

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КОЛІСНИК МИКОЛА АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.73:621.77:539.3 (043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ
РОЗВИТОК ПРОЦЕСІВ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ
НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ МЕХАНІКИ ФОРМОУТВОРЕННЯ
СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ВИРОБІВ

13 Механічна інженерія

132 Матеріалознавство

Подається на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Микола КОЛІСНИК

Науковий керівник:

МИХАЛЕВИЧ Володимир Маркусович,
доктор техн. наук, професор

Вінниця – 2025

АНОТАЦІЯ

Колісник М.А. Розвиток процесів штампування обкочуванням на основі аналізу механіки формоутворення складно профільних виробів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії (Phd) за спеціальністю 132 Матеріалознавство (13 Механічна інженерія) - Вінницький національний аграрний університет, Міністерство освіти і науки України, Вінниця, 2025.

Дана робота спрямована на вирішення актуальної науково-технічної проблеми розробки та впровадження нових ресурсозберігаючих технологічних процесів металообробки та підвищення на їх основі ефективності виробництва, й тому є одним із найважливіших завдань сучасного машинобудування. Важливим напрямом ресурсозбереження й підвищення якості виробів у металообробці є розвиток маловідходних технологій обробки матеріалів тиском (ОМТ). Це, у свою чергу, вимагає подальшого розвитку способів формоутворення та розробки відповідного обладнання для їх реалізації.

Варто відзначити, що до основних факторів, які перешкоджають широкому застосуванню методів ОМТ, відносяться: обмежена стійкість оснащення через високі контактні напруження; руйнування заготовок внаслідок недостатньої пластичності металів; відхилення від заданої форми через втрату заготовкою стійкості. Точність прогнозування технологічних можливостей процесів ОМТ, а також якості та технологічної спадковості готових виробів, значною мірою визначається кінематикою та історією деформування, для встановлення яких необхідно мати достовірну інформацію про напружено-деформований стан та деформовність матеріалу заготовок у процесі формоутворення.

В аграрно-промисловому комплексі досить розповсюдженими є пустотілі деталі ступінчастої форми із зовнішніми фланцями та внутрішніми буртами, а також інші складнопрофільні вироби. Такі деталі виробляють з використанням операцій прямого і зворотного, витискування, роздавання та

обтиснення трубних заготовок, в т.ч. із застосуванням операцій зварювання. Використання таких операцій потребує виготовлення дорогоцінної оснастки, що може виявитися економічно невиправданим у разі мілкосерійного виробництва. Особливо складним є формування фланців, бортів та складнопрофільних пустотілих елементів, що ще більше підвищує витрати та ускладнює процес виробництва.

Попередні дослідження довели, що ефективним процесом виробництва зазначених виробів може бути штампування обкочуванням, при якому виникають відносно невеликі сили деформування, а умови течії матеріалу в зоні контакту інструмента із заготовкою сприяють формуванню тонкостінних елементів заготовок складної форми.

Простота оснащення й універсальність обладнання дозволяє використовувати процеси штампування обкочуванням для виробництва зазначених виробів широкої номенклатури. При цьому ефективному застосуванню штампування обкочуванням заважає недостатньо розвинутий розрахунковий апарат механіки формоутворення (кінематики течії металу, накопичення пошкоджень та напружено-деформованого стану заготовок), який дозволив би на стадії проектування визначити параметри технологічного процесу для забезпечення необхідних умов деформування.

У першому розділі цієї роботи виконано всебічний аналіз процесів штампування обкочуванням на сферорухомих пресах та на установках торцевого розкочування, що застосовуються в сучасних технологіях для виробництва складних деталей з металів і сплавів. Висвітлено основні схеми ШО, що забезпечують необхідні умови формування заготовок шляхом пластичного формозмінення, зокрема, схеми осаджування, прямого і зворотного витискування.

Процеси ШО на торцеобкочувальному обладнанні здійснюються із застосуванням двох типів валків: циліндричних та конічних. Важлива особливість торцеобкочувальних процесів полягає у можливості формування направленого плину матеріалу заготовки, що досягається радіальним зміщенням вершини конічного валка та його положенням відносно

осі обертання заготовки.

Раціональний вибір параметрів процесу ШО дозволяє формувати внутрішні та зовнішні бурти й фланці з великим відношенням їх діаметра до діаметра основної частини заготовки.

Зазначається, що розвиток ресурсозберігаючих технологій є одним із ключових напрямів сучасної інженерії, включаючи матеріалознавство. Зменшення витрат енергії, матеріалу та технологічних втрат є частиною сталого розвитку й екологічно орієнтованого виробництва. Розглянуті процеси ШО відносяться до ресурсозберігаючих та нерозривно пов'язані з пластичним деформуванням - фундаментальним методом формоутворення, що тісно пов'язаний із внутрішньою структурою матеріалу, його механічними властивостями та здатністю до подальшої експлуатації.

При інтенсивному пластичному деформуванні відбувається накопичення мікропошкоджень (порожнин, мікротріщин), які є передумовою руйнування. Оцінка цих процесів - важлива умова забезпечення надійності кінцевих виробів. Моделювання деформовності заготовок під час пластичного деформування дозволяє оцінити рівень накопичених пошкоджень матеріалу, що, в свою чергу, впливає на рівень механічних характеристик отриманих деталей і, отже є важливою задачею матеріалознавства.

У цьому контексті обґрунтовується потреба в застосуванні сучасних методів аналізу напружено-деформованого стану (НДС) і моделювання граничного стану матеріалу, а також необхідність порівняльного аналізу поширених у світовій літературі моделей руйнування при пластичній деформації.

У другому розділі роботи проведено всебічний аналіз сучасного стану вивчення процесів руйнування матеріалів за умов пластичного деформування. Встановлено, що в науковій літературі переважають роботи, присвячені граничним деформаціям матеріалів при стаціонарному пластичному деформуванні, тоді як моделюванню траєкторій деформування макрочастинок матеріалів небезпечних зонах заготовки процесів підсумування пошкоджень приділяється значно менше уваги. Оцінено, що більшість

відомих моделей руйнування, щоподані в літературі інтегральними представленнями, є, насправді, різними варіантами функціональної залежності граничних деформацій від одного або двох безрозмірних показників напружено-деформованого стану при стаціонарному деформуванні, інтегрованими в модель, що базується на лінійному принципі накопичення пошкоджень. Такий підхід дозволяє виявити широкий спектр закономірностей руйнування, характерних для всіх зазначених моделей у деяких випадках нестационарного деформування.

Особливу увагу приділено встановленню зв'язку між емпіричними критеріями руйнування та моделями теорії підсумовування пошкоджень, зокрема, виявлено вплив граничної деформації при рівномірному стисненні на форму лінії руйнування у відповідних координатах. Аналіз джерел з високими наукометричними показниками свідчить про актуальність тематики та її відповідність міжнародному рівню. Отримані результати не лише уточнюють існуючі уявлення, але й сприяють розширенню наукового розуміння, що є ключовою ознакою інноваційного характеру дослідження.

У третьому розділі розглянуто напружено-деформований стан матеріалу заготовок як одну з ключових характеристик, необхідних для оцінки деформованості та визначення силових параметрів процесів ШО. Дослідження зосереджено на процесах прямого та зворотного витискування, зокрема на прикладі формування торцевих зубців зубчатої муфти. Теоретичне дослідження напруженого стану у вершині зубця, виконане з використанням теорії пластичного згину смуги, дало змогу визначити характер розподілу показника напруженого стану в пластичній області. З'ясовано, що найбільш жорсткий напружений стан зосереджено у вершині зубців, де спостерігаються мінімальні деформації, тоді як максимальні деформації виникають в основі зубця при умовах близьких до всебічного стиску.

На основі отриманих даних побудовано траєкторії деформування частинок металу в координатах «показник напруженого стану – накопичена деформація», що слугує основою для створення моделей деформованості заготовок при процесах ШО. Розроблено дві моделі, що дозволяють описати

накопичення пошкоджень матеріалів небезпечних зонах заготовки під час прямого та зворотного витискування. Кожна модель складається з трьох компонентів: аналітичного опису траєкторії деформування, апроксимації кривої граничних деформацій та моделі підсумовування пошкоджень. В обох моделях використано трипараметричну форму кривої граничних деформацій, що характерна для стаціонарного деформування, а в якості моделей підсумовування обрано степеневу модель і її варіанти: модель В. А. Огороднікова та модель з лінійним принципом накопичення пошкоджень.

Особливу увагу приділено формуванню параметричних рівнянь траєкторій деформування. Для прямого витискування побудовано функціональні залежності між показником напруженого стану, накопиченою деформацією та параметром траєкторії. Виявлено, що значення показника нелінійності накопичення пошкоджень, характерного для даних траєкторій, є додатним і меншим за одиницю. Водночас числові експерименти з більшими значеннями цього показника виявили монотонне зростання граничної деформації, що підкреслює важливість точного підбору параметрів моделі.

Для зворотного витискування фланців методом ШО запропоновано оригінальну методику побудови траєкторій деформування з використанням базисної сплайн-функції на основі поєднання синуса та дотичної. Після геометричних перетворень функції побудовано модель траєкторії, яка також містить три параметри. Числове моделювання підтвердило здатність цієї моделі описувати характер змін напружено-деформованого стану під час технологічних операцій.

Завдяки отриманим результатам побудовано графічні залежності, що відображають накопичення пошкоджень до граничного стану для заготовок зі сталі 10 та І4ХІ7Н2. Використовуючи розроблені моделі, можна здійснювати прогнозування деформовності шляхом варіації параметрів, що характеризують як властивості матеріалу, так і технологічні умови. Це відкриває можливості для більш точного визначення ресурсу пластичності та граничних пластичних деформацій у виробничих процесах ШО.

Четвертий розділ об'єднує два важливих аспекти дослідження: комп'ютерне та фізичне моделювання процесу торцевого ШО складнопрофільних деталей. Застосування скінченно-елементного аналізу дозволило дослідити процес формозмінення заготовки, а також розподіл накопичених пластичних деформацій у її об'ємі. Встановлено, що програмні комплекси достовірно ілюструють геометричне формування деталі, однак не забезпечують належної точності при оцінці напруженого стану та процесів пошкодження матеріалу. З метою реалізації фізичного моделювання розроблено обкочувальну приставку з конічним валком, яку адаптовано до конструкції токарно-гвинторізного верстата. В якості об'єкта дослідження обрано деталь типу «Доїльний стакан», що дозволило експериментально змоделювати процес формування її нижньої частини. За результатами досліджень отримано технологічні рекомендації щодо вибору геометричних і кінематичних параметрів процесу: кута між віссю валка та віссю заготовки, величини радіального зміщення вершини валка та швидкості обертання шпінделя.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

- показано що низка найвідоміших у всьому світі критеріїв руйнування є імплементацією різних апроксимацій кривої або поверхні граничних деформацій при стаціонарному деформуванні у найпростішу модель підсумовування пошкоджень за лінійним принципом;

- встановлено зв'язок між емпіричним критерієм руйнування матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні та теорією підсумовування пошкоджень, що дозволяє узагальнити та теоретично обґрунтувати емпіричні спостереження;

- виявлено домінуючий вплив граничної деформації при рівномірному стисненні на форму граничної лінії в координатах «осьова – колово логарифмічні деформації» та показано, що зі збільшенням граничної деформації при рівномірному стисненні за незмінності інших умов форма граничної лінії наближається до прямої, що є підтвердженням емпіричного

критерію руйнування.

