{3,861n'}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (3.9)$$

$$\sigma'_r = \sigma_\rho \frac{A'}{1730^{3,861n'}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (3.10)$$

$$\tau'_{rz} = \tau'_{zr} = \tau_{rz} \frac{A'}{1730^{(3,861n')}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (3.11)$$

$$\sigma'_n = \sigma_n \frac{\sigma'_i}{\sigma_i} = \sigma_n \frac{A'}{1730^{(3,861n')}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (3.12)$$

$$\tau'_n = \tau_n \frac{A'}{1730^{(3,861n')}} \sigma_i^{(3,861n'-1)}; \quad (3.13)$$

$$F' = F_1 \frac{A'}{A_1} \left[\frac{F_2 A_1}{F_1 A_2} \right]^{\frac{n'-n_1}{n_2-n_1}}. \quad (3.14)$$

$$\tau_{\rho\theta} = \tau_{\theta\rho} = \tau_{z\theta} = \tau_{\theta z} = 0, \quad (3.15)$$

де σ_i – інтенсивність напружень модельного матеріалу W-Ni-Fe, σ'_i – інтенсивність напружень натурального матеріалу, ε_i – інтенсивність деформацій, A' та n' – коефіцієнти апроксимації для натурального матеріалу, σ_{cp} – середнє напруження в процесі для модельного матеріалу W-Ni-Fe, σ'_{cp} – середнє напруження в процесі для натурального матеріалу, σ_φ – нормальні тангенціальні напруження в циліндричній системі координат для модельного матеріалу W-Ni-Fe, σ'_φ – нормальні тангенціальні напруження в циліндричній системі координат для натурального матеріалу, σ_z – нормальні осьові напруження в циліндричній системі координат для матеріалу модельного W-Ni-Fe, σ'_z – нормальні осьові напруження в циліндричній системі координат для натурального матеріалу, σ_r – нормальні радіальні напруження в

циліндричній системі координат для модельного матеріалу W-Ni-Fe, σ'_r – нормальні радіальні напруження в циліндричній системі координат для натурального матеріалу, $\tau'_{rz}, \tau'_{zr}, \tau_{rz}$ – відповідно, дотичні напруження для натурального матеріалу та модельного матеріалу W-Ni-Fe, σ_n – нормальні контактні напруження для матеріалу модельного W-Ni-Fe, σ'_n – нормальні контактні напруження для натурального матеріалу, τ_n – дотичні контактні напруження для модельного матеріалу W-Ni-Fe, τ'_n – дотичні контактні напруження для натурального матеріалу, $\tau_{\rho\theta}, \tau_{\theta\rho}, \tau_{z\theta}, \tau_{\theta z}$ – дотичні напруження в циліндричній системі координат.

Висновки до розділу

1. Показано, що коефіцієнт тертя в межах $0,1 \geq f \geq 0,03$ слабо впливає на деформований стан, при таких значеннях коефіцієнта тертя f величина зони нестационарності процесу є найменшою за інших рівних умов.

2. Зменшення величини кута нахилу робочого конуса інструменту γ в процесі редукування спричиняє зростання коефіцієнта нерівномірності деформацій m , зокрема для обтисків $\delta=0,04$ зменшення кута γ з $\gamma=13^\circ$ до $\gamma=5^\circ$ супроводжується зростанням коефіцієнта нерівномірності від $m=0,2$ до $m=0,5$;

3. Збільшення обтиску δ в процесі редукування спричиняє зростання коефіцієнта нерівномірності деформацій m , зокрема для $\gamma=13^\circ$ збільшення обтиску з $\delta=0,06$ до $\delta=0,12$ супроводжується зростанням коефіцієнта нерівномірності від $m=0,3$ до $m=0,65$;

4. Отримана залежність (3.4), з допомогою якої можна встановити вплив технологічних параметрів процесу (обтиск, кут нахилу матриці) на коефіцієнт нерівномірності деформацій (m): при збільшенні відносного обтиску та (або) зменшенні величини кута нахилу матриці також зростає коефіцієнт нерівномірності, зокрема: при $\gamma = 13^\circ$ матимемо $\delta = 0,06$ та $m = 0,75$; при $\gamma = 13^\circ, \delta = 0,12$ та $m = 0,65$ а також при фіксованому $\delta = 0,04$ матимемо $\gamma = 13^\circ, m = 0,2$; також при $\delta = 0,04$ і $\gamma = 5^\circ m = 0,5$.

5. Встановлено небезпечні області з точки зору руйнування, які характеризуються несприятливими розтягувальними напруженнями (1 – вісь

заготовки при виході з інструменту; 2 – близький до поверхні осередок деформацій). Це дозволило, в подальшому, оцінити використаний ресурс пластичності.

6. Максимальне значення нормальних контактних напружень зі збільшенням обтиску δ від 0,01 до 0,11 зростає від -125 МПа до -1200 МПа і більше, що є необхідною інформацією при виборі відповідних умов змащення для запобігання схоплювання та налипання металу заготовки на інструмент. В подальшому доцільним є вибору раціональної форми інструменту для підвищення його максимальної стійкості.

7. Використання розрахунків за залежностями (3.1–3.6) є основою для отримання оцінки деформовності та технологічної спадковості. Отримані залежності (3.7–3.15) дозволяють здійснити перерахунок необхідних величин для матеріалів з подібною реологією, що поширює сферу застосування отриманих результатів для розрахунку технологічних параметрів процесу редукування заготовки з різних конструкційних матеріалів.

РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ДЕФОРМОВНОСТІ І ЇЇ ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ В ТЕХНОЛОГІЇ РЕДУКУВАННЯ

4.1 Математична модель процесу з застосуванням теорії деформовності

На основі розрахунку напружено-деформованого стану в процесі редукування заготовок, що отриманий в розділі III, представимо шляхи деформування в координатах : накопичена інтенсивність деформацій - безрозмірні показники напруженого стану η , χ , μ_σ . У вказаному просторі $e_i = f(\eta, \chi, \mu_\sigma)$ найбільший інтерес представляють області, в яких шляхи деформування частинок матеріалу $e_i = f(\eta, \chi, \mu_\sigma)$ найбільш близько наближаються до діаграм пластичності. Ці області являються небезпечними з точки зору ймовірності руйнування матеріалу заготовок. Шляхи деформування частинок матеріалу показані в просторі $e_i = f(\eta)$ для різних обтисків при редукуванні заготовок (див. рис. 4.1, 4.3, 4.6).

Як видно з попередніх результатів небезпечною зоною являється вісь симетрії заготовки при виході з матриці. В цій зоні шляхи деформування мають досить складний вигляд. Так, при зростанні деформацій показник η змінюється в широких межах. Можна припустити, що на накопичення пошкоджень та їх заліковування впливає швидкість зміни показника напруженого стану. В роботі [51] показано, що на накопичення пошкоджень та їх заліковування впливає не тільки степінь деформацій та показник напруженого стану, але і швидкість зміни показника напруженого стану. В нашому випадку очевидно, що вид кривих $e_i = f(\eta)$ може мати вплив на величину використаного ресурсу пластичності при редукуванні. Виникає питання про застосування сучасних феноменологічних критеріїв деформування для оцінки використаного ресурсу пластичності в процесі редукування заготовок з різними технологічними параметрами. З цією метою здійснено обробку та аналіз експериментальних даних роботи [51], що присвячена пластичності циліндричних зразків з сталей P9, P12, P18 підданих одночасному крученню та

розтягу при змінному гідростатичному тиску. У вказаній роботі реалізовані різні траєкторії деформування $\eta = \eta(e_i)$, $\eta = const$, $\chi = const$, $\chi = \chi(e_i)$.

Результати викладеного вище аналізу експериментальних даних вказують на помітний вплив швидкості зміни показника напруженого стану у вигляді параметра $\frac{d\eta}{de_i}$, якщо $\frac{d\eta}{de_i}$ зростає, збільшується вплив історії деформування на величину граничних деформацій (e_p фактична вище в порівнянні з величиною e_p визначеною по діаграмі пластичності). У разі зміни знака похідної $\frac{d\eta}{de_i} < 0$ пластичність падає (в порівнянні з величиною e_p визначеною по діаграмі пластичності). Зауважимо, однак, що функція $\eta = \eta(e_i)$ включає в себе змінність двох параметрів - показника η і кривизну траєкторії деформації $H = 1/\rho$ (по термінології А. А. Ільюшина). З тим, щоб виділити вплив кожного параметра в роботі [51] отримано залежності кривизни траєкторії деформацій $\gamma = \gamma(e_z)$ від осьової деформації e_z для зразків, що деформуються в умовах складної деформації $\eta = 2,86e_i$, $\eta = \sqrt{e_i}$, $\eta = e_i^2$, $\eta = 1,4e_i$. При зазначених траєкторіях кривизни траєкторія деформації змінюється від $H = 8$ до $H = 0,5$. Величина граничних деформацій (див. рис. 3.7) слабо залежить від кривизни H траєкторії деформацій. При цьому показник η змінюється практично однаково для шляхів деформування $\eta = 2,86e_i$, $\eta = \sqrt{e_i}$. Збіг фактичних деформацій при руйнуванні зразків $\eta = \sqrt{e_i}$ і $\eta = 2,86e_i$, а також зразків $\eta = e_i^2$ і $\eta = 1,4e_i$ дозволяють припустити, що на пластичність основний вплив має швидкість зміни показника η , а не кривизна траєкторії деформацій. Цей висновок можна віднести до траєкторій малої або середньої кривизни.

Головна перевага задання траєкторій навантаження в просторі безрозмірних показників напруженого стану полягає в тому, що в цьому випадку вид «шляху деформування» однозначно визначається умовами формозміни, характерними для заданого процесу і практично не залежать від механічних властивостей матеріалу [51]. Це дозволяє моделювати процеси обробки тиском на модельних ма-

теріалах, в цьому випадку необхідно мати криві течії $\sigma_i = \eta(e_i)$ і діаграми пластичності $e_p = f(\eta, \chi, \mu_\sigma)$ [27].

В роботі [51] введений коефіцієнт ω , що відображають вплив швидкості зміни показника напруженого стану на пластичність:

$$\omega = \frac{e_p(\eta)}{e_p(\eta = const)} \cdot \quad (4.1)$$

У формулі (4.1) $e_p(\eta)$ розраховують за критеріями, або $e_p(\eta)$ - відображає фактичну деформацію в момент руйнування; $e_p(\eta = const)$ знаходять з діаграми пластичності в місці перетину діаграми пластичності з шляхом деформування. Таким чином, коефіцієнт ω відображає вплив історії деформування на пластичність.

Розрахунок граничних деформацій за критеріями (1.9), (1.10), і (1.12) показав, що якщо параметр $\frac{d\eta}{de_i}$ зростає, то зростає відхилення фактичних деформацій в момент руйнування від розрахункових за різними критеріями. Так, якщо $\frac{d\eta}{de_i}$ близький до нуля всі критерії дають однаковий результат, відхилення від фактичних деформацій знаходяться в межах статистичної похибки, при $\frac{d\eta}{de_i} > 2$ вплив історії деформування на пластичність досягає 23%, при цьому кривизна траєкторії деформації $\frac{d^2\eta}{de_i^2}$ має подібний вплив - з ростом кривизни зростає вплив історії деформування на пластичність, в разі, якщо $\frac{d\eta}{de_i} > 5$ найбільш близькі результати розрахунку до експериментальних дає критерій (1.12). Критерій (1.10) показує відхилення до 25%, критерій (1.9) до 30%.

4.2 Деформовність циліндричних заготовок в процесі їх редукування

Для оцінки деформовності заготовок в процесі їх редукування, спираючись на аналіз можливості використання феноменологічних критеріїв деформовності, які були викладені в підпункті 1.3.3, розглянемо механіку процесу редукування з точки зору моделі руйнування, викладеної в пункті 4.1.

В III розділі дисертації досліджено питання напружено-деформованого стану та механіки процесу редукування з точки зору деформованого стану та характеру його зміни в заготовках на різних стадіях деформування. В моделі показано наявність трьох характерних зон, для яких отримано залежності параметрів деформованого стану.

На основі отриманих результатів моделювання видно, що зміна кута нахилу інструменту спричиняє значний вплив на механіку процесу редукування. Збільшення величини відносного натягу може викликати тріщину на вісі симетрії заготовки, в місці її виходу з інструменту.

Використовуючи результати попередніх комп'ютерних розрахунків побудуємо шляхи деформування, які представлені у вигляді залежності зміни накопиченої інтенсивності деформацій від показника жорсткості напруженого стану

Характерною особливістю процесу редукування являється те, що для типових ділянок деформованої заготовки властиві різні види шляхів деформування. Тому, для визначення ресурсу в процесі редукування, необхідно застосовувати різні деформаційні критерії, вибір яких обумовлений нами в статті [4].

Для зони 1 (рис. 4.1) характерним є просте навантаження, тому розрахунок використаного ресурсу пластичності (табл. 4.1) здійснюється, використовуючи критерій (1.9), записаний у вигляді:

$$\psi = \frac{e_i(\delta, \gamma)}{e_p(\eta_k)} \leq 1, \quad (4.2)$$

де δ - відносний натяг, γ - кут нахилу матричного отвору, η_k - показник напруженого стану в небезпечній області заготовки, e_i - інтенсивність деформацій, $e_p(\eta_k)$ - накопичена ступінь деформації до моменту руйнування.

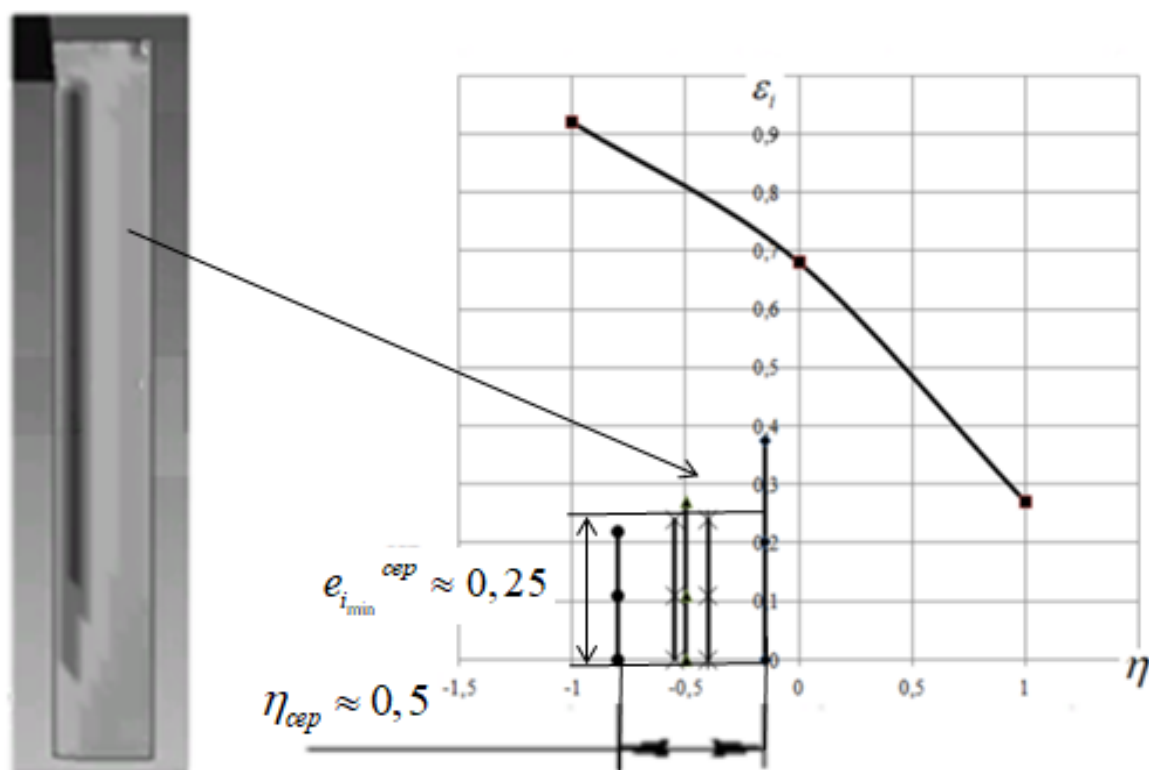


Рисунок 4.1 - Шляхи деформування, що характерні для вісі заготовки при фіксованому натягові заготовок із сплаву W-Ni-Fe при різних значеннях кута нахилу матриці

Таблиця 4.1 – Значення ресурсу пластичності для зони 1

$\delta = 0,1$		$\delta = 0,07$		$\delta = 0,04$	
γ , град	ψ	γ , град	ψ	γ , град	ψ
7	0,257	3	0,115	3	0,104
9	0,314	5	0,168	5	0,164
11	0,301	7	0,213	7	0,215
13	0,343	9	0,245	9	0,263
15	0,528	11	0,301	11	0,308
		13	0,367	13	0,34
		15	0,447	15	0,371

Розрахунок накопиченої інтенсивності деформацій (\bar{e}_i) проводиться за допомогою співвідношення:

$$\bar{e}_i = 2 \ln \frac{D}{d} m, \quad (4.3)$$

де d - внутрішній діаметр матриці, D - зовнішній діаметр заготовки, m - коефіцієнт нерівномірності деформацій [25].

Залежність $e_p(\eta_k)$ в критерії (4.2) апроксимована за допомогою експериментальних точок $e_p(\eta = 1), e_p(\eta = 0), e_p(\eta = -1)$ [60].

Для апроксимації ділянки діаграми пластичності $-1 \leq \eta \leq 0$ використана формула (2.8), для ділянки діаграми пластичності (див. рис. 2.8) $0 \leq \eta \leq 1$ використана формула (2.9).

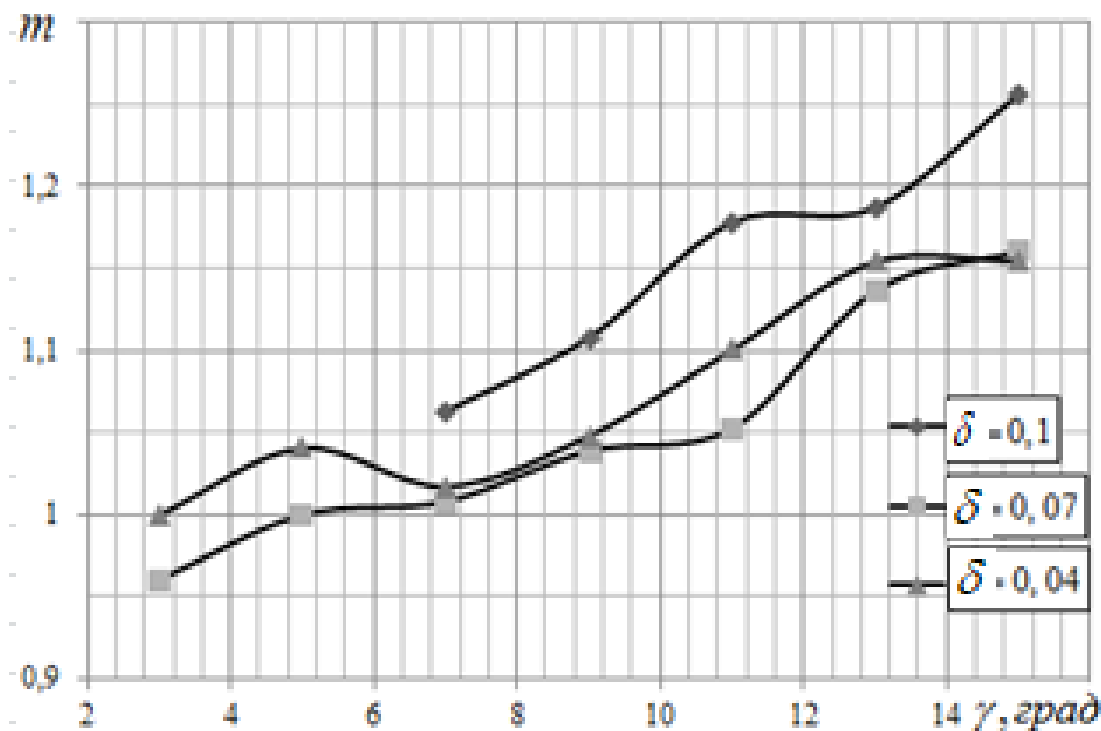


Рисунок 4.2 - Залежність коефіцієнта нерівномірності деформацій m від кута нахилу матриці

Для зони 2 (рис. 4.3) характерне складне навантаження з суттєвою кривиною шляхів деформування та нелінійним накопиченням пошкоджень, тому розрахунок

використаного ресурсу пластичності (табл. 4.2) здійснено, використовуючи критерій (1.10).

На основі регресійного аналізу отримано, що шляхи деформування матеріалу в зоні 2 мають вигляд:

$$\eta = H(e_i)^2 + G(e_i) + S. \quad (4.4)$$

де, коефіцієнти H , G , S визначаються з виразів: $H = \frac{8}{(e_{i_{max}})^2}$; $G = -\frac{8}{e_{i_{max}}}$; $S = -1$.

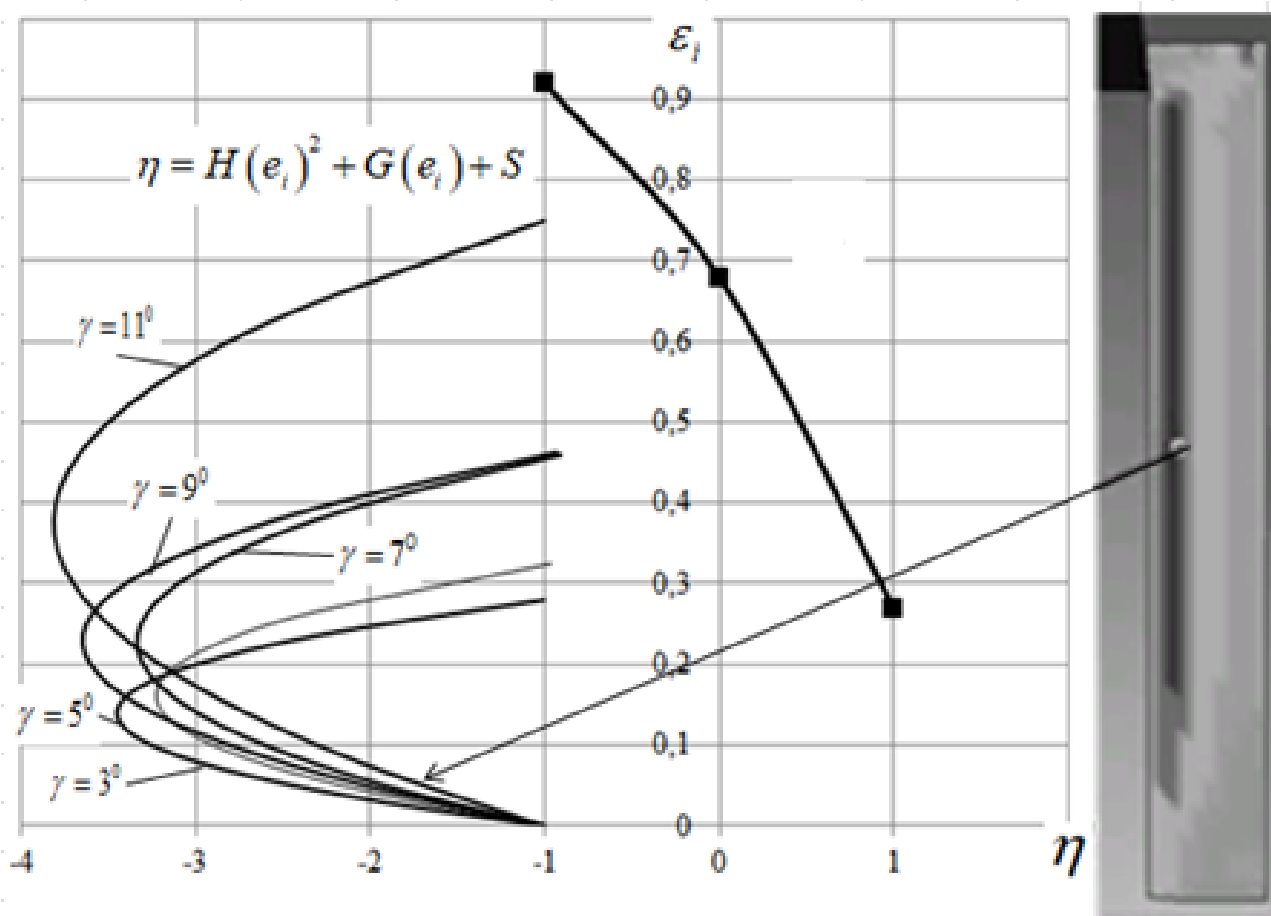


Рисунок 4.3 - Шляхи деформування, що характерні для осередка деформацій заготовки при фіксованому натягові заготовок із сплаву W-Ni-Fe при різних значеннях кута нахилу матриці

Оскільки шлях деформування $\eta(e_i)$ залежить від $e_{i_{max}}$, то залежність розрахунку використаного ресурсу пластичності за формулою (4.2) для певного матеріалу може бути представлений у вигляді графіка $e_i(\psi)$, що є зручним для наоч-

ного сприйняття відповідних розрахунків. Для сплаву системи W-Ni-Fe при $e_p(\eta = 1)$, $e_p(\eta = 0)$, $e_p(\eta = -1)$ результати представлені на рисунку 4.4.

Таблиця 4.2 - Розрахунок використаного ресурсу пластичності для зони 2

$\delta = 0,1(\eta = -1)$				$\delta = 0,07(\eta = 0)$				$\delta = 0,04(\eta = 1)$			
$\gamma,^0$	Ψ			$\gamma,^0$	Ψ			$\gamma,^0$	Ψ		
	В.А.Огородніков	Г.А.Смирнов-Аляєв	В.Л.Колмогоров		В.А.Огородніков	Г.А.Смирнов-Аляєв	В.Л.Колмогоров		В.А.Огородніков	Г.А.Смирнов-Аляєв	В.Л.Колмогоров
3				3	0,177	0,17	0,108	3	0,12	0,085	0,067
5				5	0,203	0,209	0,136	5	0,173	0,163	0,115
7	0,286	0,304	0,196	7	0,246	0,242	0,169	7	0,231	0,22	0,151
9	0,325	0,338	0,231	9	0,284	0,3	0,2	9	0,334	0,432	0,25
11	0,416	0,514	0,312	11	0,419	0,441	0,316	11	0,399	0,439	0,304
13	0,433	0,514	0,329	13	0,484	0,574	0,371	13	0,494	0,515	0,381
15	0,649	0,815	0,499	15	0,618	0,717	0,483	15	0,571	0,659	0,444

Для матеріалів з довільними фізико-механічними властивостями, для яких відома діаграма пластичності представимо у вигляді спрощеної залежності критерію Г.А. Смірнова-Аляєва (1.9):

$$\psi = \frac{e_i(\delta, \gamma)}{e_p(\eta_k)} \omega \leq 1, \quad (4.5)$$

де ω – коефіцієнт впливу кута нахилу матриці на шляхи деформування точок заготовки, що враховує вплив історії деформування (рис. 4.5).

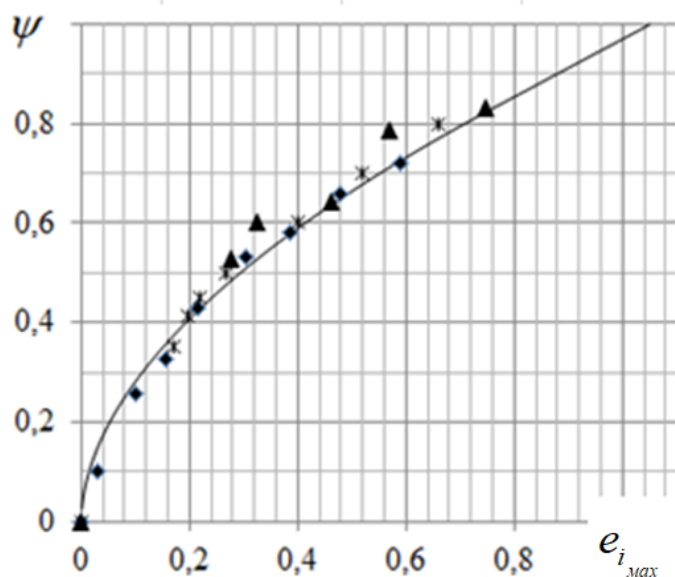


Рисунок 4.4 - Графік залежності використаного ресурсу пластичності ψ від максимальної інтенсивності деформацій $e_{i,max}$ (\blacktriangle - процеси редукування при $\delta = 0,1$, $*$ - процеси редукування при $\delta = 0,07$, \blacklozenge - процеси редукування при $\delta = 0,04$) для сплаву W-Ni-Fe.

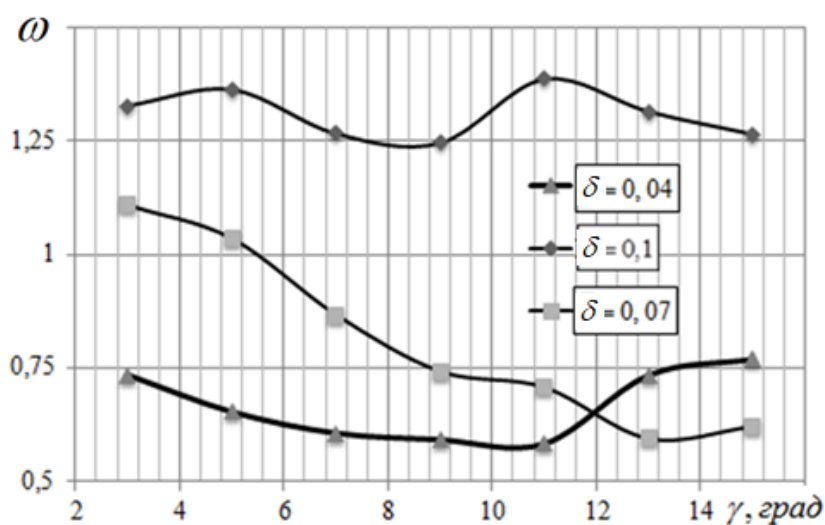


Рисунок 4.5 - Залежність коефіцієнта впливу історії деформування ω від кута нахилу матриці

Для зони 3 регресійний аналіз показав, що шлях деформування (див. рис. 4.6) має вигляд $e_i = W + T\eta$, де W і T, - коефіцієнти, що залежать від кута нахилу матриці γ та обтиску δ зображені на рис. 4.7

Представимо шлях деформування (рис. 4.6) у вигляді: $\eta = U \cdot e_i + I$,

де коефіцієнт $I = -2,5$, а $U = \frac{3,2}{e_{i,3}}$. Він є більш зручним для подальшого викорис-

тання.

Як видно, для зони 3 (див. рис. 4.6) характерне складне деформування з малою кривиною шляху деформування, тому розрахунок використаного ресурсу пластичності здійснено, використовуючи критерій В.Л. Колмогорова (див. формулу 1.8).