Отримали подальший розвиток:

- побудова аналітичних представлень параметричними співвідношеннями траєкторій деформування в координатах «показник напруженого стану» - «накопичена пластична деформація» часток матеріалу небезпечних ділянок заготовки під час процесів прямого витискування складнопрофільних заготовок методом штампування обкочуванням.

- розроблено дві нові моделі деформовності заготовок, що дозволяють описати процес накопичення пошкоджень у небезпечних зонах заготовки під час прямого витискування методом штампування обкочуванням. Кожна з моделей включає три базисні елементи: а) аналітичне представлення траєкторії деформування в координатах «показник напруженого стану – накопичена пластична деформація»; б) апроксимація кривої граничних деформацій, що враховує особливості матеріалу; в) модель підсумовування пошкоджень, що забезпечує прогнозування граничного стану матеріалу.

- під час проведення комплексного імітаційного моделювання процесу формоутворення складнопрофільної деталі та напружено-деформованого стану матеріалу заготовок при торцевому ШО встановлено, що сучасні програмні комплекси, засновані на скінчено-елементному аналізі, здатні адекватно відтворювати процес формозмінення заготовки та розподіл накопичених пластичних деформацій, що підтверджує їхню ефективність для дослідження подібних технологічних процесів. В той же час виявлено обмеження в точності моделювання напруженого стану та накопичення пошкоджень у матеріалі заготовки, що потребує подальшого вдосконалення моделей.

Ключові слова: штампування обкочуванням, складнопрофільні заготовки, тензор швидкостей деформацій, напружено-деформований стан, використаний ресурс пластичності, динамічне навантаження, пластичність, критерій руйнування, пружна деформація, якість, механічні властивості, різання ножицями, штамп, заготовка, механіка.

ABSTRACT

Kolisnyk M.A. Development of Rolling Stamping Processes Based on the Analysis of the Mechanics of Forming Complex-Profiled Products. - Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for obtaining the educational and scientific degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty 132 Materials Science (13 Mechanical Engineering) - Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, 2025.

This work is aimed at solving the urgent scientific and technical problem of developing and implementing new resource-saving technological processes of metalworking and increasing production efficiency on their basis, and therefore is one of the most important tasks of modern mechanical engineering. An important direction of resource saving and improving the quality of products in metalworking is the development of low-waste technologies of pressure processing of materials (PTM). This, in turn, requires further development of methods of forming and development of appropriate equipment for their implementation.

It is worth noting that the main factors that prevent the widespread use of PTM methods include: limited stability of equipment due to high contact stresses; destruction of workpieces due to insufficient plasticity of metals; deviation from the given shape due to the loss of stability by the workpiece. The accuracy of predicting the technological capabilities of OMT processes, as well as the quality and technological heredity of finished products, is largely determined by the kinematics and deformation history, for the establishment of which it is necessary to have reliable information about the stress-strain state and deformability of the material of the blanks during the forming process.

Hollow parts of a stepped shape with external flanges and internal collars, as well as other complex-profile products, are quite common in the agro-industrial complex. Such parts are produced using direct and reverse operations, extrusion, dispensing and compression of pipe blanks, including with the use of welding operations. The use of such operations requires the manufacture of expensive equipment, which may be economically unjustified in the case of small-scale

production. The formation of flanges, collars and complex-profile hollow elements is especially difficult, which further increases costs and complicates the production process.

Previous studies have proven that an effective process for the production of these products can be rolling stamping, in which relatively small deformation forces arise, and the material flow conditions in the contact zone of the tool with the workpiece contribute to the formation of thin-walled elements of complex-shaped workpieces.

The simplicity of the equipment and the versatility of the equipment allow the use of rolling stamping processes for the production of a wide range of these products. At the same time, the effective use of rolling stamping is hindered by the insufficiently developed computational apparatus of the mechanics of forming (kinematics of metal flow, accumulation of damage and the stress-strain state of the workpieces), which would allow determining the parameters of the technological process at the design stage to ensure the necessary deformation conditions.

In the first section of this work, a comprehensive analysis of rolling stamping processes on ball-moving presses and on end-rolling installations used in modern technologies for the production of complex parts from metals and alloys is performed. The main schemes of SH are highlighted, which provide the necessary conditions for forming blanks by plastic deformation, in particular, the schemes of deposition, direct and reverse extrusion.

SH processes on end-rolling equipment are carried out using two types of rolls: cylindrical and conical. An important feature of end-rolling processes is the possibility of forming a directed flow of the workpiece material, which is achieved by radial displacement of the top of the conical roll and its position relative to the axis of rotation of the workpiece.

Rational selection of SH process parameters allows forming internal and external shoulders and flanges with a large ratio of their diameter to the diameter of the main part of the workpiece.

It is noted that the development of resource-saving technologies is one of the key areas of modern engineering, including materials science. Reducing energy, material and technological losses is part of sustainable development and environmentally friendly production. The considered SH processes are resource-saving and inextricably linked to plastic deformation - a fundamental method of forming, which is closely related to the internal structure of the material, its mechanical properties and the ability to further operate.

During intensive plastic deformation, microdamages (voids, microcracks) accumulate, which are a prerequisite for destruction. Assessment of these processes is an important condition for ensuring the reliability of final products. Modeling the deformability of workpieces during plastic deformation allows us to assess the level of accumulated material damage, which, in turn, affects the level of mechanical characteristics of the resulting parts and, therefore, is an important task of materials science.

In this context, the need for the application of modern methods of stress-strain state analysis (SSSA) and modeling of the limit state of the material, as well as the need for a comparative analysis of the fracture models during plastic deformation common in the world literature, is substantiated.

In the second section of the work, a comprehensive analysis of the current state of the study of material fracture processes under conditions of plastic deformation is carried out. It is established that the scientific literature is dominated by works devoted to the ultimate deformations of materials under stationary plastic deformation, while much less attention is paid to the modeling of deformation trajectories of material macroparticles in dangerous zones of the workpiece and the processes of damage summation. It is estimated that most of the known fracture models presented in the literature by integral representations are, in fact, different variants of the functional dependence of the ultimate deformations on one or two dimensionless indicators of the stress-strain state under stationary deformation, integrated into a model based on the linear principle of damage accumulation. This

approach allows us to identify a wide range of fracture patterns characteristic of all of the above models in some cases of unsteady deformation.

Particular attention is paid to establishing the relationship between empirical failure criteria and damage summation theory models, in particular, the influence of the limiting deformation under uniform compression on the shape of the failure line in the corresponding coordinates was revealed. Analysis of sources with high scientometric indicators indicates the relevance of the topic and its compliance with the international level. The results obtained not only clarify existing ideas, but also contribute to the expansion of scientific understanding, which is a key feature of the innovative nature of the study.

The third section considers the stress-strain state of the material of the workpieces as one of the key characteristics necessary for assessing deformability and determining the force parameters of the SH processes. The study focuses on the processes of direct and reverse extrusion, in particular on the example of forming the end teeth of a gear coupling. Theoretical study of the stress state at the tip of the tooth, performed using the theory of plastic bending of a strip, made it possible to determine the nature of the distribution of the stress state indicator in the plastic region. It was found that the most rigid stress state is concentrated at the tip of the teeth, where minimal deformations are observed, while maximum deformations occur at the base of the tooth under conditions close to comprehensive compression. Based on the obtained data, deformation trajectories of metal particles in the coordinates “stress state indicator - accumulated deformation” were constructed, which serves as the basis for creating models of the deformability of workpieces during SH processes. Two models have been developed to describe the accumulation of material damage in the dangerous zones of the workpiece during direct and reverse extrusion. Each model consists of three components: an analytical description of the deformation trajectory, an approximation of the limit deformation curve, and a damage summation model. In both models, a three-parameter form of the limit deformation curve was used, which is characteristic of stationary deformation, and as summation models, a power model and its variants were chosen:

the V. A. Ogorodnikov model and a model with a linear principle of damage accumulation.

Particular attention is paid to the formation of parametric equations of deformation trajectories. For direct extrusion, functional dependencies between the stress state indicator, accumulated deformation, and the trajectory parameter were constructed. It was found that the value of the nonlinearity indicator of damage accumulation, characteristic of these trajectories, is positive and less than unity. At the same time, numerical experiments with larger values of this indicator revealed a monotonic increase in the ultimate deformation, which emphasizes the importance of accurate selection of model parameters.

For reverse extrusion of flanges by the SH method, an original method for constructing deformation trajectories using a basic spline function based on a combination of sine and tangent was proposed. After geometric transformations of the function, a trajectory model was constructed, which also contains three parameters. Numerical modeling confirmed the ability of this model to describe the nature of changes in the stress-strain state during technological operations.

Thanks to the results obtained, graphical dependencies were constructed that reflect the accumulation of damage to the ultimate state for blanks made of steel 10 and I4XI7N2. Using the developed models, it is possible to predict deformability by varying the parameters that characterize both material properties and technological conditions. This opens up opportunities for more accurate determination of the plasticity resource and ultimate plastic deformations in SH production processes.

The fourth section combines two important aspects of the study: computer and physical modeling of the process of end-face SH of complex-profile parts. The use of finite element analysis allowed us to study the process of deformation of the workpiece, as well as the distribution of accumulated plastic deformations in its volume. It was established that software complexes reliably illustrate the geometric formation of the part, but do not provide the necessary accuracy in assessing the stress state and material damage processes. In order to implement physical modeling, a rolling attachment with a conical roll was developed, which was adapted to the

design of a screw-cutting lathe. A part of the “Milking Cup” type was chosen as the object of study, which allowed us to experimentally model the process of forming its lower part. According to the results of the research, technological recommendations were obtained for the selection of geometric and kinematic parameters of the process: the angle between the roll axis and the workpiece axis, the magnitude of the radial displacement of the roll tip, and the spindle rotation speed.

Scientific novelty of the obtained results:

For the first time:

- it is shown that a number of the most famous fracture criteria in the world are implementations of various approximations of the curve or surface of limit deformations during stationary deformation into the simplest model of damage summation according to the linear principle;

- a connection is established between the empirical criterion for the material failure of the lateral surface of cylindrical specimens during end compression and the theory of damage summation, which allows us to generalize and theoretically substantiate empirical observations;

- the dominant influence of the limit deformation during uniform compression on the shape of the limit line in the coordinates "axial - circular logarithmic deformations" is revealed and it is shown that with an increase in the limit deformation during uniform compression, with other conditions remaining unchanged, the shape of the limit line approaches a straight line, which is a confirmation of the empirical criterion for fracture;

Further developments include:

- construction of analytical representations by parametric ratios of deformation trajectories in the coordinates "stress state indicator" - "accumulated plastic deformation" of material particles of dangerous areas of the workpiece during the processes of direct extrusion of complex-profile workpieces by the rolling-stamping method.

- two new models of workpiece deformability have been developed, which allow describing the process of damage accumulation in dangerous areas of the workpiece during direct extrusion by the rolling-stamping method. Each of the models includes three basic elements: a) analytical representation of the deformation trajectory in the coordinates "stress state indicator - accumulated plastic deformation"; b) approximation of the limit deformation curve, which takes into account the characteristics of the material; c) a damage summation model, which provides prediction of the limit state of the material.

- during the complex simulation modeling of the process of forming a complex-profile part and the stress-strain state of the workpiece material during end-face machining, it was established that modern software complexes based on finite element analysis are capable of adequately reproducing the process of workpiece deformation and the distribution of accumulated plastic deformations, which confirms their effectiveness for the study of similar technological processes. At the same time, limitations in the accuracy of modeling the stress state and the accumulation of damage in the workpiece material were identified, which requires further improvement of the models.