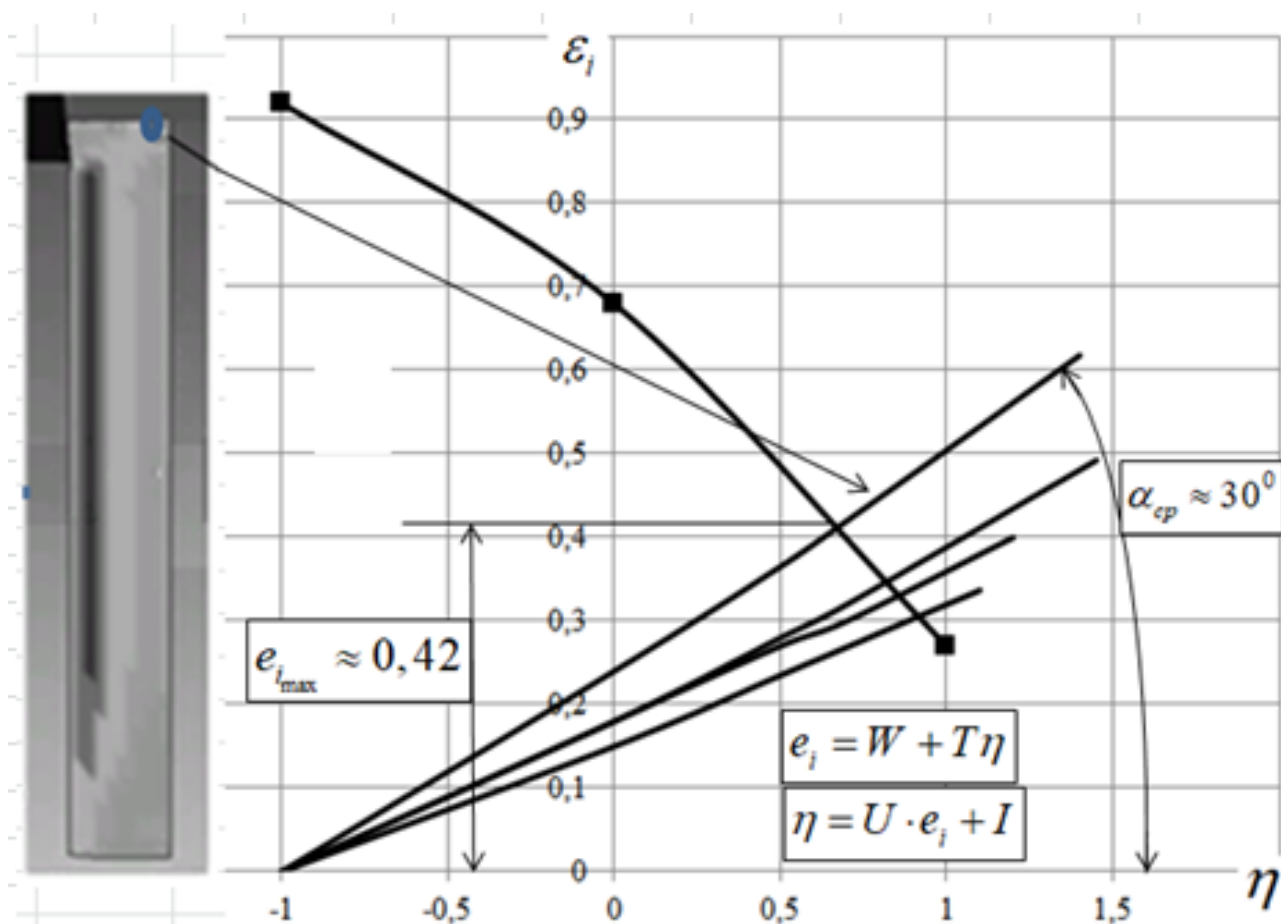


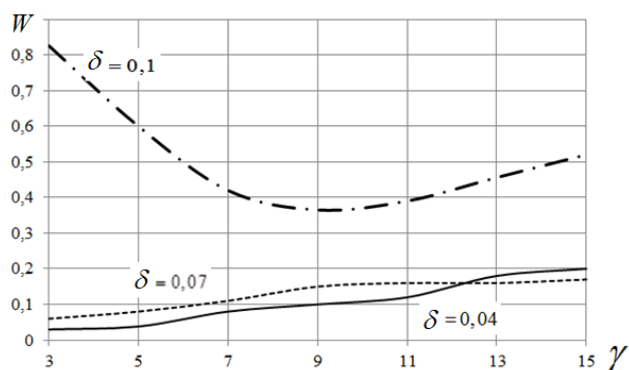
Рисунок 4.6 - Шляхи деформування, що характерні для небезпечної точки заготовки при фіксованому натягові заготовок із сплаву W-Ni-Fe при різних значеннях кута нахилу матриці

Таблиця 4.3 - Розрахунок використаного ресурсу пластичності для зони 3

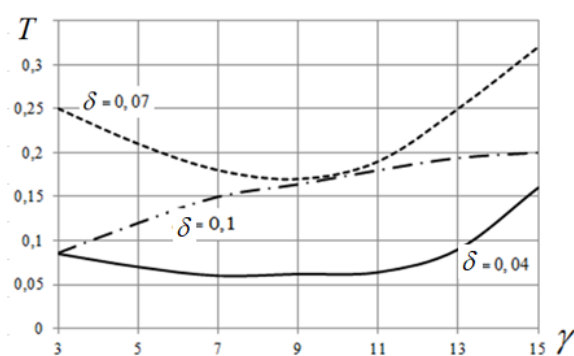
$\delta = 0,1(\eta=-1)$					$\delta = 0,07(\eta =0)$					$\delta = 0,04(\eta =1)$				
γ	Ψ			$\Delta\Psi$	γ	Ψ			$\Delta\Psi$	γ	Ψ			$\Delta\Psi$
	В.А.Огородніков	Г.А.Смирнов-Аляєв	В.Л.Колмогоров			В.А.Огородніков	Г.А.Смирнов-Аляєв	В.Л.Колмогоров			В.А.Огородніков	Г.А.Смирнов-Аляєв	В.Л.Колмогоров	
3	0,592	2,488	0,527	10%..∞	3	0,353	0,437	0,394	12..24%	3	0,257	0,231	0,314	10..22%
5	0,444	1,384	0,464	4%..∞	5	0,415	0,457	0,441	6..10%	5	0,326	0,176	0,382	17..46%
7	0,696	0,798	0,686	1..15%	7	0,538	0,475	0,547	2..12%	7	0,428	0,294	0,484	13..31%
9	0,633	1,403	0,642	1,4.. ∞	9	0,674	0,496	0,667	1..26,4	9	0,573	0,338	0,603	5..41%
11	0,641	0,743	0,649	1..16%	11	0,902	0,588	0,83	8..35%	11	0,545	0,382	0,582	7..30%
13	0,786	1,661	0,761	3%... ∞	13	1,494	0,724	1,216	19..52%	13	0,835	0,441	0,808	3..47%
15	0,83	1,029	0,813	2..24%	15	1,859	0,909	1,461	21..51%	15	0,576	0,476	0,618	7..17%

Для отримання інженерної залежності виразимо діаметр калібруючого отвору матриці за допомогою формули (1.10). В результаті отримаємо:

$$d \geq \frac{D}{\exp \left[\frac{e_p^{(\eta=-1)} e_p^{(\eta=0)} \exp(-\eta)}{e_p^{(\eta=-1)} + \eta [e_p^{(\eta=-1)} - 2,72 e_p^{(\eta=0)}]} \right]} \frac{m}{2\omega} \quad (4.6)$$



Коефіцієнт W



Коефіцієнт T

Рисунок 4.7 - Залежність коефіцієнтів W і T від кута нахилу матриці γ

У вказаній формулі враховані механічні властивості матеріалу (діаграма пластичності $e_p = f(\eta)$); історія деформування, вплив якої врахований у вигляді коефіцієнта ω ; вплив нерівномірності деформацій враховано у вигляді коефіцієнта нерівномірності деформацій m).

Характерною особливістю процесу редукування є те, що шляхи деформування лежать в межах зміни показника напруженого стану: $1,5 \geq \eta \geq -4$. Встановлено, що в окремих точках заготовки (рис. 4.3 та 4.5) реалізуються прості й лінійні шляхи деформування - $\chi=0, d\eta/ de_i=0, d^2\eta/ de_i^2=0$; $\chi=0, d\eta/ de_i \neq 0, d^2\eta/ de_i^2=0$. Отже, для оцінки деформовності для цих точок слід використовувати найпростіші деформаційні критерії (4.3, 4.9) на основі яких розроблені інженерні залежності щодо визначення граничних величин технологічних параметрів (δ, γ) в залежності від фізико-механічних характеристик матеріалу та вихідних геометричних розмірів. Шляхи деформування в осередку деформації по об'єму заготовки характеризуються значною кривиною ($d^2\eta/ de_i^2$), і досягає значень $4 \geq d^2\eta/ de_i^2 \geq 0,5$, а також величиною першої похідної ($d\eta/ de_i$), що суттєво змінюється в процесі деформування $12 \geq d\eta/ de_i \geq -12$, при цьому ці шляхи лежать у від'ємній області показника напруженого стану η , при наявності третього інваріанту тензора напружень, що відмінний від нуля ($\chi \neq 0$). В результаті, для розрахунку розподілу використаного ресурсу пластичності ψ та технологічної спадковості необхідно застосовувати модифікований деформаційний критерій Огороднікова В.А. (1.10), що враховує вищезгадані чинники. Розроблено розрахунковий апарат, що дає можливість встановити гранично допустимі технологічні параметри при редуванні заготовок з ізотропних матеріалів із заданими фізико-механічними властивостями, що характеризуються діаграмою пластичності та кривою зміцнення. В методиці розрахунків враховано вплив історії деформування та градієнта деформацій, що забезпечує точність відповідних розрахунків з похибкою до 5-7%, неврахування історії деформування дає похибку майже 40%.

4.3 Практичне використання результатів дослідження

4.3.1 Технологічне оснащення: пристрій для редукування сплаву типу W-Ni-Fe

В рамках співпраці з Інститутом Надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України проводили експериментальні дослідження деформаційного зміцнення зразків (два етапи). На першому етапі прошовхували зразок через матрицю (рис.4.8) та перевіряли його на наявність ознак руйнування. Для проредукованих зразків досліджувалось зміцнення зразка, рівномірність в поперечному перерізі та структурні зміни.

На другому етапі зразки збільшеної довжини послідовно прошовхувались через декілька матриць. Досягнутий рівень деформацій значно перевищував отримані на першому етапі досліджень. Технологічне оснащення, що використовувалось на першому етапі приведено на рисунку 4.10 та його схема на рисунку 4.9.

В конструкцію пристосування входить матриця 1 (сплав ВК15 або ВК20) запресована в обойму 2. Використання обойми підвищує точність встановлення матриці, а також збільшує термін її використання. Для забезпечення стійкості зразка та штовхача 3 використані напрямні 4 і 5. Обойма 2 встановлюється на опору 6.

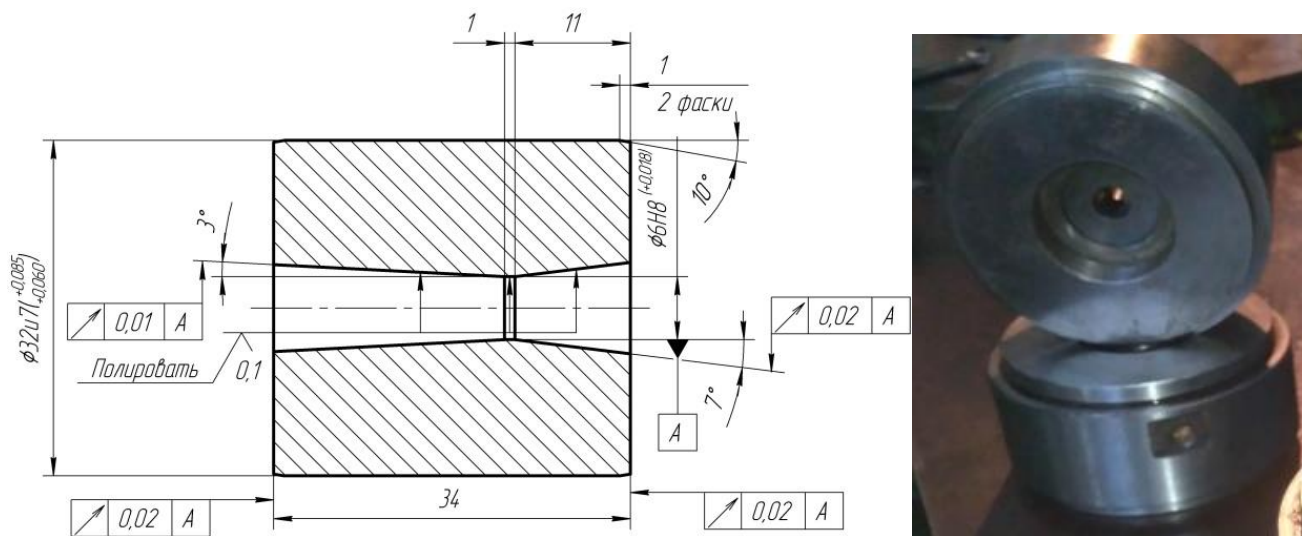


Рисунок 4.8 - Матриця твердосплавна експериментальна

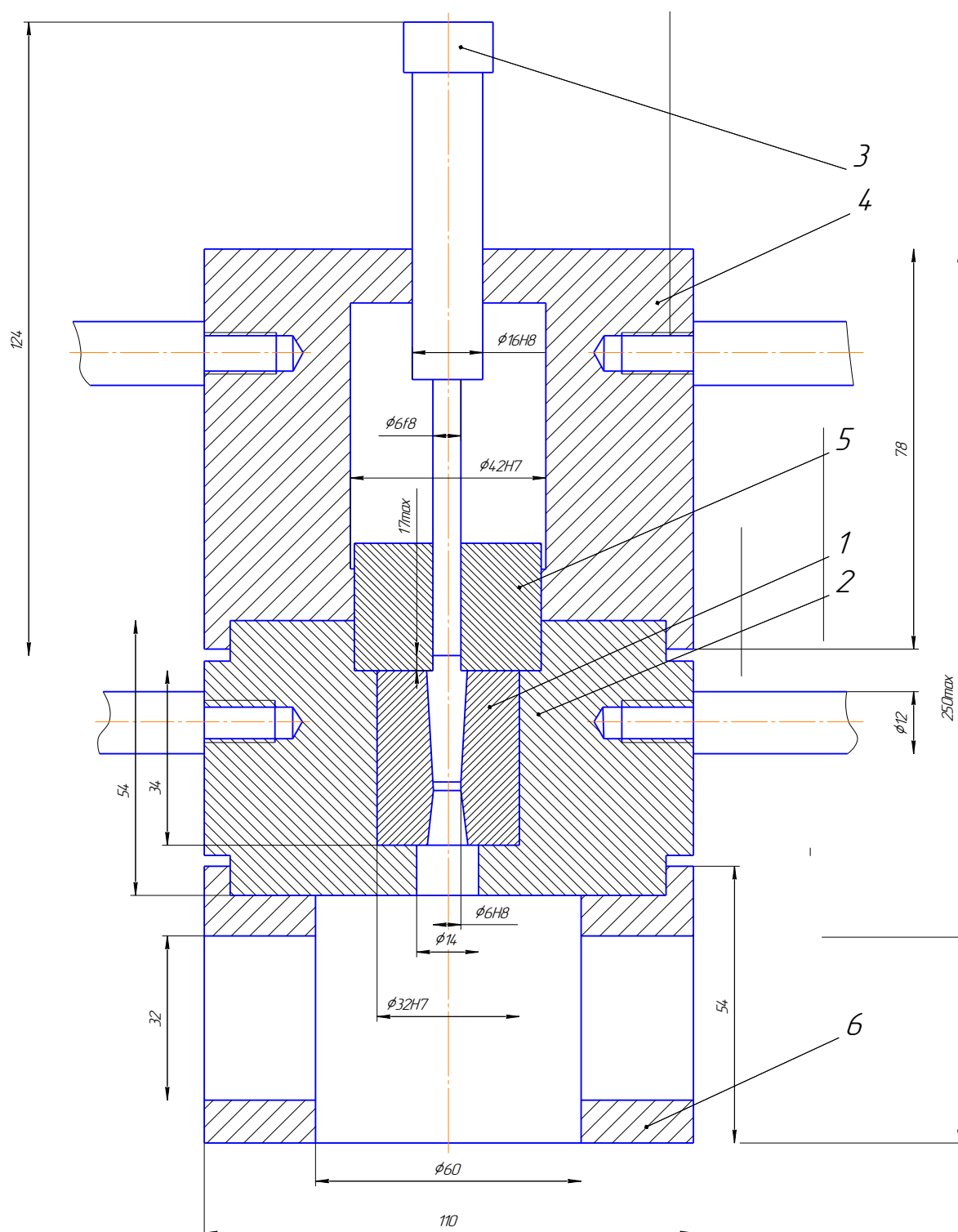


Рисунок 4.9 -Схема оснащення для редукування зразків зі сплаву типу W-Ni-Fe

Робочим елементом пристосування є матриця, робоча конічна поверхня якої нахилена відносно вісі на кути 7° та 3° (рис.4.8). Розташування матриці в обоймі визначає напрямок редукування. Робоча поверхня матриці полірується до шорсткості $Ra=0,1$ мкм.



Рисунок 4.10 - Оснащення для одноциклового редукування зразків зі сплаву типу W-Ni-Fe

4.3.2 Одноциклове редукування циліндричних заготовок з сплаву типу W-Ni-Fe. Технологічна спадковість

Дослідження зміцнення зразків з сплаву W-Ni-Fe здійснено на основі зразків циліндричної форми. Для забезпечення плавного входу зразка в інструмент та уникнення деформацій штовхача використано зразки з фасками 10^0 та 45^0 відповідно (рис. 4.11).

Використано зразки з співвідношенням початкової довжини зразка до діаметра в межах 2,8..3,1 із використанням для змащування суміші дрібнодисперсного графіту та лаку, доведених до твердого стану.

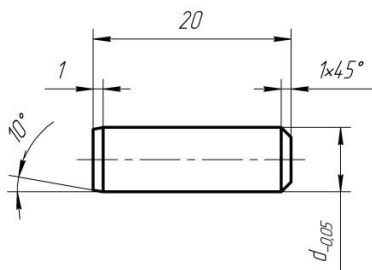


Рисунок 4.11 - Зразок для дослідження зміцнення сплаву W-Ni-Fe

Процес редукування виконувався на пресі ИПП-200 з вимірюванням осьового навантаження на зразок та зміни розмірів. Досліджувались заготовки виготовлені зі сплаву з вмістом вольфраму (W) 89% , а також з вмістом вольфраму (W) 90% для випадків без втрати стійкості (табл. 4.4).

Графічне відображення залежності осьового навантаження від інтенсивності деформації показана на рисунку 4.12.

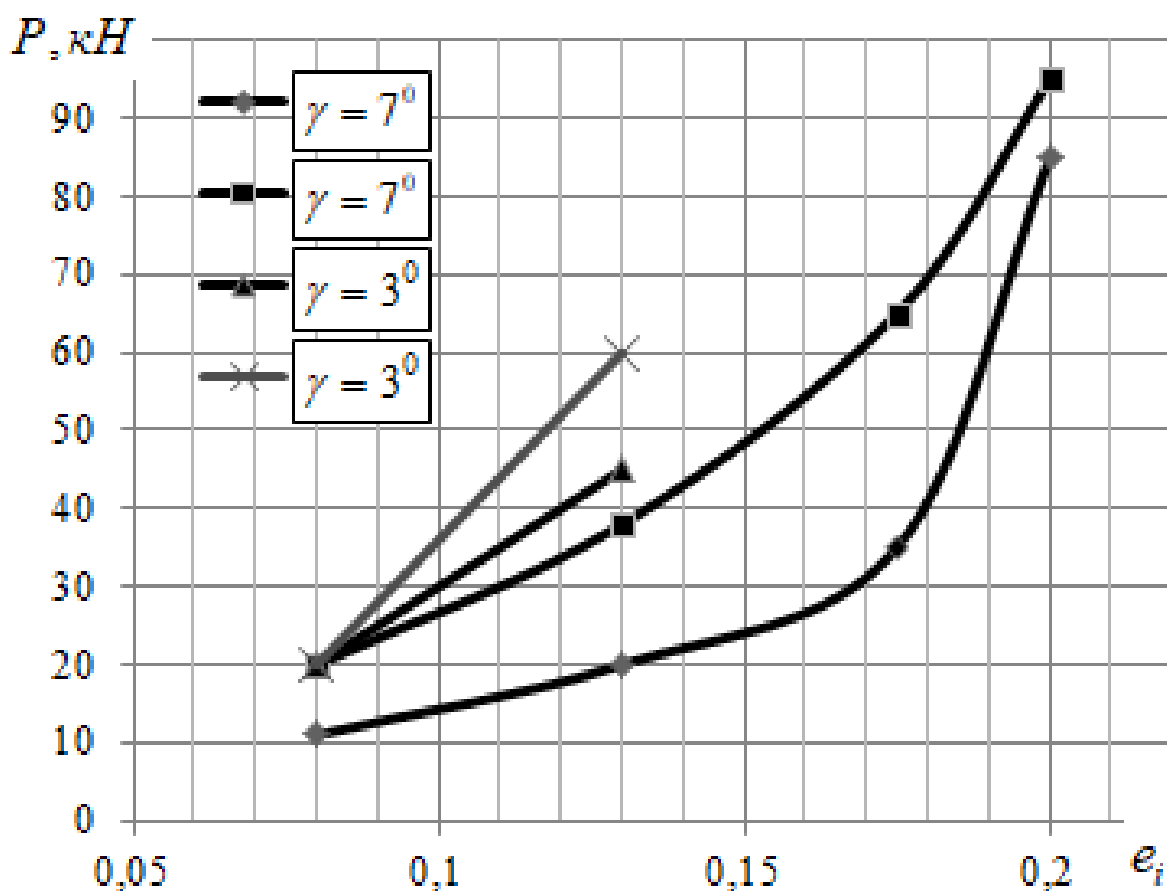


Рисунок 4.12 - Залежність осьової сили від інтенсивності деформацій

Редукування зразків на основі вольфраму (89%) при $\gamma=3^{\circ}$ супроводжувалось зміною осьової сили від 20кН ($\epsilon_i=0,08$) до 60кН ($\epsilon_i=0,13$), після чого зразок втрачав стійкість. Зміна величини кута редукування до $\gamma=7^{\circ}$ супроводжувалась зменшенням осьового навантаження в 1,8 рази. Втрата стійкості зразка спостерігалась при інтенсивності деформацій $\epsilon_i=0,175..0,2$ (величина прикладеного зусилля 65кН). Збільшення кута нахилу матриці γ до 7° супроводжувалось зменшенням площі контакту та сил тертя, що збільшує ресурс інструменту та покращує стійкість зразка.

Слід відмітити, що втраті стійкості передувало потовщення зразка ($\geq 0,2$ мм). Дане потовщення є причиною збільшення осьових навантажень та втрати стійкості. Редукування при $\gamma=7^{\circ}$ характеризується тим, що наплив матеріалу до інструменту менший. Тому вплив даного явища при збільшенні кута редукування зменшується. Використання зразків з вмістом вольфраму 90% характеризується зменшенням зусилль редукування та покращенням стійкості. Втрата стійкості спостерігається при інтенсивності деформацій $\epsilon_i=0,11..0,14$. В результаті реалізація багатоциклового редукування буде можлива за умови використання напрямних для зразків та штовхача, інтенсивність деформацій за перший цикл не повинна перевищувати $\epsilon_i=0,11$.

Оскільки заготовка та інструмент в процесі редукування пружно деформуються, то кінцевий діаметр виробу буде дещо більший за прохідний діаметр інструменту. Дану особливість слід враховувати при забезпеченні розмірів виробу.

Дослідження показали, що при однакових обтисках та різних кутах нахилу робочого конуса інструменту пружні деформації зразка (діаметр) більші при більших кутах γ (розміри можуть бути більші на 0,04-0,08 мм). Збільшення деформацій зразка супроводжується збільшенням пружних деформацій зразка. При цьому товщина шару змащення складає в середньому 0,015 мм і не врахована в зміну діаметра.

Здійснено перевірку зразків на наявність пор. На спеціальному обладнанні був вимірний об'єм до та після редукування. Зміна об'єму зразка виявлена не була, зразок є суцільним тілом. Незмінність об'єму зразка в процесі редукування

спричиняє його видовження. Зразок довжиною 20мм при інтенсивності деформацій $\epsilon_i=0,16$ збільшує свою довжину на 40% (8мм). При багатоцикловому редукуванні зразок може збільшувати свою довжину майже в два рази, що слід враховувати при виготовленні напрямних втулок та для досягнення необхідних розмірів виробу. Для редукованих зразків в матрицях з $\gamma=7^\circ$ та $\gamma=3^\circ$ здійснено заміри твердості в поперечному перерізі: відстань між уколами алмазної пірамідки - 1мм, зусилля на пірамідку - 30кг (рис. 4.13). Зміцнення сплаву W-Ni-Fe (W=89%) відповідає розробленій карті матеріалу. Середня твердість недеформованих зразків становить 304МПа (вміст W=89%) та 328 МПа (вміст W=90%). Коли інтенсивність деформацій досягає $\epsilon_i=0,053$ твердість виробу становить 400МПа (вміст W=89%) та 410-420 МПа (вміст W=90%).

Таблиця 4.4 - Вихідні дані для процесу редукування сплаву типу W-Ni-Fe та інтенсивність деформацій проредукованих заготовок

№ зразка	Кут нахилу робочого конуса α , град	Діаметр зразка, мм	Обтиск, δ	Інтенсивність деформацій, ϵ_i	Примітка
1	3°	6,5	0,08	0,053	
2	7°	6,5	0,08	0,053	
3	3°	6,8	0,13	0,112	
4	7°	6,8	0,13	0,112	
5	3°	7,05	0,175	0,143	Втрата стійкості
6	7°	7,05	0,175	0,143	
7	3°	7,2	0,2	0,164	Втрата стійкості
8	7°	7,2	0,2	0,164	Втрата стійкості

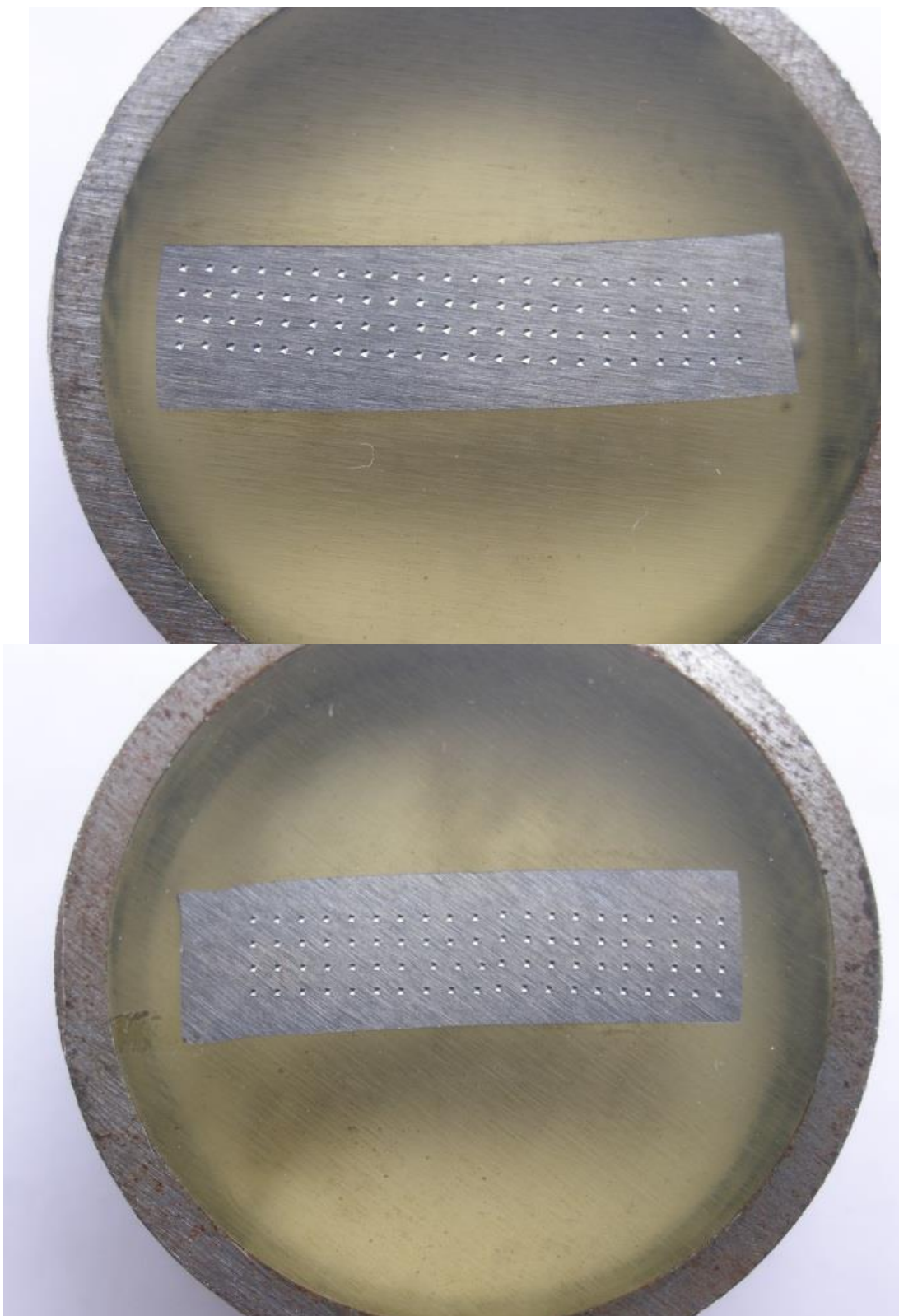
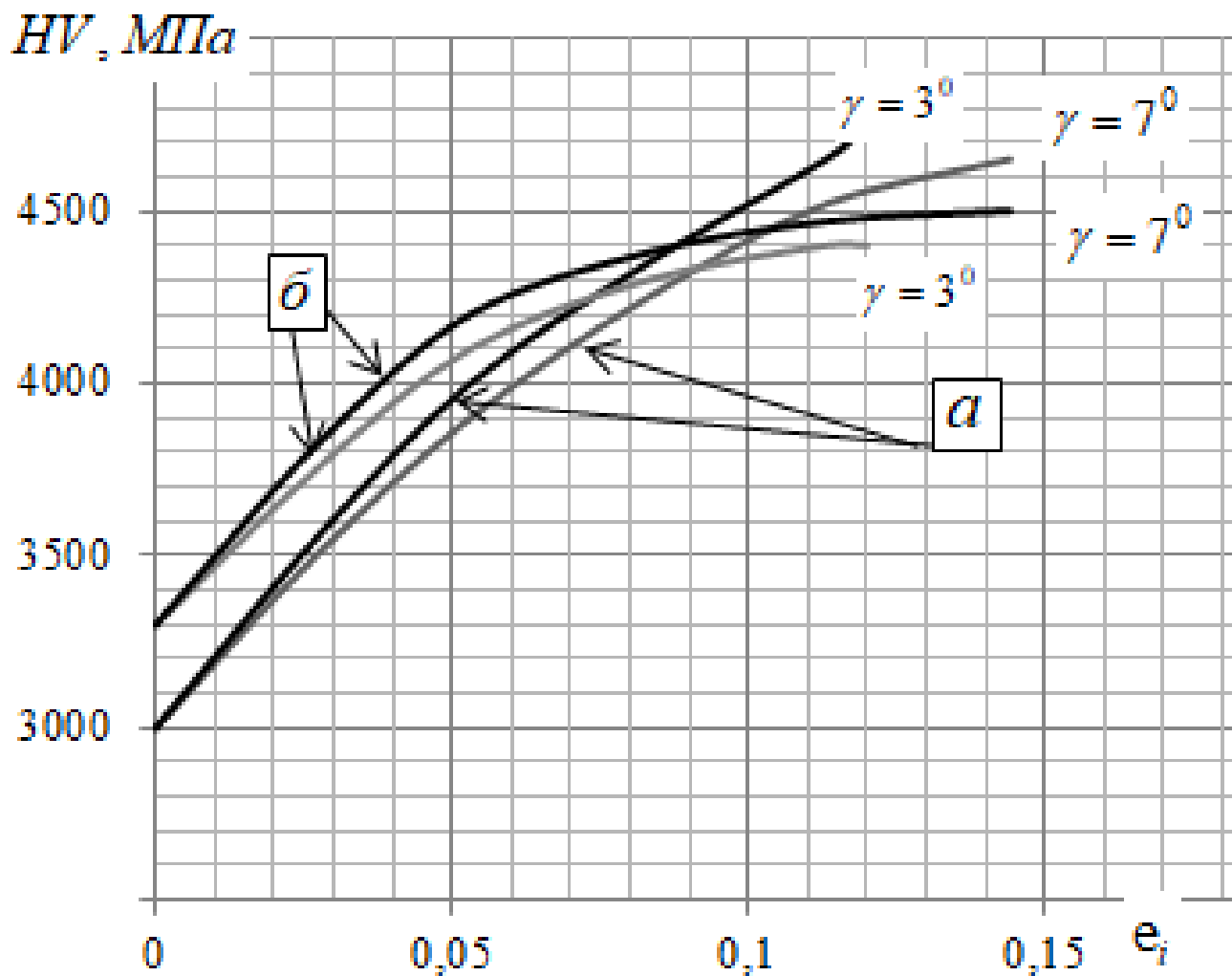


Рисунок 4.13- Дослідження твердості по Вікерсу.

Як виявилось, відмінність початкової твердості сплавів W-Ni-Fe 89%W і 90%W при інтенсивності деформацій $\epsilon_i=0,11$ не спостерігається, твердість обох сплавів становить 430÷440МПа. Як видно з рис. 4.14 втрата стійкості раніше на-

стає для кута нахилу матриці $\gamma=3^\circ$, зміцнення сплаву з 90%W при інтенсивності деформацій вище ніж $\epsilon_i=0,11$ істотно менше ніж сплаву з 89%W. Для більшої наочності розглянемо зміну твердості зразків на основі вольфраму залежно від інтенсивності деформацій (рис. 4.15).