Keywords: stamping by rolling, complex-profile blanks, strain rate tensor, stress-strain state, used plasticity resource, dynamic loading, plasticity, failure criterion, elastic deformation, quality, mechanical properties, shearing, die, blank, mechanics.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у баз даних Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Shtuts A., **Kolisnyk M.**, Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 844. P. 168-181. (1,023 друк. арк., особистий внесок: проведено аналіз експериментальних досліджень процесів штампування обкочуванням трубчастих і циліндричних заготовок – 0,17 друк. арк.).

2. Matvijchuk V., Shtuts A., **Kolisnyk M.**, Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. № 66(1). P. 51–58. (1,1 друк. арк., особистий внесок: проведено комп'ютерне моделювання процесу штампування обкочуванням трубчастих і циліндричних заготовок із використанням методів чисельного аналізу – 0,22 друк. арк.).

3. Mykhalevych V.M., **Kolisnyk M.A.**, Shtuts A.A. Study of the Stress–Strain State of the Material of the Blanks during Plastic Stamping by Rolling. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2025. Vol. 47, №. 1. P. 57-81 (1,35 друк. арк., особистий внесок: досліджено напружено-деформований стан матеріалу заготовок під час пластичного штампування обкочуванням, проведено аналіз отриманих результатів – 0,45 друк. арк.).

Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», включених до міжнародної наукометричної бази даних (Index Copernicus)

4. Матвійчук В.А., **Колісник М.А.**, Штуць А.А. Дослідження напружено-деформовного стану матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням. *Техніка, енергетика,*

транспорт АПК. 2018. №3(102). С. 77-84. (0,81 друк. арк., особистий внесок: проведено дослідження напружено-деформовного стану матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням, здійснено чисельний аналіз та оцінку результатів – 0,26 друк. арк.).

5. Матвійчук В.А., **Колісник М.А.**, Любін М.В. Розробка і дослідження процесів штампування обкочуванням складно профільних заготовок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2018. № 4 (103). С. 56-63. (0,93 друк. арк., особистий внесок: досліджено процеси штампування обкочуванням складно профільних заготовок, проведено аналіз технологічних параметрів та оцінку ефективності процесу – 0,31 друк. арк.).*

6. **Колісник М.А.**, Служалюк М.О. Дослідження методики розрахунку і вибору технологічних параметрів штампування обкочуванням складнопрофільних виробів з використання комп'ютерного моделювання. *Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020. № 2 (108) С. 123-133. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-1-14. (0,8 друк. арк., особистий внесок: розроблено методику розрахунку і вибору технологічних параметрів штампування обкочуванням складнопрофільних виробів за допомогою комп'ютерного моделювання, здійснено аналіз результатів і оптимізацію процесу – 0,78 друк. арк.).*

7. Матвійчук В.А., Гайдамак О.Л., **Колісник М.А.** Підвищення службових характеристик поверхневого шару деталей шляхом застосування поверхневого пластичного деформування і холодного газодинамічного напилення. *Вібрації в техніці та технологіях. 2020. № 2 (97). С. 90-100. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-2-10. (0,85 друк. арк., особистий внесок: досліджено вплив поверхневого пластичного деформування та холодного газодинамічного напилення на службові характеристики поверхневого шару деталей, проведено аналіз ефективності застосованих технологій – 0,28 друк. арк.).*

8. Matviychuk V., **Kolisnyk M.** Development of the combined technological process of blank stacks flanges formation by the method of stamping by rolling and

rotary drawing. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 111-121. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-11. (0,66 друк. арк., особистий внесок: проаналізовано комбінований технологічний процес формоутворення фланцевих заготовок методом штампування обкочуванням і ротаційного витягування, проведено аналіз ефективності та оптимізацію процесу – 0,33 друк. арк.).

9. Матвійчук В.А., **Колісник М.А.** Розробка технологічного процесу формування широких фланців на листових заготовках методом штампування обкочуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 1 (112). С. 38-45. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-5. (0,49 друк. арк., особистий внесок: проаналізовано технологічний процес формоутворення широких фланців на листових заготовках методом штампування обкочуванням, проведено дослідження ефективності процесу – 0,245 друк. арк.).

10. Матвійчук В.А., **Колісник М.А.** Формування якісних показників виробів процесами штампування обкочуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 4 (115). С. 75-83. DOI:10.37128/2520-6168-2021-4-8. (0,72 друк. арк., особистий внесок: досліджено вплив параметрів процесу штампування обкочуванням на якісні показники виробів, проведено аналіз отриманих результатів – 0,36 друк. арк.).

11. Матвійчук В.А., Михалевич В.М., **Колісник М.А.** Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом штампування обкочуванням. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 1 (104). С. 81-91. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-10. (0,71 друк. арк., особистий внесок: проведено оцінку деформовності матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом штампування обкочуванням, здійснено аналіз отриманих результатів – 0,24 друк. арк.).

12. Михалевич В.М., Матвійчук В.А., **Колісник М.А.** Оцінка деформовності матеріалу при висаджуванні елементів заготовок методом штампування обкочуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 2(117). С. 104-114. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-2-11. (1,24 друк. арк.,

особистий внесок: проведено оцінку деформовності матеріалу при висаджуванні елементів заготовок методом штампування обкочуванням, – 0,41 друк. арк.).

13. Матвійчук В.А., **Колісник М.А.**, Штуць А.А. Побудова кривих граничних деформацій матеріалів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2 (105). С. 84-90. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-9. (0,9 друк. арк., *особистий внесок: проведено дослідження та побудову кривих граничних деформацій матеріалів та їх впливу на технологічні процеси – 0,3 друк. арк.).*

14. Михалевич В.М. Матвійчук В.А. **Колісник М.А.** Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому видавлюванні методом штампування обкочуванням. *Обробка матеріалів тиском*. 2022. № 1 (51). С. 87-97. DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)87. (1,21 друк. арк., *особистий внесок: проведено оцінку деформовності матеріалу заготовок при прямому видавлюванні методом штампування обкочуванням, здійснено аналіз результатів щодо оптимізації процесу – 0,41 друк. арк.).*

15. Михалевич В.М., **Штуць А.А.**, Колісник М.А. Дослідження процесів штампування обкочуванням за рахунок аналізу моделювання деформовності матеріалу заготовок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 3 (122). С. 22-34. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-3. (1,41 друк. арк., *особистий внесок: проведено аналіз моделювання деформовності матеріалу заготовок при штампуванні обкочуванням, здійснено дослідження впливу технологічних параметрів на формоутворення – 0,5 друк. арк.).*

16. Ярошенко Л.В., **Колісник М.А.**, Штуць А.А., Присяжнюк Ю.С. Оцінка деформаційної стійкості матеріалу заготовок під час прямого витискування за допомогою методу штампування. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 4 (111). С. 54-67. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-4-8. (1,21 друк. арк., *особистий внесок: проведено оцінку деформаційної стійкості матеріалу заготовок під час прямого витискування методом штампування обкочуванням щодо підвищення стійкості матеріалу – 0,4 друк. арк.).*

17. Михалевич В.М., Штуць А.А., **Колісник М.А.** Дослідження

технологічних процесів штампування деталей типу фланець на основі застосування способів комбінованого видавлювання. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 46-57. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-6. (1,13 друк. арк., особистий внесок: проведено дослідження технологічних процесів штампування деталей типу фланець із використанням способів комбінованого видавлювання, здійснено аналіз ефективності процесу – 0,38 друк. арк.).

18. Михалевич В.М., Добранюк Ю.В., Тютюнник О.І., **Колісник М.А.** Лінійні та нелінійні моделі в теорії підсумовування пошкоджень. *Обробка матеріалів тиском*. 2024. № 1 (53). С. 100-108. [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)100](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)100). (0,86 друк. арк., особистий внесок: проведено аналіз лінійних і нелінійних моделей у теорії підсумовування пошкоджень – 0,215 друк. арк.).

Інші наукові видання інших держав, що засвідчують апробацію результатів дисертаційної роботи

19. Shtuts A., **Kolisnyk M.**, Yavdyk V. Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces' formation. *Motrol*. 2018. Vol. 20. №1. 19-25. (1,07 друк. арк., особистий внесок: досліджено вплив технологічних параметрів на механіку формоутворення заготовок під час штампування обкочуванням, проведено аналіз та узагальнення отриманих даних – 0,364 друк. арк.).

20. Kupchuk I. **Kolisnyk M.**, Shtuts A., Paladii M. Development of the technological process of forming rings from sheet samples by stamping rollers and rotary hood. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences*. 2021. Vol. 14 (63), №2. P. 1-13. (1,17 друк. арк., особистий внесок: проведено аналіз формування кілець із листових заготовок методом штампування обкочуванням – 0,29 друк. арк.).

21. Kupchuk I., **Kolisnyk M.**, Shtuts A., Paladii M., Didyk A. Experimental evaluation stress-strain state for billets during rolling stamping by rollers.

Colloquium-journal. 2021. № 16 (103). P. 40-48. <https://doi.org/10.24412/2520-6990-2021-16103-40-48>. (0,75 друк. арк., особистий внесок: проведено експериментальну оцінку напружено-деформованого стану заготовок під час штампування обкочуванням – 0,15 друк. арк.).

22. Shtuts A., **Kolisnyk M.** Study of the influence of technological parameters on the mechanics of shaping of billets using roll stamping processes. *Agricultural engineering*. 2022. Vol. 54, P. 62-72. <https://doi.org/10.15544/ageng.2022.54.7> (1,1 друк. арк., особистий внесок: досліджено вплив технологічних параметрів на механіку формоутворення заготовок при штампуванні обкочуванням, здійснено аналіз технологічних процесів та розроблено рекомендації для їх покращення – 0,55 друк. арк.).

Свідоцтво авторського права на твір

23. Полевода Ю.А., **Колісник М.А.**, Штуць А.А., Михалевич В.М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Конструктивна схема обкочувального інструментального блоку з конічним валком для виготовлення заготовок методом штампування обкочуванням». № 127208. від 10.06.2024; заяв. № cr0677100624. Від 31.07.2024 р.

Матеріали конференцій

24. **Колісник М. А.** Дослідження напружено-деформованого стану складнопрофільних заготовок після штампування обкочуванням. *Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК*: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції, 28-30 листопада 2017 року. Вінниця, 2017. С. 218-219.

25. **Колісник М. А.** Дослідження енергозберігаючих технологій обробки металів тиском за допомогою індукційного нагріву. *Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва*: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 30 листопада

2017 року. Тернопіль, 2017. С. 321-323.

26. **Колісник М. А.** Дослідження стану матеріалу при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням. *Молодь і технічний прогрес в АПК: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*, 4 квітня 2019 року. Харків, 2019. С. 17-18.

27. **Колісник М. А.** Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом штампування обкочуванням. *Теоретичні та прикладні задачі обробки металів тиском і автотехнічних експертиз: матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту-2021»*, 13–15 травня 2021. Вінниця, ВНТУ, 2021. С. 102-105.

28. **Колісник М. А.** Розробка процесу формування широких фланців на листових заготовках методом штампування обкочуванням. *Теоретичні та прикладні задачі обробки металів тиском і автотехнічних експертиз: матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту-2021»*, 13–15 травня 2021. Вінниця, ВНТУ, 2021. С. 213-214.