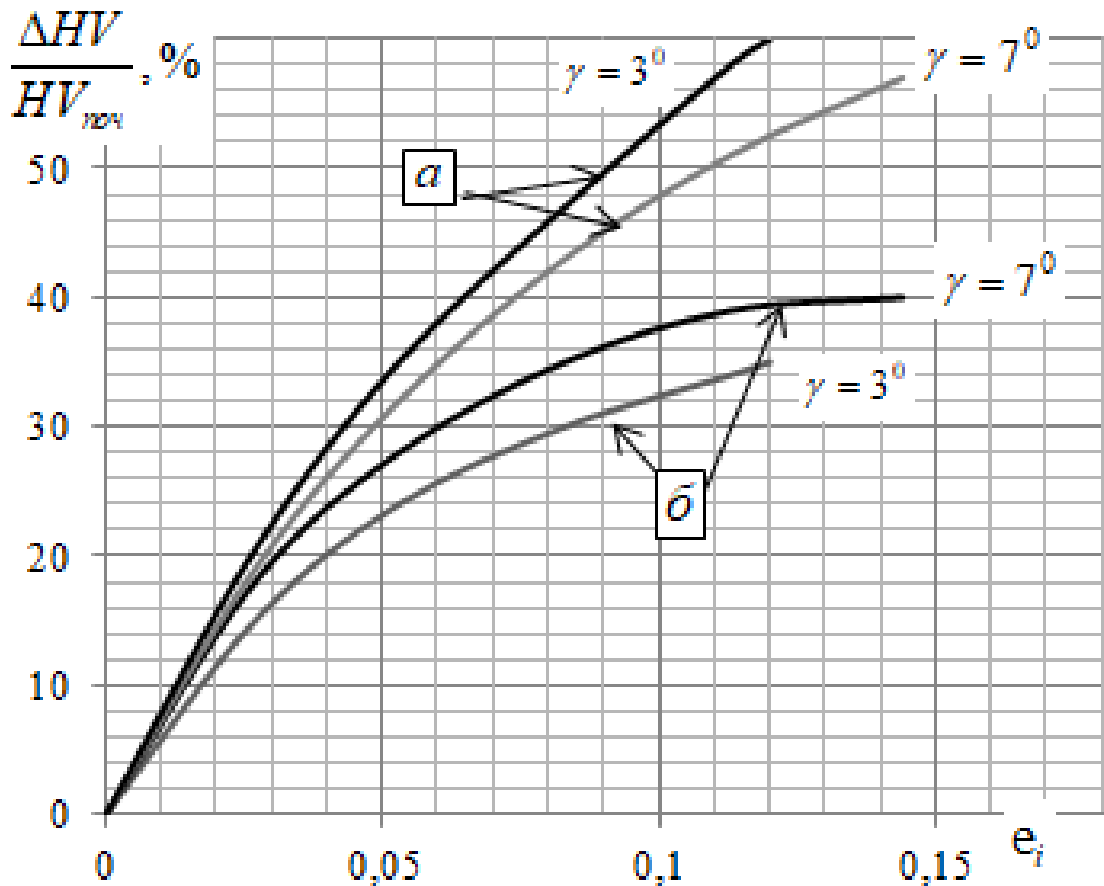


а – 89%W; б – 90%W

Рисунок 4.14 - Залежність твердості матеріалу зразків від інтенсивності деформацій

Зміцнення сплаву б (рис. 4.15) досягає 40%, сплаву а (рис. 4.14) – 60%. На основі отриманих даних можна говорити, що сплав з 89%W більш інтенсивно зміцнюється.

Твердість зразка на основі сплаву W-Ni-Fe (89%W) після втрати стійкості в місці контакту з штовхачем була більше 500МПа, що дозволило стверджувати про можливість зміцнення сплаву в більш широких межах.



а – 89%W; б – 90%W

Рисунок 4.15 – Зміна твердості зразків в залежності від інтенсивності деформацій:

Зауважимо, що під час деформаційного зміцнення заготовок в мікроструктурі матеріалу заготовок також відбуваються певні зміни. Для відображення цих змін на рисунку 4.16 наведено фото з відбитками алмазної піраміди на недеформованому зразку (рис. 4.16б) та при інтенсивностях деформацій $\epsilon_i=0,053$ (рис. 4.16в), $\epsilon_i=0,11$ (рис. 4.16г), $\epsilon_i=0,14$ (рис. 4.16д), $\epsilon_i=0,16$ (рис. 4.16е). Спостерігається зміна твердості, формування волокнистості ($\epsilon_i=0,11$), укрупнення частинок вольфраму ($\epsilon_i=0,14$), закінчення формування волокнистості ($\epsilon_i=0,16$).

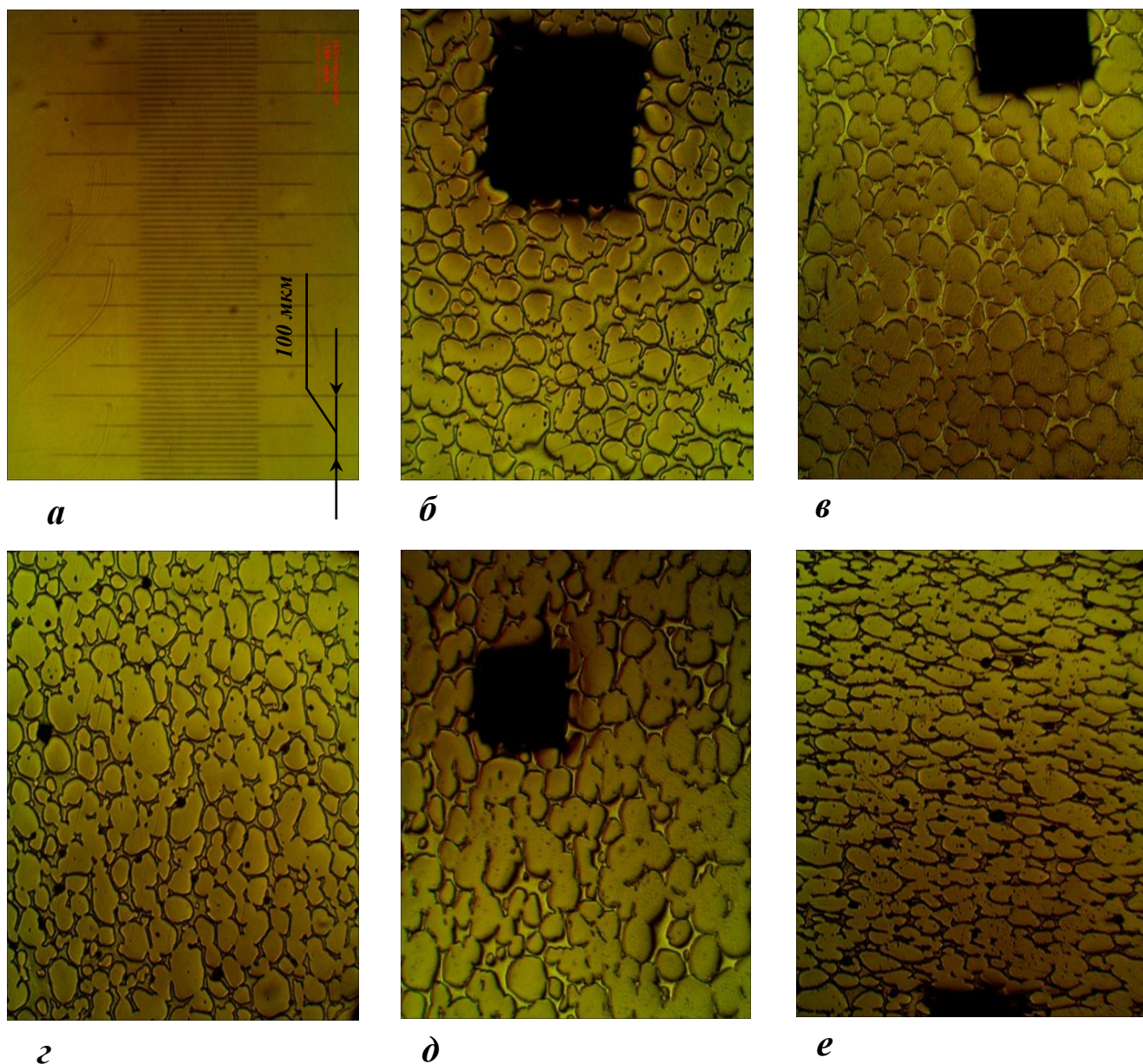


Рисунок 4.16 – Формування волокнистості сплаву W-Ni-Fe

4.3.3 Багатоциклове редукування зразків з сплаву типу W-Ni-Fe. Технологічна спадковість

Для забезпечення необхідних ступенів зміцнення та механічних характеристик слід досягти сумарної деформації 50% та більше (інтенсивність деформацій $\epsilon_i \geq 0,28$). Досягнення відповідних результатів можливе при використанні багатоступінчастого редукування.

Наші дослідження показали, що перевищення інтенсивності деформацій $\epsilon_i = 0,11$ при однопрохідному редуванні супроводжується втратою стійкості, збі-

льшенням контактної взаємодії та руйнуванням, однак також було становлено, що інтенсивність деформацій зразка може перевищувати величину $\epsilon_i=0,11$. Для випадків, коли слід досягти $\epsilon_i=0,28$ за три переходи, то це можливо здійснити за умови коли на першому проході $\epsilon_i=0,11$, на другому - $\epsilon_i=0,09$, на третьому - $\epsilon_i=0,08$. Досліди проводились на основі зразків довжиною 60мм та діаметром 13мм (рис. 4.17) виготовлених із заготовок показаних на рисунку 4.18 . Поверхня зразка проточується, після чого обрізаються торці з центрувальними отворами.

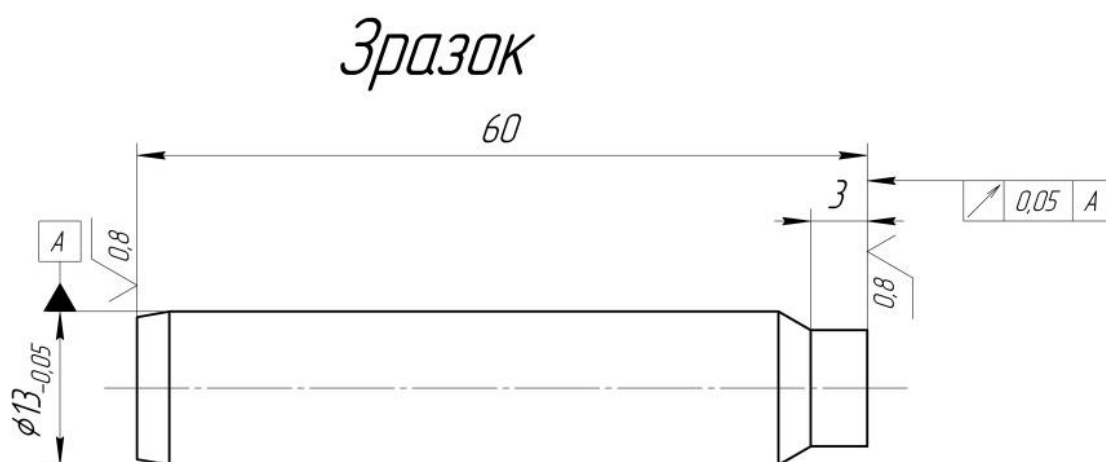


Рисунок 4.17 –Зразок. Ескіз

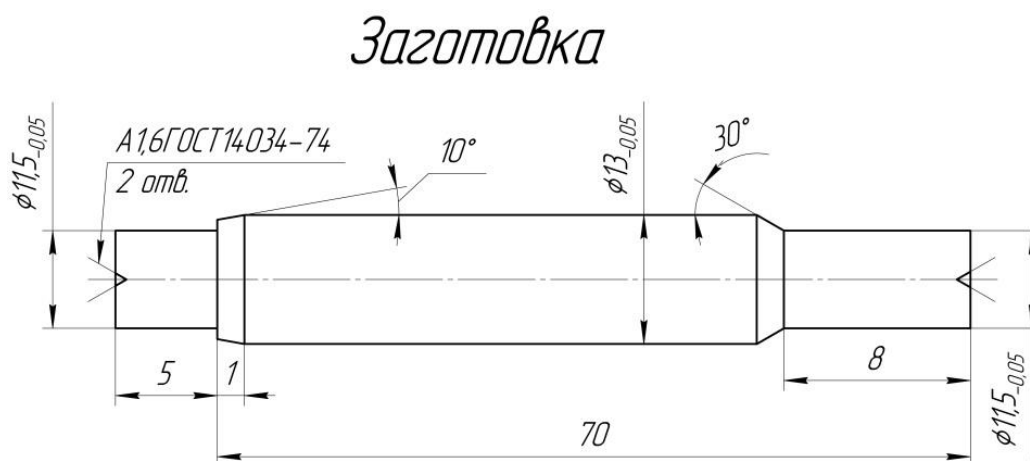


Рисунок 4.18 –Заготовка. Ескіз

Особливості форми зразка для багатоциклового редукування характеризуються наявністю проточки довжиною 3мм (уникнення напливу матеріалу) та входної фаски 10° (направлення зразка).

Реалізація багатоциклового редукування сплаву W-Ni-Fe передбачає розрахунок кількості матриць та величини їх прохідних діаметрів (табл. 4.5). Зменшення величини зміцнення на кожному наступному проході спричиняє відповідно і зменшення деформацій за один прохід. Використання багатоциклового редукування дозволило досягти сумарної відносної деформації 51% за 4 проходи.

Схема інструменту (матриця), який використано при багатоступінчатому редукуванні показано на рисунку 4.19.

Таблиця 4.5 - Багатостадійне редукування зразків сплаву типу W-Ni-Fe

№ матриці (цикл)	Внутрішній діаметр матриці, мм	Інтенсивність деформацій ϵ_i за цикл	Сумарна інтенсивність деформацій ϵ_i
Заготовка	13,0		
1	11,6	0,11	0,11
2	10,6	0,09	0,2
3	9,8	0,075	0,275
4	9,1	0,065	0,34

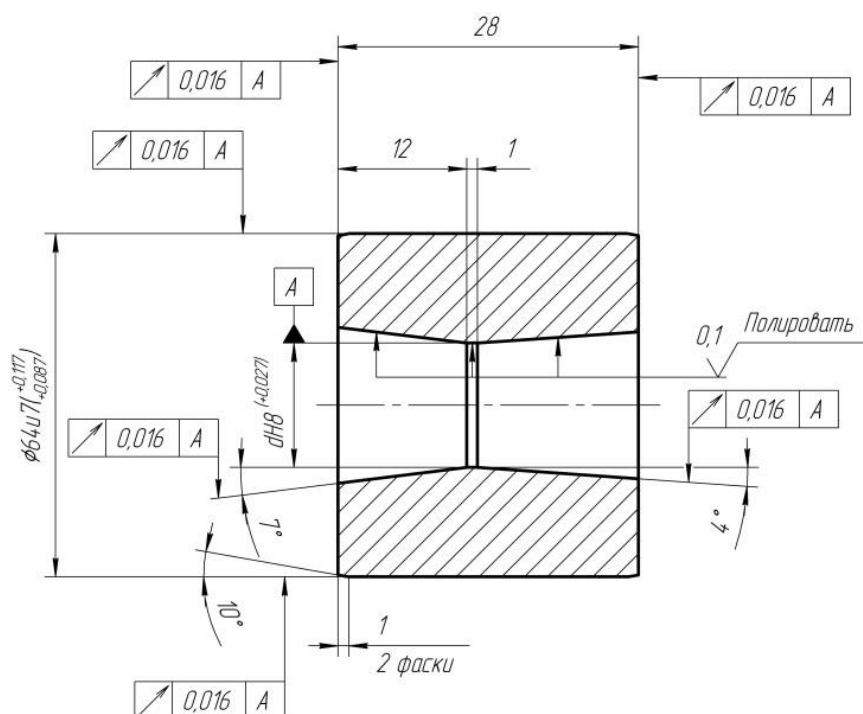


Рисунок 4.19 - Матриця

Як показують експерименти в низці випадків спостерігається втрата стійкості зразка, що прошовується через матрицю (3^0). Отже, було прийнято рішення про використання матриць з кутом нахилу $\gamma=4^\circ$. Багатоциклове редукування супроводжується зміною розмірів зразка, які показані на рисунку 4.20.

Досягнення значних значень інтенсивності деформацій ($\epsilon_i=0,34$) супроводжується суттєвим видовженням (майже в 2 рази). Для успішної реалізації багатоциклового процесу редукування при $\gamma=4^\circ$ обов'язковою умовою реалізації є використання проточки та фасок на заготовці. Виконання даної умови та зміна напрямку деформування на протилежний після кожного проходу (проточка мігрувала на інший кінець заготовки) дозволило досягнути відносної деформації 51%. Багатоциклове редукування при куті нахилу робочого конуса інструменту $\gamma=7^\circ$ супроводжувалось руйнуванням зразка на 2 або 3 проходи.

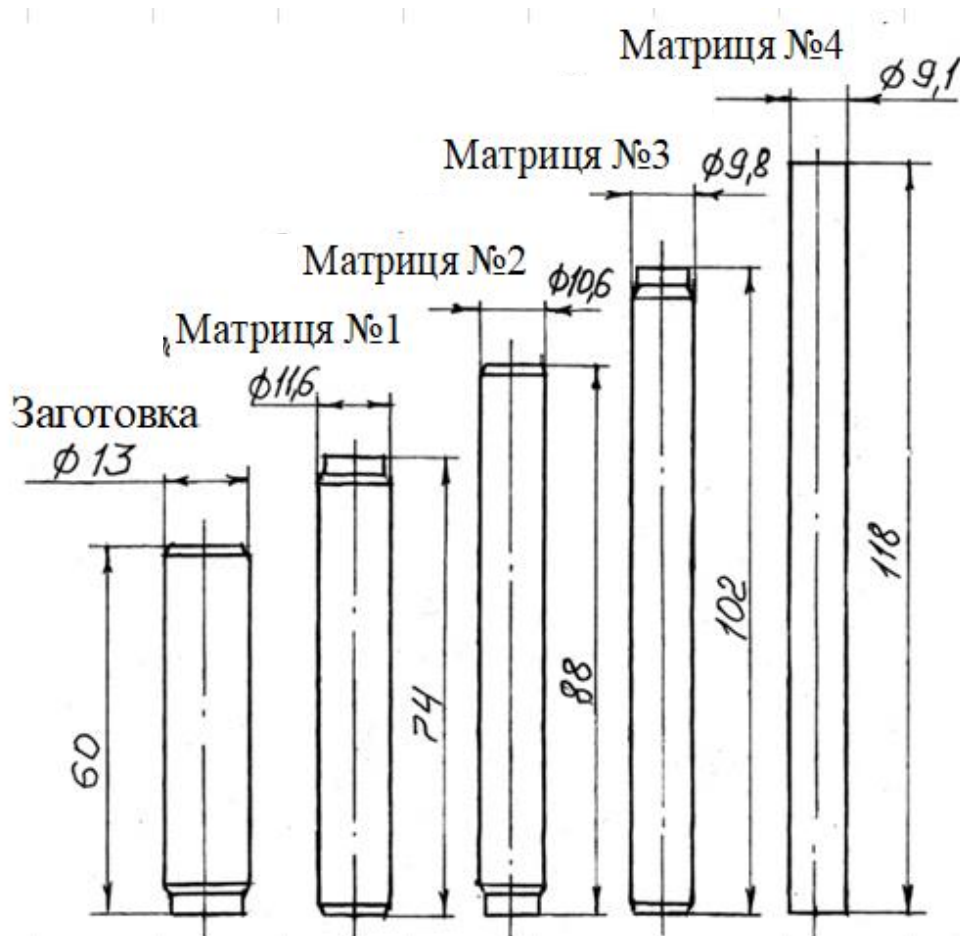


Рисунок 4.20 - Зміна розмірів зразків зі сплаву W-Ni-Fe при послідовному редукуванні

Для реалізації редукування заготовок з початковим відношенням довжини до діаметра 4,6 спроектовано пристосування (рис. 4.21), що передбачає можливість одно- та багатоциклового редукування. Відношенням довжини до діаметра заготовки при багатоцикловогому редукування досягало 13.

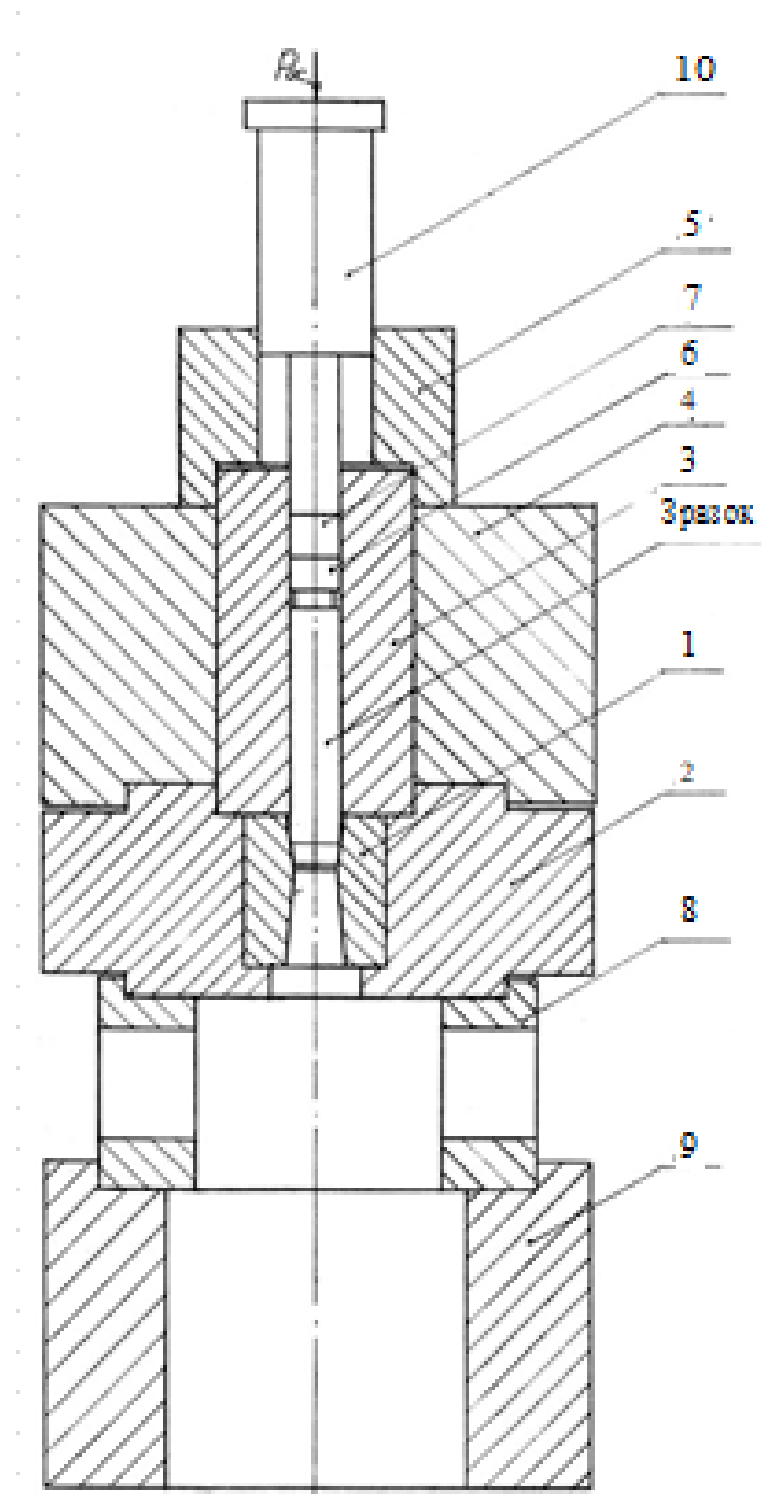


Рисунок 4.21 - Пристосування для багатоциклового редукування довгомірних зразків зі сплаву типу W-Ni-Fe

Конструкція пристосування для багатоциклового редукування виготовлена на основі пристосування для одноциклового редукування, тому відповідно в конструкцію пристосування входить матриця 1 запресована в обойму 2; зразок та штовхач 6 розташовуються в напрямних 3, 4 і 5; між штовхачем і зразком розміщуються вставки 7 (висота 20мм); обойма 2 встановлюється на опору 8, яка в свою чергу встановлюється на опору 9. Така конструкція обумовлена необхідністю забезпечення максимальної стійкості та направлення зразка та штовхача. Напрямна 3 замінюється після кожного проходу, оскільки діаметр зразка зменшується. Також замінюються і штовхач 6 з напрямною 5. Робочий хід штовхача складає близько 20мм, тому для редукування заготовок більшої довжини використовують проміжні вставки 7. Відповідно, редукування заготовок з довжиною більше 20мм відбувається в кілька переходів на кожному циклі, після чого матриця замінюється на іншу з меншим прохідним діаметром.

Проведено редукування для зразків зі сплаву типу W-Ni-Fe (89% та 90%W) при куті нахилу робочого конуса матриці $\gamma=4$ та $\gamma=7^\circ$. Використано 16 зразків, з середньої частини яких в подальшому були вирізані ділянки для шліфа (рис.4.22). Здійснено перевірку твердості по Вікерсу з навантаженням на інденор 30 кгс та відстанню між уколами 2 мм для кожного зразка.

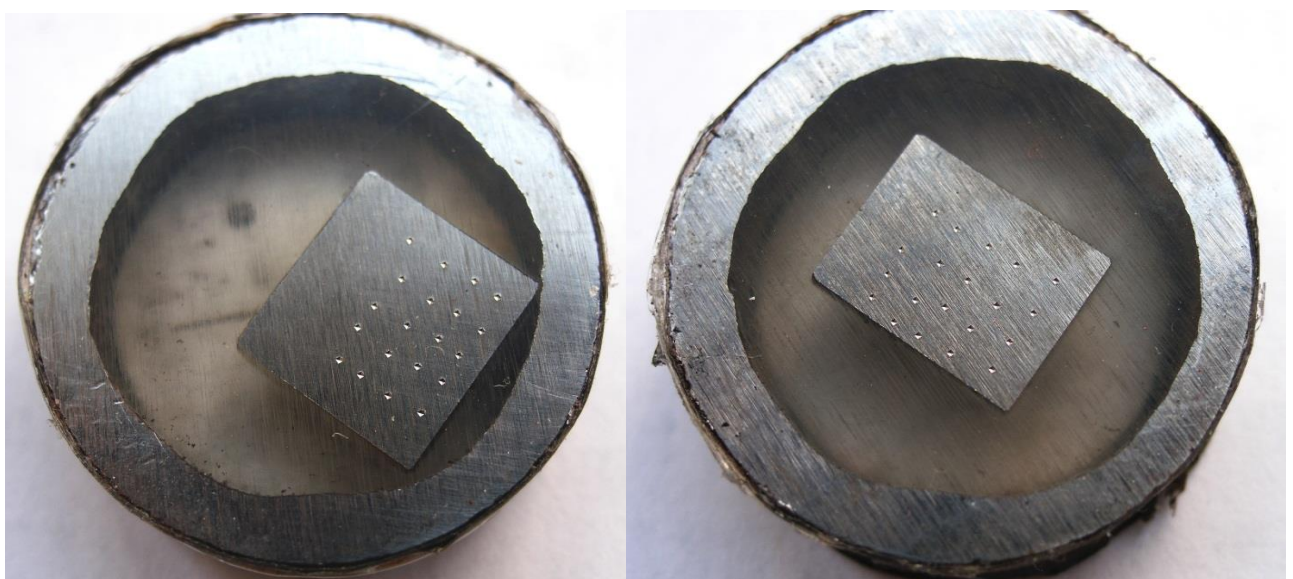


Рисунок 4.22 - Фотографія шліфа після багатоциклового редукування (стаціонарна стадія)

Отримана твердість рівномірно розподілена по перерізу зразка. Середні значення твердості зібрані у таблиці 4.6, зображені на рисунку 4.23

Таблиця 4.6 - Величина твердості по Вікерсу для деформованих зразків сплаву типу W-Ni-Fe

Вміст во- льфраму, %	Кут нахилу робочого конуса, град	Сумарна інтенсивність деформацій ϵ_i					
		0	0,11	0,2	0,275	0,34	
89	4°	Твердість, HV, МПа	3050	4050	4440	4700	4920
	7°		3050	4020	4380	—	—
90	4°		3320	4000	4300	4520	4680
	7°		3320	3980	4260	—	—

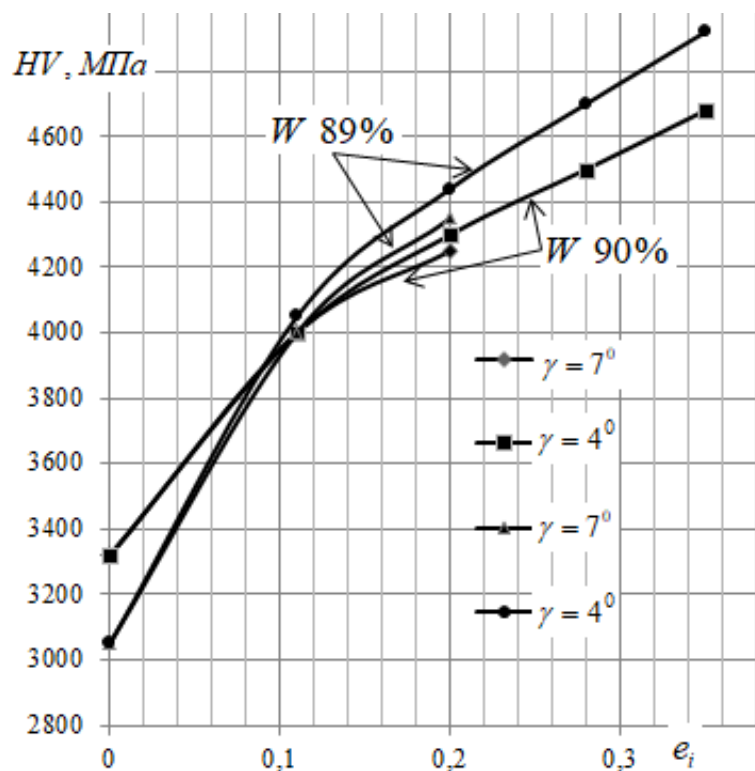


Рисунок 4.23 - Зміцнення зразків в залежності від інтенсивності деформацій

Зміцнення зразків з сплавів системи W-Ni-Fe (W89% та W90%) при багатоцикловому редукуванні відбувається не однаково: зразки що містять 89% W при

початковій твердості 305МПа зміцнюються до 492МПа, а 90% W зміцнюються від 332МПа до 468МПа. При інтенсивності деформацій $e_i = 0,11$ твердість обох сплавів однакова. Для наглядності зобразимо залежність зміцнення в відсотках від інтенсивності деформації зразка (табл. 4.7, рис. 4.24)

Таблиця 4.7 - Результати сумарної деформації зразків сплавів типу W-Ni-Fe.

Вміст вольфраму, %	Кут нахилу робочого конуса, град	Сумарна інтенсивність деформацій, e_i			
		0,11	0,2	0,28	0,34
89	4°	0,33	0,456	0,541	0,613
	7°	0,318	0,416	–	–
90	4°	0,205	0,295	0,361	0,41
	7°	0,199	0,283	–	–

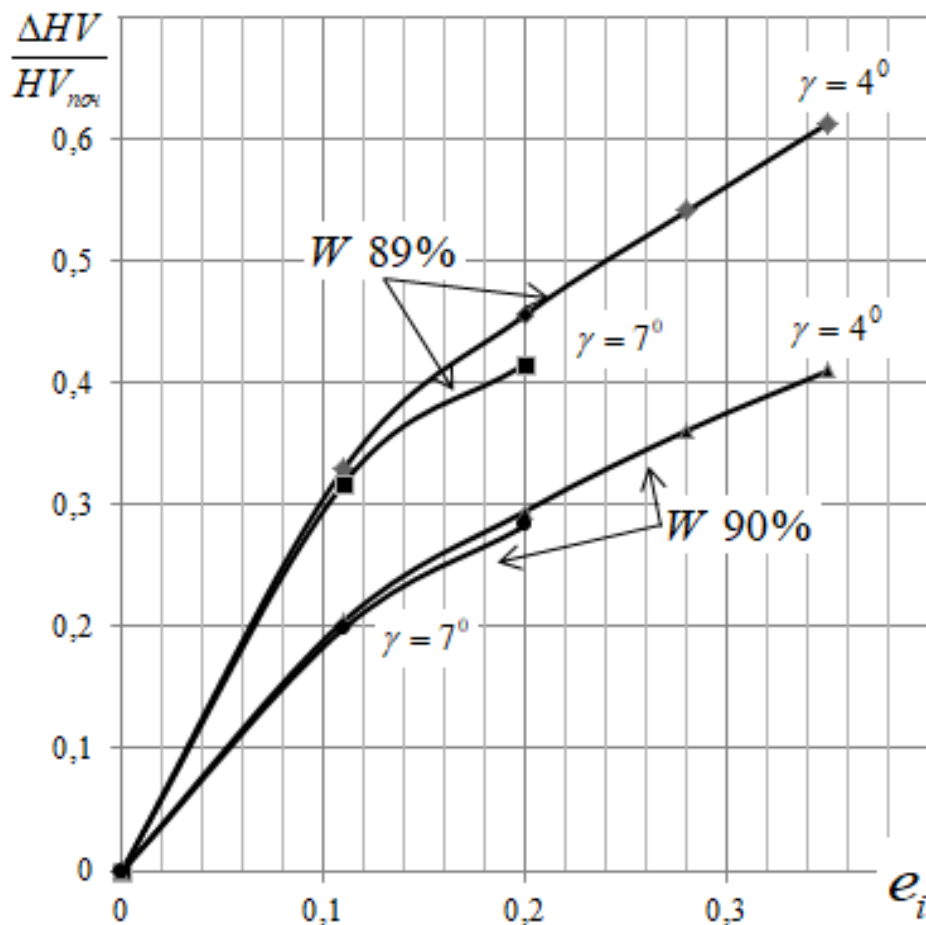


Рисунок 4.24 - Зміцнення зразків в залежності від інтенсивності деформацій

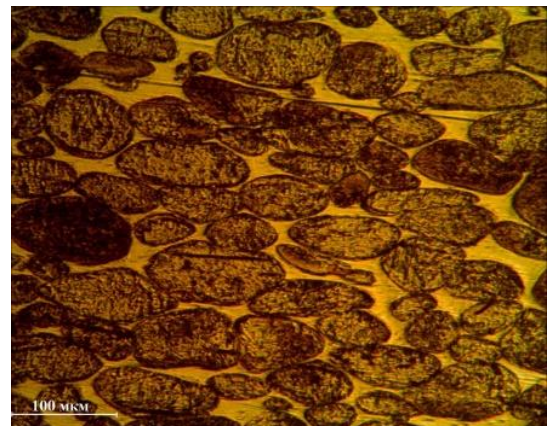
Зразки редуковані в матрицях з $\gamma=7^\circ$ досягли інтенсивності деформацій $\epsilon_i=0,2$, а зразки редуковані при $\gamma=4^\circ$ - $\epsilon_i=0,34$. Руйнування зразків на виході з матриць при $\gamma=7^\circ$ мало характерні ознаки, як наведено на рис. 3.1 (розрив зразка на частини або тріщини). Дане явище підтверджується розрахунком використаного ресурсу пластичності.