29. **Колісник М. А.** Спосіб моделювання траєкторії деформацій при штампуванні обкочуванням. *Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності. матеріали Міжнародної науково-методичної Інтернет-конференції*. 11-12 жовтня 2022 р. Вінниця, ВНТУ, 2022. С. 82-86. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/pmovc/pmovc22/paper/viewFile/16379/13790>.

30. **Колісник М. А.** Співставлення емпіричного критерія руйнування з теорією підсумовування пошкоджень. *Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності. матеріали IV Міжнародної науково-методичної інтернет-конференції*, 20-22 червня 2024 р. С. 73-75. Режим доступу: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/837/1460/2734-1>.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	25
ВСТУП	26
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПРОЦЕСИ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ, ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	33
1.1. Особливості розвитку і впровадження інноваційних процесів штампування обкочуванням деталей на сферорухомих пресах.....	33
1.2. Особливості розвитку і впровадження інноваційних процесів штампування обкочуванням деталей на верстатах торцевого розкочування.	42
1.3. Теорія підсумування пошкоджень в процесах пластичного деформування та критерії руйнування	47
1.3.1. Основні положення теорії підсумування пошкоджень в процесах пластичного деформування.....	47
1.3.2. Моделі руйнування	51
1.4. Висновки до 1 розділу	53
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДОМИХ КРИТЕРІЇВ РУЙНУВАННЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛІВ, ЩО ПІДЛЯГАЮТЬ ШТАМПУВАННЮ ОБКОЧУВАННЯМ.....	55
2.1. Дослідження відомих критеріїв руйнування у їх взаємозв'язку з теорією підсумовування пошкоджень.....	55
2.1.1. Відомі критерії руйнування та криві граничних пластичних деформацій при стаціонарному деформуванні за умови плоского напруженого стану.....	55
2.1.2. Траєкторії деформування при торцевому стисненні. Емпіричний критерій руйнування.....	69
2.2. Побудова кривих граничних деформацій для матеріалів, що підлягають деформуванню методом ШО	72
2.3. Висновки до 2 розділу	81
РОЗДІЛ 3. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТА ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК У ПРОЦЕСАХ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ	83

	24
3.1. Методи аналізу напружено-деформованого стану в процесах ШО	83
3.2. Аналіз результатів дослідження НДС матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом ШО.....	90
3.3. Аналіз результатів дослідження НДС матеріалу заготовок при прямому та зворотному витискуванні методом ШО.....	105
3.4. Феноменологічні критерії деформовності металів. Визначення ресурсу пластичності.....	109
3.5. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням.....	114
3.6. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при зворотньому витискуванні методом штампування обкочуванням.....	120
3.7. Висновки до 3 розділу	132
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ТА ФІЗИЧНЕ І 3D МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕТОДОМ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ	136
4.1. Комп'ютерне моделювання процесу формоутворення складно профільної деталі та напружено-деформованого стану матеріалу заготовок при торцевому штампуванні обкочуванням	136
4.2. Вибір базового верстата та розробка додаткового устаткування для штампування обкочуванням	143
4.3. Технологічні можливості та технічні вимоги до процесу формування нижньої частини деталі типу «стакан» штампуванням обкочуванням	149
4.3.1. Вибір деталі для проведення фізичного моделювання	149
4.3.2. Фізичне моделювання виготовлення ШО нижньої частини деталі типу «стакан».....	151
4.4. Висновки до 4 розділу	155
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	156
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	160
ДОДАТКИ.....	179

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ШО – штампування обкочуванням

МНТК – міжнародна науково-технічна конференція.

НДР – науково-дослідна робота.

МСЕ – метод скінченних елементів.

ОМТ – обробка металів тиском.

НДС – напружено-деформований стан.

ОД – осередок деформування.

КВМ – коефіцієнт використання металу.

КГШП – кривошипно гарячі штампувальні пресахи.

ХТР – Холодне торцеве розкочування.

ВСТУП

Важливою проблемою на сучасному етапі формування вітчизняної економіки є виробництво конкурентноспроможної продукції. Забезпечити високу якість і низьку вартість продукції можна створенням і впровадженням у промисловість маловідходних, енергозберігаючих технологій. Досягти цього в області обробки металів тиском можна впровадженням технологічних процесів із локальним прикладенням деформуючого зусилля. Саме до таких процесів належить штампування обкочуванням (ШО). До переваг цих процесів потрібно віднести екологічну чистоту, безшумність, низьку вартість та універсальність обладнання, високу якість готових виробів, можливість отримання деталей, штампування яких звичайними методами ускладнене чи неможливе. Це дозволяє віднести процеси ШО до ресурсозберігаючих, розвиток яких є одним з найперспективніших напрямків в обробці металів тиском.

Отже, можна сформулювати три важливі задачі матеріалознавства, зазначені у тексті:

1. Розвиток ресурсозберігаючих технологій як складової сталого й екологічно орієнтованого виробництва.
2. Оцінка накопичення мікропошкоджень при інтенсивному пластичному деформуванні для забезпечення надійності виробів.
3. Моделювання деформовності заготовок з урахуванням пошкоджень, що впливають на механічні властивості кінцевих деталей.

В той же час широкому застосуванню процесів ШО у виробництві заважає недостатньо розвинутий розрахунковий апарат механіки формоутворення (кінематики течії металу, накопичення пошкоджень та напружено-деформованого стану заготовок), що перешкоджає на стадії проектування визначати параметри технологічного процесу для забезпечення необхідних умов деформування.

Значний внесок у розвиток і дослідження процесів ШО внесено завдяки

працям: В. М. Михалевича, В. А. Матвійчука, С. П. Гожія, Л. Т. Кривди, Ю. В. Добранюка, К. К. Єкімова, С. І. Сухорукова, В. О. Краєвського., А. А. Штуця та багатьох інших відчизняних науковців [72, 73, 95, 96, 97, 100, 101, 101, 102, 105, 109, 157].

Метою дослідження є розвиток процесів штампування обкочуванням шляхом удосконалення розрахункового апарату механіки формозмінення заготовок у схемах, витискування та торцевого обкочування, а також вдосконалення конструкції обкочувального інструменту для забезпечення стабільної якості виробів.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані *такі задачі роботи*:

1) Обґрунтувати вибір підходу до оцінки граничного стану матеріалу заготовок у процесах штампування обкочуванням шляхом аналізу найбільш поширених у світовій літературі критеріїв руйнування та їх взаємозв'язку з теорією підсумовування пошкоджень.

2) Дослідити напружено-деформований стан матеріалу заготовки під час формування складнопрофільних виробів методом прямого витискування за методом ШО, а також побудувати аналітичні вирази для рівнянь траєкторій деформування часток матеріалу небезпечних ділянок заготовки.

3) Розробка моделей деформовності для описання накопичення пошкоджень у матеріалі небезпечних ділянок заготовки під час процесів прямого витискування методом штампування обкочуванням, проведення відповідного моделювання, а також дослідження ефективності комп'ютерного моделювання для оцінки та порівняння результатів прогнозування напружено-деформованого стану й пошкоджень у матеріалі.

4) Розробити експериментальне обладнання та вибрати матеріали для досліджування процесів штампування обкочуванням, здійснити фізичне моделювання процесу ШО та розробити рекомендації щодо проектування процесів формування складнопрофільних виробів методом ШО.

Об'єкт дослідження– процеси штампування обкочуванням.

Предмет дослідження. Механіка формоутворення складнопрофільних

виробів з циліндричних заготовок методом ШО за різними схемами, напружено-деформований стан, оцінка придатності матеріалу заготовки піддаватися деформуванню з огляду на можливе тріщино утворення та розвиток процесів ШО на цій основі.

Методи дослідження. Базуються на використанні механіки суцільного середовища, теорії пластичності, теорії підсумовування пошкоджень та феноменологічної теорії деформованості. Для аналізу процесів ШО використовуються різні підходи: теоретичні, які включають аналітичну геометрію, лінійну алгебру, математичний аналіз та математичну статистику для розробки математичних моделей, обробки експериментальних даних та апроксимації траєкторії деформування; експериментально-розрахункові методи, такі як метод подільних сіток; числові методи, зокрема метод скінченних елементів за допомогою програмного комплексу DEFORM-3D для аналізу формозміни та напружено-деформованого стану заготовок; та експериментальні методи, що включають проведення натурних експериментів зі ШО в лабораторних умовах, а також побудову кривих граничних деформацій.

Наукова новизна полягає у:

Вперше:

- показано що низка найвідоміших у всьому світі критеріїв руйнування є імплементацією різних апроксимацій кривої або поверхні граничних деформацій при стаціонарному деформуванні у найпростішу модель підсумовування пошкоджень за лінійним принципом;

- встановлено зв'язок між емпіричним критерієм руйнування матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні та теорією підсумовування пошкоджень, що дозволяє узагальнити та теоретично обґрунтувати емпіричні спостереження;

- виявлено домінуючий вплив граничної деформації при рівномірному стисненні на форму граничної лінії в координатах «осьова – колово логарифмічні деформації» та показано, що зі збільшенням граничної деформації при рівномірному стисненні за незмінності інших умов форма

граничної лінії наближається до прямої, що є підтвердженням емпіричного критерію руйнування;

Отримали подальший розвиток:

- побудова аналітичних представлень параметричними співвідношеннями траєкторій деформування в координатах «показник напруженого стану» - «накопичена пластична деформація» часток матеріалу небезпечних ділянок заготовки під час процесів прямого витискування складнопрофільних заготовок методом штампування обкочуванням.

- розроблено дві нові моделі деформовності заготовок, що дозволяють описати процес накопичення пошкоджень у небезпечних зонах заготовки під час прямого витискування методом штампування обкочуванням. Кожна з моделей включає три базисні елементи: а) аналітичне представлення траєкторії деформування в координатах «показник напруженого стану – накопичена пластична деформація»; б) апроксимація кривої граничних деформацій, що враховує особливості матеріалу; в) модель підсумовування пошкоджень, що забезпечує прогнозування граничного стану матеріалу.

- під час проведення комплексного імітаційного моделювання процесу формоутворення складнопрофільної деталі та напружено-деформованого стану матеріалу заготовок при торцевому ШО встановлено, що сучасні програмні комплекси, засновані на скінчено-елементному аналізі, здатні адекватно відтворювати процес формозмінення заготовки та розподіл накопичених пластичних деформацій, що підтверджує їхню ефективність для дослідження подібних технологічних процесів. В той же час виявлено обмеження в точності моделювання напруженого стану та накопичення пошкоджень у матеріалі заготовки, що потребує подальшого вдосконалення моделей.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження, що складають основу дисертації, проведено у Вінницькому національному аграрному університеті (ВНАУ) в межах двох ініціативних науково-дослідних робіт на інженерно-технологічному факультеті «Розвиток процесів штампування обкочуванням на основі аналізу механіки формоутворення

складнопрофільних виробів» № ДР 0117U006830 (13.11.2017 р. по 21.12.2021 р.), «Розвиток процесів штампування обкочуванням на основі аналізу механіки формоутворення складнопрофільних виробів та створення поверхневих шарів деталей із застосуванням газодинамічного напилення» № ДР 0122U002110 (18.13.2022 р. по 03.2026 р.), із залученням дисертанта.

Дисертаційні дослідження проводились у відповідності до договорів між Вінницьким національним аграрним університетом, ТОВ «Агромаш-Калина» та ТОВ «Краснянське СП «Агромаш» про що свідчать акти впровадження в виробництво. Також впровадженою у навчально-методичний процес та наукову роботу кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки ВНАУ. Дані впровадження представлені в додатках Г, Д, Е.