Зусилля деформування для обох сплавів знаходилось в межах 70-100 кН

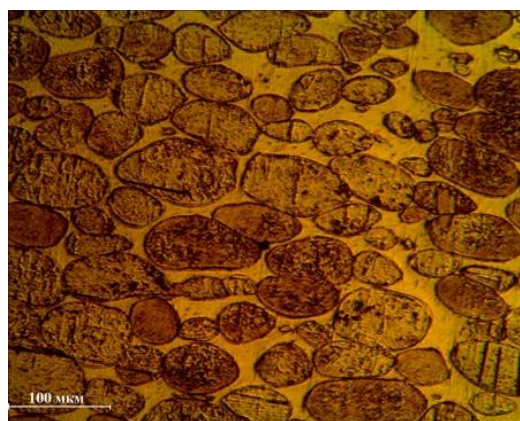
Вплив інтенсивності деформацій на структурні параметри сплаву типу W-Ni-Fe полягає в тому збільшення кількості циклів редукування супроводжуються деяким витягуванням (волокнистістю) зерен сплаву (рис. 4.25), водночас недеформований сплав характеризується зернами округлої форми.



a



б



в

Рис. 4.25 - Мікроструктура сплаву типу W-Ni-Fe після деформування. Діаметр зразка після протягування: а – 9,1 мм; б - 9,8 мм; в - 10,6 мм

Аналіз структури сплаву системи W-Ni-Fe не дозволяє визначити як сильно деформувалась заготовка, водночас зміна коефіцієнта форми дозволяє визначити ступінь деформацій (рис. 4.26).

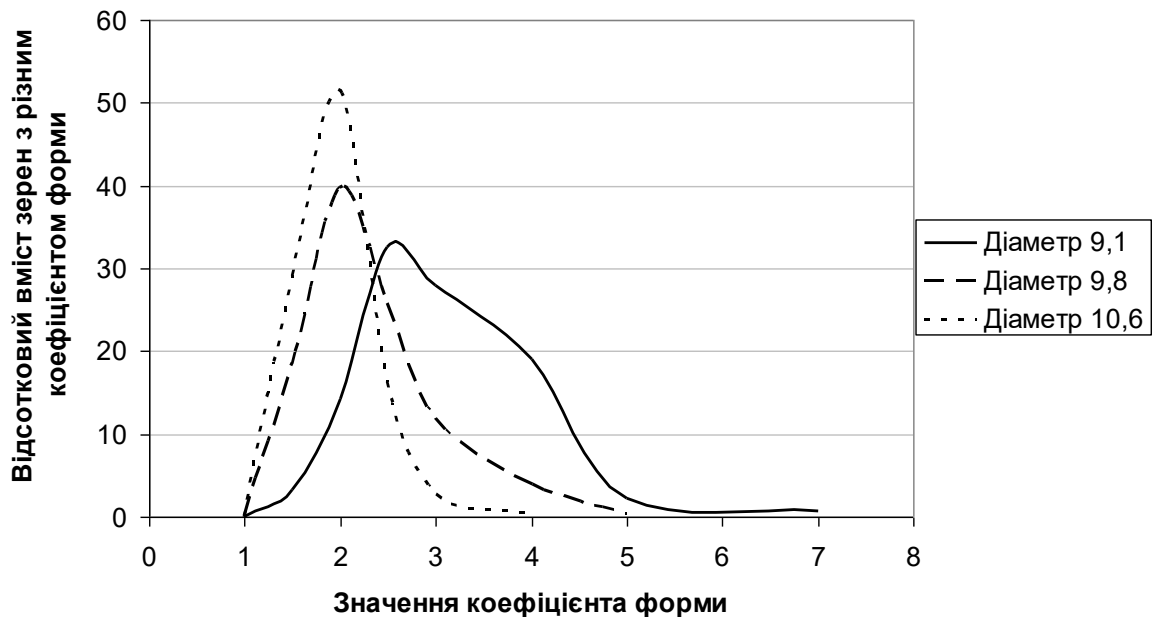


Рисунок 4.26 - Зміна коефіцієнта форми зерен вольфраму у зразках сплавів від ступеню холодної пластичної деформації

Висновки по розділу

1. Показана доцільність використання феноменологічних критеріїв деформованості, що враховують вплив історії деформування на накопичення пошкоджень та їх заліковування в процесі редукування.
2. Аналіз напружено-деформованого стану в процесі редукування, який представлено у вигляді шляхів деформування в координатах безрозмірні показники напруженого стану – накопичена інтенсивність деформацій показав, що в окремих ділянках заготовки реалізуються прості шляхи деформування $\chi=0$, $d\eta/ de_i=0$, $d^2\eta/ de_i^2=0$, що дозволяє для оцінки використаного ресурсу пластичності використовувати прості деформаційні критерії, на основі яких розроблено інженерні залежності, які дозволяють визначити граничні значення технологічних параметрів (δ , γ) в залежності від фізико-механічних властивостей матеріалів. Шляхи деформування в середині осередку деформування характеризуються значною кривизною $d^2\eta/ de_i^2$ та

досягає значень $4 \geq d^2\eta / de_i^2 \geq 0,5$, а також величиною першої похідної $12 \geq d\eta / de_i \geq -12$.

3. На основі оцінки використаного ресурсу пластичності отримані технологічні параметри, які забезпечують потрібний рівень механічних властивостей, а також запобігають виникненню бракувальних ознак руйнування досліджуваного сплаву. Так, доцільним є призначення наступних параметрів процесу – кут нахилу матриці, відносний натяг.
4. Отримані інженерні формули, що дають можливість встановити гранично допустимі натяги для вивчення поведінки сплавів іншого складу. Також отримані формули, що дозволяють враховувати вплив історії деформування, градієнта деформацій (див. формулу 4.10). Властивості металу враховуються у вигляді діаграми пластичності. Зокрема, для сплаву системи W-Ni-Fe (W- 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%.) необхідні показники технологічної спадковості, що виражаються в величині твердості після деформування ($HV=3400..4050$ МПа), нерівномірності розподілу деформацій ($m \geq 0,75$), середньому розмірі зерна деформованого сплаву 49,5..54,6 мкм, відносному видовженні після розриву та залишковій пластичності менше 10%, що реалізується при таких технологічних параметрах: $0,1 \geq \delta \geq 0,06$ та $7^\circ \geq \gamma \geq 3^\circ$.
5. Результати досліджень впроваджено в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля м. Київ у вигляді надання методик та рекомендацій щодо вдосконалення технологічного процесу та визначення його раціональних параметрів, що дає суттєве скорочення часу на технологічну підготовку (до 30%), зменшення кількості виробів з бракувальними ознаками і залежить від конкретних умов реалізації процесу (до 95%).

ВИСНОВКИ

В роботі здійснено дослідження та вдосконалення процесу редукування (пресування) коротких циліндричних заготовок з відносною довжиною (до діаметра) 2..5 з метою отримання необхідних механічних властивостей заготовок, зокрема виробів з порошкових сплавів системи W-Ni-Fe, а також встановлення технологічних режимів, що забезпечують безвідмовне формоутворення.

1) На підставі проведеного літературного аналізу встановлено шляхи і проблеми розвитку обробки тиском циліндричних заготовок редукуванням. Визначено напрями роботи, що спрямовані на забезпечення властивостей матеріалу після обробки редукуванням.

2) Сформовано карту сплаву системи W-Ni-Fe (W – 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%), яка містить такі складові:

- криву течії (зміцнення), апроксимовану степеневою функцією $\sigma_i = 1709e_i^{0,259}$, яку слід використовувати для здійснення процесів холодного пластичного деформування, зокрема моделювання методом скінченних елементів, а також розрахунків енергосилових параметрів таких процесів;

- діаграму пластичності в координатах $e_p = f(\eta)$, що в області $\eta \leq 0$ апроксимована функцією $e_p(\eta) = 0,69 \cdot \exp(-0,3 \cdot \eta)$, в області $\eta > 0$ апроксимована $e_p(\eta) = 0,69 \cdot \exp(-1,75 \cdot \eta)$. Коефіцієнти чутливості пластичності $\lambda_1 = 1,75$ та $\lambda_2 = 0,3$ вказують, що в області $\eta \leq 0$ матеріал має незначну чутливість щодо пластичності зі зміною схеми напруженого стану, а в області $\eta > 0$ - навпаки. Тому обробку цього матеріалу слід проводити в умовах за яких $\eta < 0$, при цьому враховувати, що значне збільшення гідростатичного тиску не суттєво підвищує пластичність ;

- тарувальні графіки твердість HV – інтенсивність напружень σ_i – інтенсивність деформацій e_i , залежність твердості HV від інтенсивності напружень σ_i практично лінійна, при цьому твердість зростає в 1,35 рази при зростанні напруження текучості в 2,7 рази, зв'язок твердості HV від інтенсивності деформацій e_i має степеневу залежність, тарувальні графіки є основою для експериментальної оцінки технологічної спадковості під час проектування технологічного процесу.

3) На основі розрахункової моделі методом скінченних елементів здійснено аналіз напружено-деформованого стану, який дозволив встановити параметри процесу редукування (обтиск, кут нахилу матриці, коефіцієнт тертя) та особливості його механіки з точки зору нерівномірності деформацій, шляхів деформування, контактних напружень:

- при фіксованому куті нахилу інструменту та збільшенні величини обтиску спостерігається збільшення нерівномірності деформацій, зокрема при фіксованому обтиску $\delta=0,04$ та $\gamma=13^{\circ}$ - $m=0,2$, при $\delta=0,04$ та $\gamma=5^{\circ}$ - $m=0,5$;

- зменшення величини кута нахилу робочого конуса інструменту γ в процесі редукування спричиняє зростання коефіцієнта нерівномірності деформацій m , зокрема для обтисків $\delta=0,04$ зменшення кута γ з $\gamma=13^{\circ}$ до $\gamma=5^{\circ}$ супроводжується зростанням коефіцієнта нерівномірності від $m=0,2$ до $m=0,5$;

- збільшення обтиску δ в процесі редукування спричиняє зростання коефіцієнта нерівномірності деформацій m , зокрема для $\gamma=13^{\circ}$ збільшення обтиску з $\delta=0,06$ до $\delta=0,12$ супроводжується зростанням коефіцієнта нерівномірності від $m=0,3$ до $m=0,65$;

- встановлено небезпечні області з точки зору руйнування, які характеризуються несприятливими розтягуючими напруженнями (розташовані навколо вісі заготовки при виході з інструменту; а також шари заготовки, що лежать біля поверхні). Це дозволило, в подальшому, здійснити оцінку деформованості заготовки в процесі її обробки редукуванням;

- максимальне значення нормальних контактних напружень зі збільшенням обтиску δ від 0,01 до 0,11 зростає від -125 МПа до -1200 МПа і більше, що є необхідною інформацією при виборі відповідних умов змащення для запобігання схоплювання та налипання металу заготовки на інструмент. В подальшому доцільним є вибору раціональної форми інструменту для підвищення його максимальної стійкості;

- отримані залежності з оцінки напружено-деформованого стану є основою для оцінки деформованості та технологічної спадковості. Розроблена методика перерахунку енергосилових параметрів та компонентів тензора напружень для

матеріалів з подібною реологією, що розширює область застосування отриманих результатів при розрахунку технологічних параметрів процесу редукування відповідних заготовок для різноманітних конструкційних матеріалів.

4) Аналіз напружено-деформованого стану в процесі редукування, який представлено у вигляді шляхів деформування в координатах безрозмірні показники напруженого стану – накопичена інтенсивність деформацій показав, що в окремих ділянках заготовки реалізуються прості шляхи деформування $\chi=0$, $d\eta/ de_i = 0$, $d^2\eta/ de_i^2=0$, що дозволяє для оцінки використаного ресурсу пластичності використовувати прості деформаційні критерії, на основі яких розроблено інженерні залежності, які дозволяють визначити граничні значення технологічних параметрів (δ , γ) в залежності від фізико-механічних властивостей матеріалів. Шляхи деформування в середині осередку деформування характеризуються значною кривизною $d^2\eta/ de_i^2$ та досягає значень $4 \geq d^2\eta/ de_i^2 \geq 0,5$, а також величиною першої похідної $12 \geq d\eta/ de_i \geq -12$. У вказаній області реалізується об'ємний напружений стан, що викликало необхідність розрахунку використаного ресурсу пластичності за допомогою модифікованого критерію В. А. Огороднікова, який враховує вплив третього інваріанту тензора напружень та історію деформування.

5) Для сплаву системи W-Ni-Fe (W- 89%, Ni – 7,5%, Fe – 3,5%) необхідні показники технологічної спадковості, що виражаються в величині твердості після деформування ($HV=3400..4050$ МПа), нерівномірності розподілу деформацій ($m \geq 0,75$), середньому розмірі зерна деформованого сплаву $49,5..54,6$ мкм, відносному видовженні після розриву та залишковій пластичності менше 10%, що реалізується при таких технологічних параметрах: $0,1 \geq \delta \geq 0,06$ та $7^0 \geq \gamma \geq 3^0$.

6) Результати досліджень впроваджено в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля м. Київ у вигляді надання методик та рекомендацій щодо вдосконалення технологічного процесу та визначення його раціональних параметрів, що дає суттєве скорочення часу на технологічну підготовку (до 30%), зменшення кількості виробів з бракувальними ознаками і залежить від конкретних умов реалізації процесу (до 95%), а також в навчальний процес Вінницького національного технічного університету.

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 «ХПИ», 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 «ХПИ», 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*. Выпуск 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 № u 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

редуцыроваўня сплавов W-Ni-Fe абеспечываючая зніжэньне кантактных напярэжэнь і ўлучшэньне механічэскіх свайстваў іздэлія» на *1-й Міжнародній навукова-тэхнічнай канфэрэнцыі «Перспектывы развітку машынобудуваньня та транспарту – 2019»*, Вінніца, ВНТУ, 13 – 15 травня 2019, с.

[20] О. В. Гуцалюк, «Тэхналогічны відмовы в процесі редукуваньня» на *XLVIII-й Навукова-тэхнічнай канфэрэнцыі факультэту машынобудуваньня та транспарту*, Вінніца, ВНТУ, 22 березня 2019. [Электронны рэсурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2019/index>.

[21] С. А. Зайдес, А. Н. Исаев, *Тэхналогічэская механіка осесымэтрычэскага дэфармуваньня*. Иркутск, Расійская фэдэрацыя: Ізд-во ИрГТУ, 2007, 432с.