Практична значимість роботи одержаних результатів досліджень, теоретичних узагальнень та розробок полягає у вирішенні проблем, що мають важливе прикладне значення, а саме, в розробці комбінованих схем процесів (штампування обкочуванням складно профільних виробів без руйнування та з визначеною залишковою пластичністю) ШО для отримання якісних складнопрофільних виробів:

- Для забезпечення фізичного моделювання процесу ШО складно профільних заготовок в лабораторних умовах розроблено та виготовлено оригінальну обкочувальну приставку з конічним обкочувальним валком для токарно-гвинторізних верстатів. Запропонована конструкція розширює експериментальні можливості дослідження процесу ШО та може бути використана для вдосконалення технології обробки в умовах промислових та навчально-дослідних лабораторій.

- Підтверджено можливість використання програмних комплексів для аналізу та оптимізації процесу торцевого штампування обкочуванням, що знижує потребу в дорогих експериментальних випробуваннях, в той же час, виявлені недоліки у відтворенні напруженого стану та пошкоджень можуть слугувати основою для подальшого вдосконалення існуючих програмних моделей, що покращить точність прогнозування залишкового ресурсу деталей;

- Отримані рекомендації щодо оптимального вибору технологічних

параметрів процесу ШО, що сприяє підвищенню якості формоутворення деталей типу «стакан» та можуть бути використані для вдосконалення виробничих процесів, зокрема у виготовленні деталей зі складною геометрією методом обкочування.

- Розроблені моделі та їх програмна реалізація в середовищі системи комп'ютерної математики забезпечують гнучке налаштування параметрів процесу (механічних властивостей матеріалу, режимів навантаження) та комплексний аналіз їхнього впливу на деформування заготовки. Зокрема, вони дозволяють розраховувати використаний ресурс пластичності матеріалу та визначати граничні деформації перед руйнуванням у небезпечних зонах заготовки під час прямого витискування методом ШО. Це значно прискорює процес оцінки, скорочує потребу у фізичних експериментах, мінімізує ризик передчасного виходу деталей з ладу та сприяє підвищенню їхньої довговічності.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно отримав результати теоретичних і експериментальних досліджень, що подаються на захист. Формулювання завдань та аналіз результатів були виконані спільно з науковим керівником та частково за участю співавторів публікацій.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались на науково-технічних конференціях позитивну оцінку від провідних науковців представлених у додатку Є: Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК» (28-30 листопада 2017 р., ВНАУ, Вінниця, Україна); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва» (30 листопада 2017 р., ТДСДС, Тернопіль, Україна); Міжнародній науково-практичній конференції «Молодь і технічний прогрес в АПК» (4 квітня 2019 р., ХНТУСГ, Харків, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інженерно-технологічне забезпечення аграрного сектору економіки: сучасний стан, проблеми та перспективи» (21-22 жовтня 2020 р., ВНАУ, Вінниця, Україна); Міжнародній науково-практичній

конференції «Проблеми та перспективи інноваційної діяльності агропромислової інженерії» (19-20 листопада 2020 р., ВНАУ, Вінниця, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Реалізація європейського зеленого курсу в Україні: погляд молодих учених» (14-15 травня 2021 р., ВНАУ, Вінниця, Україна); II Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту-2021» (13 – 15 травня 2021 р., ВНТУ, Вінниця, Україна); Міжнародній науково-методичній інтернет-конференції «Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності» (11-12 жовтня 2022 р., ВНТУ, Вінниця, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи агропромислової інженерії у контексті євроінтеграції» (19-20 жовтня 2023 р., ВНАУ, Вінниця, Україна); IV Міжнародній науково-методичній інтернет-конференції «Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності» (20-22 червня 2024 р. ВНТУ, Вінниця, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті глобальних викликів» (17-18 жовтня 2024 р., ВНАУ, Вінниця, Україна).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 30 наукових працях представлених у додатку Ж, у тому числі: 15 статей у наукових фахових виданнях України (категорії Б); 4 у фахових виданнях інших держав та 3 у наукових журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science Core Collection; 1 свідоцтво про авторське право на твір; 7 теза у збірнику доповідей наукових конференцій.

Обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел і додатків, що включає 198 сторінок, у тому числі додатків на 20 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 159 сторінок, містить 72 рисунки, 3 таблиці. Список використаних джерел нараховує 159 найменування на 19 сторінках.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПРОЦЕСИ ШТАМПУВАННЯ ОБКочУВАННЯМ, ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Особливості розвитку і впровадження інноваційних процесів штампування обкочуванням деталей на сферорухомих пресах

За останній час значного розвитку отримав такий метод локального ротаційного деформування, як штампування обкочуванням (ШО), що включає процеси сферо рухомого штампування і торцевого розкочування [82, 105, 158]. Унікальність даного методу полягає в тому, що він надає можливість реалізувати більшість схем традиційного штампування в умовах локального деформування. При цьому локалізація зони деформації і сприятливі умови деформування на контакті інструмента із заготовкою забезпечують істотне зниження зусилля деформування та потужності обладнання у порівнянні із традиційним штампуванням. Це дозволяє обробляти тиском у холодному стані сталі й сплави для отримання виробів складного профілю, що має певні переваги перед іншими традиційними методами обробки металів тиском (ОМТ).

Процес сферо рухомого штампування здійснюється на сферо рухомому пресі, кінематична схема якого представлена на рис. 1.1.

Обладнанням для сферо рухомого штампування служать спеціалізовані преси типу PXW-100 і PXW-160 зусиллям 1000 кН і 1600 кН, а також гідравлічні преси для штампування обкочуванням зусиллям 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10; 16; 25 МН.

Особливістю сферо рухомого штампування є те, що пунсон (валок) при дії на заготовку здійснює одночасно два рухи: поступальний, від повзуна преса та круговий рух від приводу механізму. При цьому заготовка залишається нерухомою, а пунсон своєю конічною поверхнею обкочує її торцеву частину.

Основна перевага такого методу ШО полягає в можливості економії металу. З цієї нагоди варто звернути увагу на обставину, яка полягає в тому, що вартість знімання стружки і вихідного металу тієї ж маси одного порядку.

Тому економія основних матеріалів у собівартості виробу подвоюється. Економія забезпечується навіть за майже однакової ціни металу й стружки, оскільки відпадають витрати на механічну обробку. Саме ці обставини, поряд з енергозбереженням за рахунок переходу на холодну обробку, визначають конкурентоздатність ШО, як особливого технологічного методу обробки тиском.

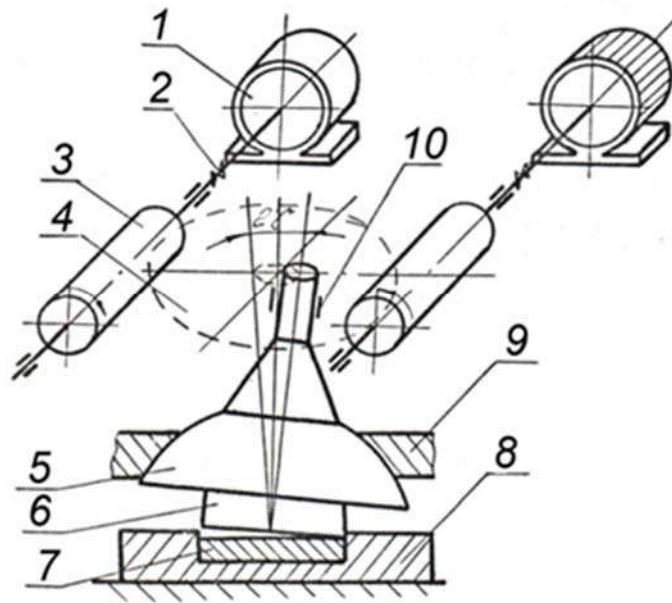


Рисунок 1.1 – Кінематична схема сферо рухомого механізму:

**1 - електродвигун, 2 - муфта, 3 - черв'як, 4 - черв'ячне колесо, 5 - водило,
6 - пуансон-валок, 7 - заготовка, 8 - матріця, 9,10 – підшипники**

Джерело: [82]

Загальна схема процесу ШО представлена на рис. 1.2 на прикладі осаджування циліндричної заготовки. Деформація заготовки 1 здійснюється між активним інструментом 2 (валком), що має конічну робочу поверхню, і нерухомим інструментом 3, що має плоску деформуючу поверхню. Валок 2 обкочується відносно вершини О. У залежності від рухів осі ОР відносноцентральної осі OS можливі різні види руху валка 2. Найбільш простим з реалізації рухом, що використовується при виготовленні деталей типу «диск», є круговий обертальний рух (цей вид відображено на рис. 1.2). При цьому величина нахилу осі валка 2 щодо центральної осі OS не

змінюється і складає кут γ . Для створення спіралеподібного руху валка кут γ поступово змінюється в межах від 0° до максимального значення. Для отримання деталей, що мають одну чи більше осей симетрії, застосовують покрокові коливальні рухи валка - планетарні, використовуються для отримання деталей типу зірочок і хрестовин. У цих випадках контакт між заготовкою й інструментом відбувається не по всій торцевій поверхні деталі, а лише по її частині. Зона пластичної деформації багаторазово переміщується по всьому об'єму заготовки [95, 97, 98].

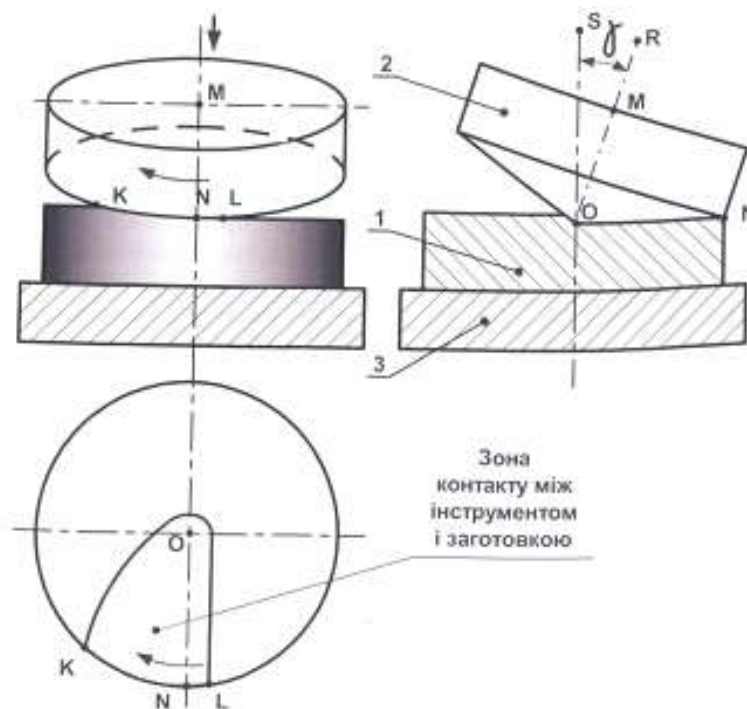


Рисунок 1.2 – Загальна схема штампування обкочуванням

Джерело: [95]

Схема навантаження й деформування методом ШО приводить до ряду позитивних ефектів [135]:

- зниження зусилля деформування в порівнянні з традиційними методами, що характеризуються більш динамічними навантаженнями, в 5...30 разів;
- зменшення впливу контактної тертя на плин матеріалу;

- досягнення рівномірності деформації, обумовлене тим, що осередок пластичної деформації при багаторазовому повторенні рівномірно охоплює весь об'єм деталі. Це особливо стосується виробів з великим співвідношенням розмірів діаметра до висоти;

- збільшення граничного ступеня деформації в порівнянні зі звичайним штампуванням на 10... 15%, а також можливістю виготовлення деталей, що неможливо отримати іншими методами обробки металів тиском через небезпеку руйнування заготовки чи інструмента.

- збільшення стійкості штампового оснащення за рахунок зниження впливу контактних сил тертя й питомих зусиль на інструменті;

- можливістю обробки в холодному стані деталей, що традиційно виготовляються гарячою й напівгарячою обробкою на устаткуванні з тими самими характеристиками;

- можливістю виготовлення деталей у холодному стані з доволі високими показниками точності та якості поверхні: шорсткість поверхні при холодній обробці відповідає $Ra\ 0,63... 1,25$, точність зовнішніх розмірів у межах $0,04...0,08$ мм. Це, в багатьох випадках, дозволяє позбутися наступної механічної обробки;

- створення технологічних процесів і устаткування, що відповідають високим вимогам безпеки й санітарним умовам праці, тому що процеси ШО відрізняються безшумністю, протіканням у холодному стані, можливістю механізації і автоматизації;

- зменшення розмірів, ваги й вартості обладнання та штампового оснащення. Зниження вартості інструмента обумовлено підвищенням його стійкості й тим, що одна із половин штампа виготовляється з простою (плоскою чи конічною) поверхнею. За даними фірми Bethlehem-Steel вартість штампової сталі для штампування обкочуванням на 30...50% нижче вартості високоміцних штампових сталей, що використовують при холодному штампуванні;

- можливістю отримання при обробці в холодному стані не тільки деталей з попередньо сформованими функціональними поверхнями, але й використання переваг холодного зміцнення, одержання оптимальної передбаченої мікроструктури. У зоні локальної деформації йде інтенсивний розвиток дислокаційних процесів, що супроводжуються утворенням і розвитком удосконаленої комірчастої структури;

- можливістю реалізації методом ШО широкого спектру операцій об'ємного й листового штампування (рис. 1.3).

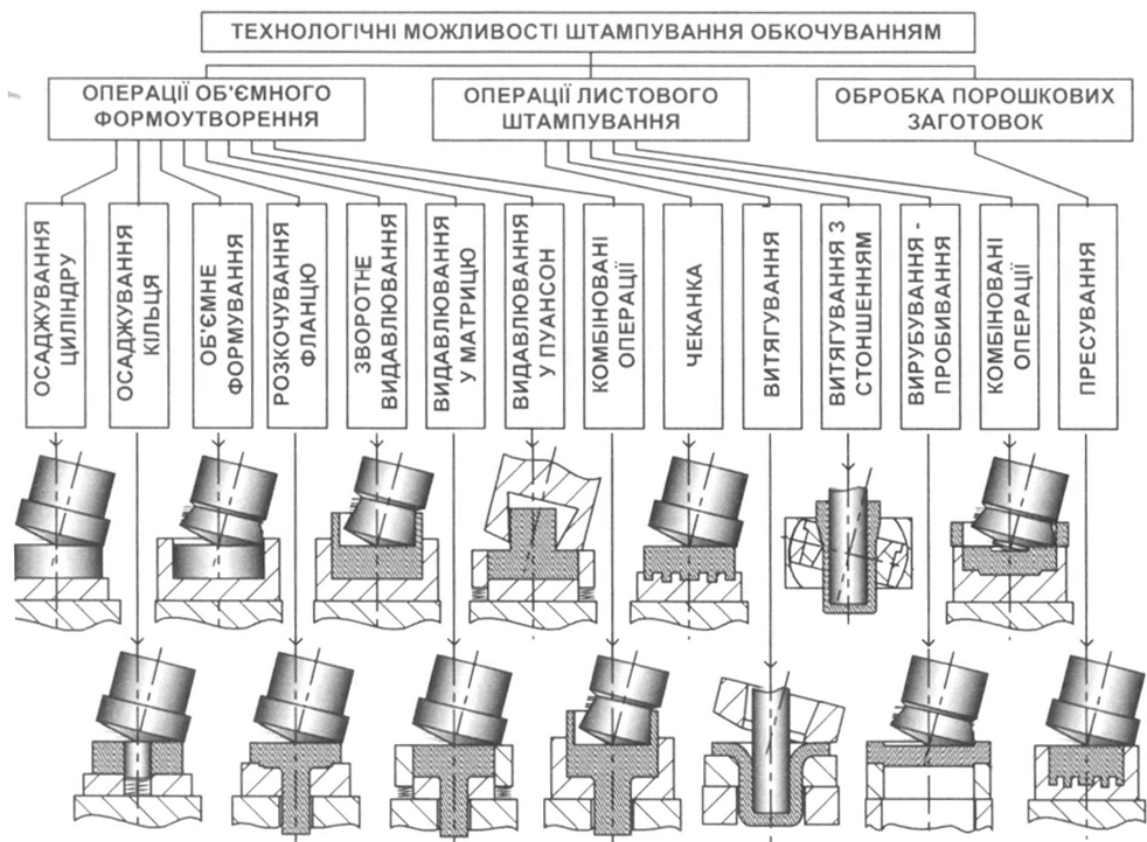


Рисунок 1.3 – Технологічні операції штампування обкочуванням
Джерело: [135]

Поряд із перерахованими перевагами ШО має і характерні недоліки:

- більш низька продуктивність у порівнянні з традиційними ковальсько-пресовими машинами. Час штампування сталюї деталі коливається в межах 6...24 с, що більше ніж при обробці на кривошипних гаряче штампувальних пресах (КГШП). Однак, з урахуванням витрат циклового часу на виготовлення

деталей на традиційних ковальсько-пресових машинах, що йдуть на нагрівання, штампування й видалення облою, час обробки за цими технологіями стає співмірним. Проте, слід зазначити, що коли йдеться про необхідність нагрівання для виготовлення певних деталей за традиційними технологіями наковальсько-пресових машинах головним чинником для порівняння вказаних технологій буде не час, а економічна ефективність в структурі якої тривалість операції буде нехтовно малою велечиною.

Для надання достатньої продуктивності методу ШО використовують спеціальні пристрої, що одночасно забезпечують роботу пресу в автоматичному режимі та розширюють технологічні можливості за рахунок обробки кільцевих деталей [71, 72]. У складі автоматичної лінії продуктивність устаткування для ШО складає 600 штук за годину при масі деталі 0,5...4,5 кг;

- деяка обмеженість щодо форми оброблюваних деталей. Наприклад, процес не забезпечує інтенсифікації радіального видавлювання в нерухому матрицю і, як наслідок, суттєво ускладнює його використання для отримання деталей, що мають складний двохсторонній торцевий рельєф. У ряді випадків ці проблеми вирішуються підбором форми вхідної заготовки, а для отримання деталей зі складною в плані конфігурацією чи виступами на торцевій поверхні застосовуються пристрої зі складним видом коливального руху інструмента.

Варто виділити характерні конструктивні риси деталей, що ефективно виготовляють методом ШО (рис. 1.4).

Насамперед, найбільший ефект досягається при виготовленні відносно тонких деталей або з тонкими елементами конструкції, що розглянуті вище. Деталі з такими конструктивними елементами мають широке розповсюдження і, одночасно, суттєві відмінності між собою.

Найбільш простим за організацією рухом для спеціалізованого обладнання є обертальний рух валка. Саме ця особливість призводить до зменшення витрат під час виробництві віссиметричних деталей.



Рисунок 1.4 – Класифікація деталей за формою, що можуть ефективно виготовлятися методом ШО

Джерело: [71]

У свою чергу, вісесиметричні в плані деталі мають розгалужені конструктивні особливості (див. рис. 1.4). Головною класифікаційною відмінністю є відсутність або наявність центрального отвору, що не тільки впливає на технологічні особливості виготовлення, але і є вирішальним при виборі вихідної заготовки (циліндричної чи кільцевої).

Наступним рівнем класифікації є складно профільні деталі, що характеризуються наявністю та комбінацією конструктивних елементів (фланців, порожнин, виступів) та їх розташування.

ШО ефективно, зокрема, для виготовлення теплообмінників систем охолодження високовольтної апаратури (рис. 1.5, а). Основна перевага запропонованої конструкції полягає у відсутності з'єднання між ребром і трубою. За наявності відповідного з'єднання порушується теплопровідність і,

як наслідок, знижується ефективність теплообміну. Послідовність операцій виготовлення наведена на рис. 1.5, б.

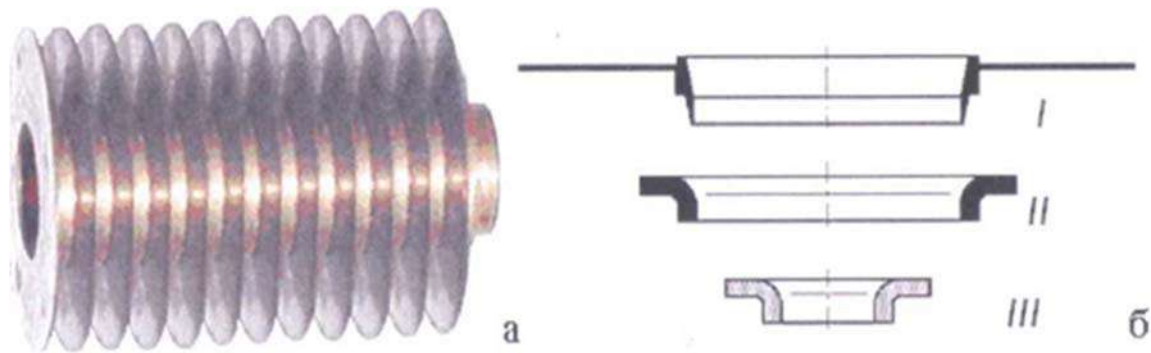


Рисунок 1.5 – Набірна труба теплообмінника (а) та технологічні операції виготовлення окремого елемента теплообмінника (б), I - готова деталь; II - відбортована заготовка; III - заготовка меншого типорозміру, що отримана з відходів від попередньої деталі

Джерело: [71]

Розглянуті приклади стосуються деталей, що не мають альтернативних методів ефективного промислового виробництва. Але в багатьох випадках можливість виготовляти порівняно тонкі фланці методом ШО використовується лише із метою економії кольорових металів і сплавів. Це свідчить про ефективне застосування ШОу поєднанні із використанням ефективної (в даному випадку листової) заготовки. Відповідне поєднання має місце і при виготовленні деталей тиристорів та діодів із циліндричної заготовки. Для цілого ряду деталей, що мають центральний отвір, ефективною заготовкою буде кільцева.

Встановлено [97, 98], що внаслідок особливостей плинності металу при деформуванні циліндричних заготовок обкочуванням, у їх центральній зоні під дією розтягуючих напружень утворюється стоншення. Радіус його розповсюдження R_y становить приблизно $0,3 R$, де R - поточне значення зовнішнього радіуса заготовки. Тому за кільцеву будемо вважати заготовку з отвором, радіус якого $R_B > R_y$.