[22] В. Б. Квактун *Опрэдэленьне напярэжэнь в очаге дэфармацыі пры волочэньні*, №10 Кіў, Украіна: Сталь, 1973, 957с.

[23] В. Л. Колмогоров *Механіка абработкі металов давленьем*. Москва, СССР: Ізд-во Мэталлургія, 1986, 688 с.

[24] В. А. Огородніков, *Дэфармуемасьць і разрушэньне металов пры пластычэском фармоізмененьні*. К., СРСР: УМК ВО, 1989.

[25].Г. Д. Дэль, *Тэхналогічэская механіка*. М. : Машыностроеньне, 1978.

[26] В. Л. Колмогоров *Напярэжэньня. Дэфармацыі. Разрушэньне*. Москва, СССР: Ізд-во Мэталлургія, 1970, 272 с.

[27] В. А. Огородніков, А. В. Грушко «Модэліраваньне працэса фармоабрабаваньня крутоізогнутых отводоў на аснове тэорыі дэфармуемасьці», *Краматорськ, зб. наук. пр. Сэрыя :Удосконаленьня працэсаў і абладнаньня абработкі тиском в мэталургіі і машынобудуваньні*, с. 5-10, 2000.

[28] И. Я. Тарновский и др. *Тэорыя абработкі металов давленьем* Москва, СССР: Ізд-во Мэталлургыздат, 1963, 672 с.

[29] С. И. Губкин *Тэорыя абработкі металов давленьем*. Москва, СССР: Ізд-во Мэталлургыздат, 1947, 532 с.

[30] Г. Я. Гун *Матэматычэскае мадэліраваньне працэсаў абработкі металов давленьем*. Москва, СССР: Ізд-во Мэталлургія, 1983, 352 с.

[31] А. А. Поздеев, Ю. И. Няшин, В. П. Трусков *Остаточныя напярэжэньня*.

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 Metallurgizdat, 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 немономном 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 эйлерова 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.

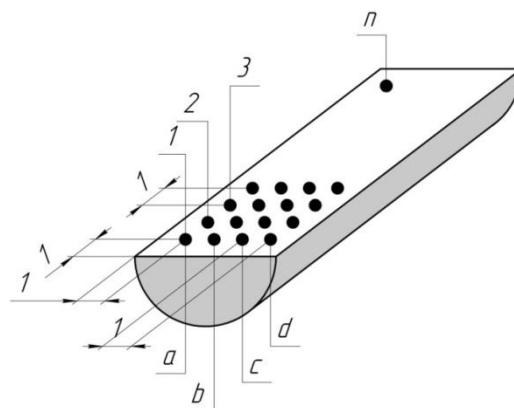
[101] Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов, *Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов*. М. : Машиностроение, София-Техника, 1980. – 304 с.

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

ДОДАТКИ

Додаток А

Показники твердості по перерізу шліфа



Ескіз деформованого (зміцненого) зразка для контролю твердості.

Шліф «№0», недеформований

№ укола	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D, мм	0,44	0,43	0,43	0,44	0,44	0,43	0,43	0,42	0,43	0,41	0,42	0,42
Hv	287	301	301	287	287	301	301	315	301	331	315	315

Шліф «№2», деформація 10%

a			b			c			d		
№ укола	D, мм	Hv	№ укола	D, мм	Hv	№ укола	D, мм	Hv	№ укола	D, мм	Hv
1	0,39	366	1	0,37	406	1	0,37	406	1	0,37	406
2	0,38	385	2	0,36	429	2	0,36	429	2	0,38	385
3	0,38	385	3	0,37	406	3	0,37	406	3	0,37	406
4	0,37	406	4	0,37	406	4	0,37	406	4	0,36	429
5	0,36	429	5	0,36	429	5	0,37	406	5	0,37	406
6	0,36	429	6	0,38	385	6	0,35	454	6	0,37	406
7	0,36	429	7	0,37	406	7	0,37	406	7	0,37	406
8	0,36	429	8	0,36	429	8	0,36	429	8	0,37	406
9	0,37	406	9	0,37	406	9	0,38	385	9	0,37	406
10	0,37	406	10	0,38	385	10	0,39	366	10	0,39	366
11	0,4	348	11	0,39	366	11	0,39	366	11	0,38	385
12	0,4	348	12	0,38	385	12	0,4	348	12	0,39	366
13	0,4	348	13	0,39	366	13	0,4	348	13	0,39	366
14	0,4	348	14	0,39	366	14	0,4	348	14	0,39	366
15	0,4	348	15	0,39	366	15	0,39	366	15	0,39	366
16	0,39	366	16	0,4	348	16	0,39	366	16	0,38	385
17	0,39	366	17	0,4	348	17	0,39	366	17	0,39	366

Шліф «№4», деформація 20%

a			b			c			d		
№ укола	D, мм	Hv	№ укола	D, мм	Hv	№ укола	D, мм	Hv	№ укола	D, мм	Hv
1	0,37	406	1	0,36	429	1	0,37	406	1	0,37	406
2	0,37	406	2	0,36	429	2	0,37	406	2	0,37	406
3	0,37	406	3	0,37	406	3	0,37	406	3	0,37	406
4	0,37	406	4	0,37	406	4	0,37	406	4	0,38	385
5	0,37	406	5	0,37	406	5	0,36	429	5	0,37	406
6	0,36	429	6	0,37	406	6	0,36	429	6	0,37	406
7	0,36	429	7	0,36	429	7	0,36	429	7	0,37	406
8	0,36	429	8	0,36	429	8	0,36	429	8	0,37	406
9	0,37	406	9	0,37	406	9	0,36	429	9	0,37	406
10	0,36	429	10	0,37	406	10	0,36	429	10	0,36	429
11	0,36	429	11	0,36	429	11	0,36	429	11	0,36	429
12	0,36	429	12	0,36	429	12	0,36	429	12	0,35	454
13	0,36	429	13	0,35	454	13	0,36	429	13	0,35	454
14	0,35	454	14	0,35	454	14	0,35	454	14	0,36	429
15	0,35	454	15	0,35	454	15	0,35	454	15	0,35	454
16	0,35	454	16	0,35	454	16	0,35	454	16	0,35	454
17	0,35	454	17	0,35	454	17	0,35	454	17	0,34	481
18	0,35	454	18	0,35	454	18	0,35	454	18	0,35	454
19	0,34	481	19	0,35	454	19	0,35	454	19	0,35	454
20	0,34	481	20	0,34	481	20	0,35	454	20	0,35	454
21	0,34	481	21	0,34	481	21	0,35	454	21	0,34	481
22	0,34	481	22	0,343	473	22	0,36	429	22	0,35	454

Шліф «№6», деформація 25%

a			b			c			d		
№ укола	D, мм	Hv	№ укола	D, мм	Hv	№ укола	D, мм	Hv	№ укола	D, мм	Hv
1	0,35	454	1	0,35	454	1	0,37	406	1	0,37	406
2	0,34	481	2	0,35	454	2	0,35	454	2	0,36	429
3	0,34	481	3	0,35	454	3	0,35	454	3	0,35	454
4	0,34	481	4	0,35	454	4	0,35	454	4	0,35	454
5	0,34	481	5	0,34	481	5	0,35	454	5	0,35	454
6	0,34	481	6	0,35	454	6	0,35	454	6	0,35	454
7	0,34	481	7	0,35	454	7	0,36	429	7	0,36	429
8	0,34	481	8	0,35	454	8	0,36	429	8	0,35	454

9	0,35	454	9	0,35	454	9	0,35	454	9	0,35	454
10	0,34	481	10	0,35	454	10	0,35	454	10	0,35	454
11	0,35	454	11	0,35	454	11	0,36	429	11	0,35	454
12	0,34	481	12	0,36	429	12	0,35	454	12	0,35	454
13	0,34	481	13	0,35	454	13	0,35	454	13	0,35	454
14	0,34	481	14	0,35	454	14	0,35	454	14	0,35	454
15	0,35	454	15	0,35	454	15	0,36	429	15	0,35	454
16	0,35	454	16	0,36	429	16	0,36	429	16	0,35	454
17	0,35	454	17	0,36	429	17	0,36	429	17	0,35	454
18	0,34	481	18	0,36	429	18	0,35	454	18	0,35	454
19	0,35	454	19	0,35	454	19	0,35	454	19	0,35	454
20	0,35	454	20	0,35	454	20	0,35	454	20	0,35	454
21	0,35	454	21	0,34	481	21	0,35	454	21	0,35	454
22	0,35	454	22	0,35	454	22	0,36	429	22	0,35	454

Шліф «№8», деформація 28%

a			b			c			d		
№ укола	D, мм	Hv	№ укола	D, мм	Hv	№ укола	D, мм	Hv	№ укола	D, мм	Hv
1	0,35	454	1	0,36	429	1	0,37	406	1	0,36	429
2	0,34	481	2	0,36	429	2	0,34	481	2	0,36	429
3	0,33	511	3	0,34	481	3	0,34	481	3	0,34	481
4	0,34	481	4	0,34	481	4	0,34	481	4	0,35	454
5	0,35	454	5	0,34	481	5	0,34	481	5	0,34	481
6	0,35	454	6	0,35	454	6	0,35	454	6	0,34	481
7	0,34	481	7	0,35	454	7	0,33	511	7	0,35	454
8	0,33	511	8	0,33	511	8	0,32	543	8	0,33	511
9	0,34	481	9	0,33	511	9	0,32	543	9	0,33	511

Додаток Б

Програмний модуль по автоматизованому розрахунку параметрів напружено-деформованого стану

```

*KEYWORD
*TITLE
LS-DYNA user input
*DATABASE_FORMAT
  2
$          NODE DEFINITIONS          $
*NODE
$          SECTION DEFINITIONS        $
*SECTION_SHELL
  1  15  1.0000  1.0  0.0  0.0  0  1
  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
*SECTION_SHELL
  2  14  1.0000  1.0  0.0  0.0  0  1
  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
$          MATERIAL DEFINITIONS        $
*MAT_POWER_LAW_PLASTICITY
  1  0.800E-07  0.200E+06  0.300000  0.173E+04  0.259  0.00  0.00
*MAT_RIGID
  2  0.800E-07  0.200E+06  0.300000  0.0  0.0  0.0
  1.00  6.00  7.00
*HOURGLASS
  1  4  0.100E-01  0  1.50  0.600E-01  0.100E-01  0.100E-01
*HOURGLASS
  2  0  0.100E-01  0  1.50  0.600E-01  0.100E-01  0.100E-01
$          PARTS DEFINITIONS          $
*PART
Part  1 for Mat  1 and Elem Type  1
  1  1  1  0  1  0  0
*PART
Part  2 for Mat  2 and Elem Type  2
  2  2  2  0  2  0  0
$          ELEMENT DEFINITIONS        $
*ELEMENT_SHELL
$          COORDINATE SYSTEMS          $
$          LOAD DEFINITIONS            $
$          RIGID BOUNDRIES            $
*DEFINE_CURVE
  1  0  1.000  1.000  0.000  0.000
  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00
  1.000000000000E-02 -2.000000000000E+03
  3.600000000000E-01 -2.000000000000E+03
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID
  2  2  0  1  1.000  0  0.000  0.000
$          BOUNDARY DEFINITIONS        $
*SET_NODE_LIST
  1  0.000  0.000  0.000  0.000
  1  72  132  133  134  135  136  137
  138  139  140
*BOUNDARY_SPC_SET
  1  0  0  1  0  0  0  0
$          CONTACT DEFINITIONS          $
*CONTACT_2D_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE
  0  0  1.000  500.1000  0.1000  0.000  6
  0.000  0.1000E+08
$          CONTROL OPTIONS              $
*CONTROL_ENERGY
  2  2  2  2

```



```

*CONTROL_HOURLASS
  1 0.00
*CONTROL_SHELL
 20.0  1  -1  1  2  2  1
*CONTROL_BULK_VISCOSITY
 1.50  0.600E-01
*CONTROL_CONTACT
 0.10000 0.00000  2  0  1  2  1
  0  0  10  0 4.00
*CONTROL_TIMESTEP
 0.0000 0.9000  0 0.00  0.00
*CONTROL_TERMINATION
0.370E-01  0 0.00000 0.00000 0.00000
*DATABASE_HISTORY_NODE
  1
$          TIME HISTORY          $
*DATABASE_DEFGEO
0.3700E-04
*DATABASE_RCFORC
0.3700E-04
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
0.3700E-03
*DATABASE_BINARY_D3THDT
0.3700E-04
*DATABASE_BINARY_D3DUMP
 150837
$          DATABASE OPTIONS      $
*DATABASE_EXTENT_BINARY
  0  0  3  1  0  0  0  0
  0  0  4  0  0  0
*END

```

Додаток В

Акт впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора ІНМ НАН України

Д.т.н.

Бочечка О. О.

«13» вересня 2018 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Гуцалюка Олександра Володимировича
на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук

Результати, що отримані в дисертаційній роботі Гуцалюка О.В. впроваджені в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля НАН України при проведенні наукових досліджень в області обробки металів холодним пластичним деформуванням, зокрема в дослідженні та розробці процесу редукування циліндричних заготовок, які виготовлені зі сплаву W-Ni-Fe.

Теоретичні та експериментально-теоретичні моделі використані для:

- отримання карти сплаву системи вольфрам-нікель-залізо (W-Ni-Fe), який включає криву течії, діаграму пластичності, градувальний графік твердість-інтенсивність напружень-інтенсивність деформацій;
- для визначення меж змін технологічних параметрів, за яких можлива обробка циліндричних заготовок зі сплаву W-Ni-Fe без бракувальних ознак у вигляді руйнування, втрати стійкості тощо;
- визначення раціональних технологічних параметрів, що забезпечують сприятливу технологічну спадковість.

На основі впроваджених методик та рекомендацій виготовлено робочий інструмент і застосовано режими обробки, що дозволили отримати дослідну партію оброблених заготовок без бракувальних ознак із необхідними показниками міцності і пластичності.

Перелічені науково-технічні розробки використані в період 2016-2017 рр. при виконанні досліджень по темі Ш-2-15 (0471) «Визначення консолідованого впливу умов вакуумного відпалу і наступної холодної пластичної деформації на структуру і механічні властивості вольфрамових важких сплавів», в яких дисертант брав участь як співвиконавець.

Зав. відділом формування прецизійних елементів
складнопрофільних виробів.



С.Є. Шейкін

Додаток В

Акт впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ



Перший проректор з НІР по ОНП та НМЗ
Вінницького національного
технічного університету

О.М. Васілевський

«20» 06 2019 р.

ДОВІДКА

про використання результатів кандидатської дисертації
Гуцалюка Олександра Володимировича
в навчальному процесі ВНТУ

Комісія в складі зав. кафедри опору матеріалів та прикладної механіки (ОМПМ), д.т.н., проф. Огороднікова В.А. та професора кафедри ОМПМ, к. т. н., доц. Федотова В.О. встановила, що результати теоретичних та експериментальних досліджень, що містяться в дисертаційній роботі Гуцалюка О. В. „Вдосконалення процесу холодного редукування відносно коротких циліндричних заготовок на основі методів технологічної механіки” використані в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету у вигляді:

- методик створення карти матеріалу на прикладі 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_1 – інтенсивність деформацій ϵ_1 ;

- методик створення рекомендації щодо вибору феноменологічних критеріїв деформування при розрахунках використаного ресурсу пластичності для конкретного процесу на прикладі процесу редукування із врахуванням впливу історії деформування;

- методик визначення технологічних параметрів процесу, на прикладі процесу редукування, які дозволяють отримати заготовки з прогнозованими властивостями без технологічних відмов при вивченні поведінки реологічно подібних матеріалів.

Наведені результати використані в лекційному матеріалі, при проведенні лабораторних робіт з таких дисциплін: „Опір матеріалів”, „Спецкурс опору матеріалів”, а також використовуються в науково-дослідній роботі студентів та магістрів.

Довідка призначена для надання в спеціалізовану раду Д.05.052.03 при Вінницькому національному технічному університеті.

Зав. кафедри ОМПМ, д.т.н., проф.

Огородніков В. А.

Професор кафедри ОМПМ, к. т. н., доц.

Федотов В. О.

Додаток Г

Список публікацій здобувача 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. 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*. Выпуск 1, с. 67-77, 2015.

[6] О. В. Грушко та О. В. Гуцалюк, «Модельовання 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 пар-

тій сталевій 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. 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*

ні 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 38X2МЮА)», 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 редуцирования сплавов W-Ni-Fe обеспечивающая снижение контактных напряжений и улучшение механических свойств 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 конференція 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>.