При дослідженні процесу ШО суцільних циліндричних деталей використовують показник λ , що є відношенням площі поперечного перерізу заготовки до проекції на нього контактної плями. Тоді обкочування кільцевих деталей можна характеризувати аналогічним показником λ_k , причому:

$$\lambda_k = \frac{\frac{\pi * (R^2 - R_B^2)}{\lambda} - \frac{\pi * R_B^2}{\lambda_B}}{\frac{\pi * R^2}{\lambda}} = \lambda * \frac{A^2 - 1}{A^2 - A^{0.5}} = \lambda * M. \quad (1.1)$$

В попередньому позначено $R/R_B = A$ і враховано, що

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi * R}{2 * \Pi}}; \quad \lambda_B = \sqrt{\frac{\pi * R_B}{2 * \Pi}}, \quad (1.2)$$

де Π - параметр обробки обкочуванням.

Множник $M_1 = f(A)$ в межах $1 < A < 2,2$ змінюється від 1,15 до 1,33, що дозволяє прийняти орієнтовно $M \approx 1,25$, тоді

$$\lambda_k = 1,25 * \lambda. \quad (1.3)$$

Розглядаючи контур контактної зони при обкочуванні як переріз гелікоїдальної поверхні деформованого торця заготовки із конічною поверхнею інструмента, можна впевнитися, що передній фронт локалізованого приконтактного пластичного осередкає гілкою параболи з вершиною біля центра торця, а задній фронт - пряма, яка майже збігається з радіусом [135]. Коли контактна пляма відносно вузька, впливом крайових односторонніх обмежень можна знехтувати, як і кінцевою кривизною країв контактного контуру. Для сформульованої задачі отримано вираз для середніх питомих зусиль при прокатці. Аналогічний вираз отримано і для осаджування нахиленими плитами.

Зауважимо, що нагрівання заготовки до кувальної температури забезпечує зниження межі текучості матеріалу, а, отже, й зусилля осаджування, приблизно в 10 разів. Але таке ж зниження зусилля осевого навантаження досягається й за рахунок локального деформування. Саме ця обставина дозволяє перейти від гарячої обробки за традиційною технологією до холодного ШО при однакових зусиллях обробки. В результаті суттєво

скорочуються енергетичні витрати та відкриваються можливості отримання деталей у відповідності з кресленням (або максимально наблизитися до нього). Відсутність припусків на механічну обробку підвищує коефіцієнт використання металу. Звідси - економія матеріальних ресурсів і скорочення працевитрат [72, 73].

На користь отримання деталей у холодному стані свідчить той факт, що загальні витрати при гарячому штампуванні в 1,5...2,5 рази перевищують витрати в порівнянні з напівгарячим (теплим) і в 2...3 рази в порівнянні з холодним штампуванням. При гарячому штампуванні середні відходи металу складають 20%, при напівгарячому 6%. При порівнянні чотирьох способів виготовлення: холодним об'ємним штампуванням, напівгарячим, гарячим і механічною обробкою різанням коефіцієнт використання металу (КВМ) складає 85%; 85%; 75...80%; 40...45%, відповідно. Виготовлення деталей холодним об'ємним штампуванням надає можливість зменшити наступну механічну обробку різанням до мінімуму й отримувати деталі із готовими функціональними поверхнями. Порівнюючи такі переваги холодного штампування, як економія металу й заробітної платні, економія допоміжних пристроїв і штампів, можна зробити висновок, що навіть в умовах середньо- і дрібносерійного виробництва, холодне об'ємне штампування набуває обґрунтованого поширення.

1.2. Особливості розвитку і впровадження інноваційних процесів штампування обкочуванням деталей на верстатах торцевого розкочування

Спосіб ШО, при якому деформацію вісесиметричної заготовки, що обертається, здійснюють валками, розташованими з торців заготовки, прийнято називати торцевим розкочуванням [135].

На рис. 1.6 представлені схеми ШО на верстатах торцевого розкочування з використанням циліндричного й конічного валків, основними

елементами яких, відповідно до рис. 1.6, а, є: 1 - заготовка, 2 - матриця, 3 - розкочувальний валок, 4 - шпиндель, 5 - оправка, 6 - штовхач.

Розташування осі оброблюваної заготовки під регульованим кутом, щодо осі деформуючого інструмента, і можливість їх відносного зсуву в площині контакту, дозволяють ще значно більше, ніж при сферо рухомому штампуванні, локалізувати осередок деформації і знижувати зусилля деформування [25, 138]. Управління, за допомогою зазначених прийомів, активними силами тертя на контактні валка з заготовкою сприяє підвищенню точності обробки.

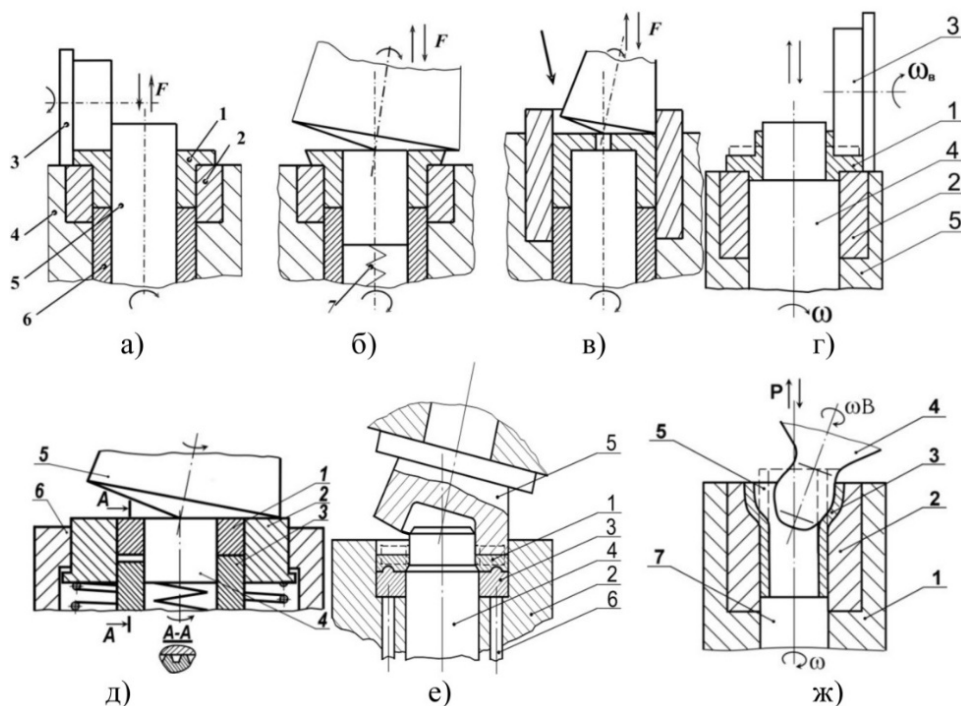


Рисунок 1.6 – Схеми ШО на верстатах торцевого розкочування циліндричним і конічним валками: висадка зовнішнього фланця (а), (б); висадка внутрішнього бурта (в); висадка і зворотне витискування (г); пряме витискування зубчастої поверхні (д); осадка-калібрування (е); роздача-калібрування (ж)

Джерело: [25]

Відзначені процеси ШО можуть бути реалізованими як з приводом від заготовки, так і з приводом від валка. У більшості обладнання передбачено привід обертання заготовки, а валок має змогу вільно обертатися, та

переміщенням від гідроприводу уздовж осі заготовки створює необхідне зусилля розкочування. За допомогою циліндричного валка обробляють торцеві й зовнішні окружні поверхні заготовок, здійснюючи операції осадки, редукування і їх поєднання. Для здійснення процесу розроблено і створено обладнання на базі профіленкатних верстатів ГД-8 і UPW-25 100, а також приставок до гідравлічних пресів [53].

Розкатка конічним валком, показана на прикладі прямого витискування зовнішнього фланця на рис. 1.7, розширює можливості методів ШО і дозволяє здійснювати деформування за схемами осадки, прошивки, прямого і зворотного ротаційного витискування, обтиску, роздачі й відборткування трубчастих заготовок, переформування тощо. Здійснити розкочування за вказаними схемами можна на модернізованому різьбонакочувальному верстаті МРК-35, приставках до універсальних гідравлічних пресів, спеціальних верстатах-напівавтоматах [135].

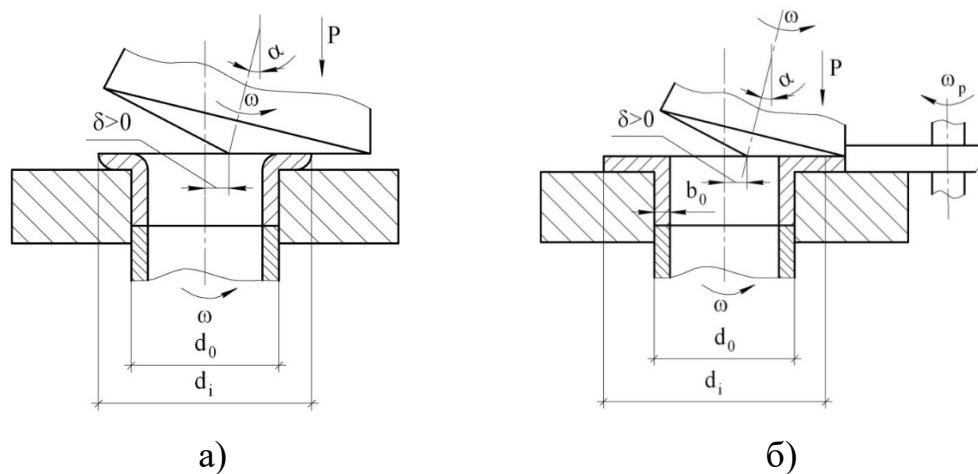


Рисунок 1.7 – Розташування валка відносно осі заготовки

Джерело: [135]

Кінематична схема напівавтомата ШО конічним валком представлена на рис. 1.8.

Основними елементами верстата є: виштовхувач 1; шпиндельний вузол 2 з приводним блоком, що забезпечує обертання заготовки 3 з реверсуванням і регулюванням частоти обертання; головний супорт 5 з похилою голівкою, що

забезпечує регулювання по величині і швидкості переміщення вільно обертового розкочувального валка 6 і деформування заготовки розкочуванням; два поперечних супорти 4, призначених для забезпечення додаткового формування бічних поверхонь заготовки.

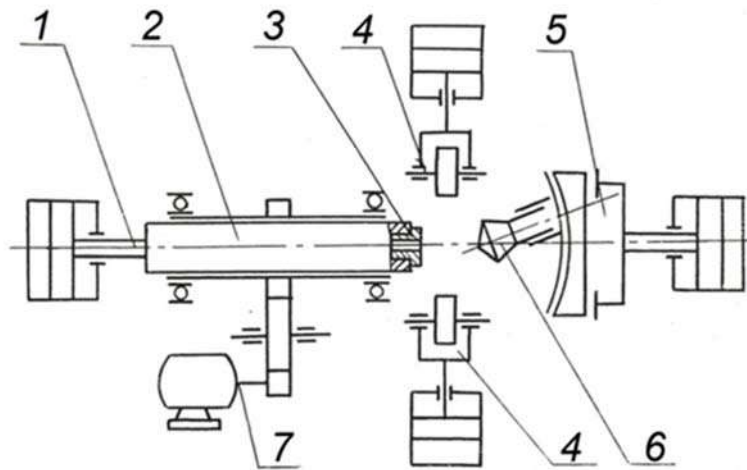


Рисунок 1.8 – Кінематична схема напівавтомата для ШО:

1 - виштовхувач, 2 - шпиндельний вузол, 3 - заготовка, 4 - супорт поперечний, 5 - головний супорт, 6 - деформуючий валок, 7 - привід обертання

Джерело: [135]

До факторів, що обмежують технологічні можливості процесів ШО, належать, перш за все, небезпека руйнування деформованого матеріалу, втрата стійкості заготовки та виникнення несприятливих контактних напружень, що знижують стійкість оснащення і можливість отримання точних виробів. Крім того, значний інтерес представляє рішення проблеми забезпечення точності прецизійних заготовок і заданих службових характеристик виробів.

Оцінка деформовності матеріалу заготовок при висаджуванні зовнішніх буртів методом ШО з використанням феноменологічної теорії деформування [105, 133, 134, 138] дозволяє оцінювати їх граничні розміри. При цьому відкритим залишається питання розширення технологічних можливостей шляхом управління напружено-деформованим станом матеріалу заготовок

через вплив на кінематику його перебігу, а також забезпечення якості виробів при інших схемах розкочування.

Наразі розвиток ресурсозберігаючих технологій розглядається як один із провідних напрямів у сучасній інженерній науці, зокрема в галузі матеріалознавства. Такий підхід є надзвичайно актуальним у контексті глобального переходу до сталого розвитку та екологічно відповідального виробництва. Одним із основних завдань цього напрямку є зменшення споживання енергії, витрат матеріалів, а також мінімізація технологічних втрат, що сприяє збереженню ресурсів і зниженню негативного впливу на довкілля.

Процеси обробки тиском, що розглядаються в цьому контексті, належать до категорії ресурсозберігаючих технологій і тісно пов'язані з пластичним деформуванням - одним із базових методів формоутворення. Цей метод безпосередньо впливає на мікроструктуру матеріалу, визначає його механічні властивості та значною мірою обумовлює експлуатаційні характеристики готових виробів.

В умовах інтенсивного пластичного деформування в матеріалі відбувається поступове накопичення мікропошкоджень, таких як мікротріщини та порожнини. Ці дефекти є потенційними джерелами ініціації руйнування та істотно впливають на довговічність і надійність продукції. Саме тому аналіз та кількісна оцінка процесів пошкодження набувають особливої важливості в рамках забезпечення якості кінцевої продукції.

Крім того, моделювання деформовності заготовок у процесі пластичної обробки дає змогу прогнозувати рівень накопичених пошкоджень і на цій основі оцінювати майбутні механічні характеристики деталей. Це, у свою чергу, дозволяє оптимізувати виробничі процеси та є однією з ключових задач матеріалознавства, орієнтованого на створення надійних і довговічних конструкцій.

1.3. Теорія підсумування пошкоджень в процесах пластичного деформування та критерії руйнування

1.3.1. Основні положення теорії підсумування пошкоджень в процесах пластичного деформування

Накопичення недопустимого рівня пошкоджень матеріала під час пластичного деформування заготовок є основою можливої втрати працездатності готового виробу.

У працях І. С. Алієва, О. В. Грушка, С. П. Гожія, В. А. Матвійчука, В. М. Михалевича, В. А. Тітова [1, 13, 35, 65, 72, 121, 154] та багатьох інших підкреслюється, що обмежена пластичність матеріалів під час локального формоутворення є одним із ключових факторів, що обмежують розвиток процесів ШО.

Ця проблема зумовлює необхідність застосування підходів, що дозволяють оцінити розвиток пошкоджень у матеріалі під час пластичного формозмінення. Одним із найбільш обґрунтованих підходів до аналізу руйнування заготовки в процесах обробки матеріалів тиском є теорія підсумовування пошкоджень.

Теорія підсумовування пошкоджень базується на використанні лінійних та нелінійних моделей підсумовування пошкоджень для прогнозування руйнування матеріалів за різних умов зміни напружено-деформованого стану і температури.

Питанням побудови теорії руйнування матеріалів при пластичному деформуванні присвячено тисячі праць науковців всього світу. Величезна частка цих праць присвячена висвітленню по суті різних складових теорії підсумовування пошкоджень. Багато із цих праць мають високу популярність серед спеціалістів. Проте, ззовні ці праці виглядають, як окремі підходи до побудови моделей руйнування, а не як різні підходи до побудови окремих складових єдиної теорії.

Процес систематизації вказаних результатів є необхідним як для більш ефективного розвитку всіх складових теорії підсумовування пошкоджень, так і для посилення її прикладних застосувань. Слід зазначити, що застосування теорії підсумовування пошкоджень виходять далеко за межі не тільки моделювання руйнування матеріалів при пластичному деформуванні, а й взагалі за межі машинобудівної галузі. Характерним прикладом неочікуваного застосування цього підходу є моделювання закономірностей витрачання ресурсу спортсмена під час долаття дистанції [88, 89, 90].

З початку 21 століття спостерігається суттєве зростання праць, що присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням процесів пластичного деформування. Серед цих досліджень можна виділити праці Т. Вержбицького, Г. Деля, Х. Альтенбаха, їх колег, послідовників, а також багатьох інших науковців.

Праці Т. Вержбицького та Г. Деля вказаного періоду в більшій мірі стосуються дослідженню процесів руйнування листових матеріалів. Цим працям передувала низка праць, що набули високої популярності серед спеціалістів, праці яких присвячені розвитку або застосуванню критеріїв руйнування до прогнозування тріщиноутворення в матеріалах при пластичному деформуванні.

З огляду на величезну кількість праць, що присвячені дослідженню процесів руйнування та різноманітність пропонованих підходів, періодично з'являються наукові праці що присвячені аналізу сучасного стану питань з розвитку критеріїв руйнування. В той же час не вистачає праць в яких подібний аналіз проводився з позиції теорії підсумовування пошкоджень.

Теорія підсумовування пошкоджень складається з трьох основних компонентів. Стосовно до холодного пластичного деформування ці компоненти можна описати так:

I. Модель підсумовування пошкоджень.

II. Крива або поверхня граничних деформацій при стаціонарному деформуванні.

III. Модель траєкторії деформування макрочастинки матеріала.

Моделі підсумовування пошкоджень можна порівняти із своєрідним контейнером, в який необхідно вбудувати моделі граничних деформацій та траєкторії деформування. В результаті ми отримуємо модель для прогнозування граничних деформацій при нестационарному деформуванні.

Моделі підсумовування пошкоджень можна розділити на: скалярні, векторні або тензорні. Кожна з цих моделей може базуватися на лінійному або нелінійному принципі накопичення пошкоджень.

Найпростішою є скалярна модель, що базується на лінійному принципі підсумовування пошкоджень. Для прогнозування граничної до руйнування матеріалу пластичної деформації $\bar{\varepsilon}_f$ за умов плоского напруженого стану ця модель може бути записана у загальному вигляді

$$\psi(\bar{\varepsilon}_i) = \int_0^{\bar{\varepsilon}_i} \frac{d\bar{\varepsilon}_i}{e_{fs}[\eta(\bar{\varepsilon}_i)]}, \quad (1.4)$$

$$0 \leq \psi(\bar{\varepsilon}_i) < 1, \bar{\varepsilon}_i \in [0, \bar{\varepsilon}_f), \psi(\bar{\varepsilon}_f) = 1$$

Тут ψ - рівень пошкоджень макрочастинки; $\bar{\varepsilon}_i$ - накопичена пластична деформація; η - показник напруженого стану; $\eta(\bar{\varepsilon}_i)$ - траєкторія деформування; $e_{fs}(\eta)$ - крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні.

Вперше, появу скалярної моделі, що базується на лінійному принципі накопиченні пошкоджень, пов'язують з працями Пальмгрена та Майнера [41, 47]. Ці моделі широко використовуються під час прогнозування: 1) тривалості міцності матеріалів; малоциклової та багатоциклової втоми матеріалів; 3) зношування матеріалів в процесах тертя; 4) корозійної стійкості матеріалів та багатьох інших.

Для прогнозування часу до руйнування в процесах повзучості за умов плоского напруженого стану, модель, аналогічна моделі (1.4), може бути записана у вигляді [108]

$$\psi(t) = \int_0^t \frac{d\tau}{t_{fs}[\eta(\tau), \sigma_i(\tau)]}, \quad (1.5)$$

$$0 \leq \psi(t) < 1, t \in [0, t_f), \psi(t_f) = 1.$$

Для описання тривалої міцності при простому розтязі за умов зміни у часі величини осьового напруження, модель (1.5) звичайно записують у вигляді інтеграла Бейлі [108]:

$$\psi(t) = \int_0^t \frac{d\tau}{t_{fs}[\sigma_i(\tau)]} \quad (1.6)$$

де $t_{fs} = t_{fs}[\sigma_i(\tau)]$ - крива тривалої міцності при розтязі.

Моделі (1.4), (1.5) наведено тільки з одною метою продемонструвати єдинність теоретичного апарату прогнозування граничного стану об'єкта дослідження для широкого класу прикладних задач з різних галузей, зокрема, в металознавстві.

Призначення моделі (1.6) полягає у визначенні часу до руйнування t_f на основі співвідношення

$$\int_0^{t_f} \frac{d\tau}{t_{fs}[\sigma_i(\tau)]} = 1 \quad (1.7)$$

І заданого закону зміни у часі інтенсивності напружень $\sigma = \sigma_i(t)$.

При цьому, вихідною інформацією, що є характеристикою властивостей матеріалу, слугує крива тривалої міцності

$$t_{fs} = t_{fs}[\sigma_i(\tau)]. \quad (1.8)$$

В класичних працях цю залежність часто подають у вигляді степеневій функції

$$t_{fs} = A\sigma_i^\alpha. \quad (1.9)$$

де A, α - матеріальні сталі.

Аналогічне представлення залежності (1.8) звичайно визначають емпіричним шляхом на основі експериментальних досліджень до руйнування різних зразків із одного матеріалу при незмінній температурі. Кожний зразок

або групу зразків навантажують унікальною величиною σ_i , що залишається незмінною в процесі дослідження кожного зразка.

Звичайно, аналітичний вигляд залежності (1.8) або аналогічної залежності

$$\bar{e}_{fs} = \bar{e}_{fs}(\eta) \quad (1.10)$$

для моделі (1.4), може бути отриманий на основі певних теоретичних міркувань. Проте калібрування подібних залежностей всеодно має бути здійснено на основі експериментальних даних.

Під час отримання вказаного аналітичного представлення на основі емпіричного або теоретичного підходу необхідно прагнути до:

1. Якомога простіших аналітичних представлень.
2. Забезпечення адекватності цих співвідношень під час описання властивостей широкого кола матеріалів в широкому діапазоні зміни аргументів цієї залежності.
3. Мінімізації матеріальних сталих, що мають бути отримані на основі експериментальних даних.

1.3.2. Моделі руйнування

З огляду на велику кількість праць та різних підходів до побудови моделей руйнування зробимо акцент на деяких підходах, що висвітлені в оглядових працях [3, 4, 5, 6, 12]

II. 1. Модель граничного стану Кокрофта-Латама.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_1 d\bar{\epsilon}_i = C. \quad (1.11)$$

де σ_1 - максимальне головне напруження;

II. 2. Модель граничного стану Кокрофта-Латама-Оха.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \cdot d\bar{\epsilon} = C. \quad (1.12)$$

II.3. Hydrostatic stress criterion

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\sigma_i} \cdot d\bar{\varepsilon} = C. \quad (1.13)$$

II.4. Clift criterion

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma_i \cdot d\bar{\varepsilon} = C. \quad (1.14)$$

II.5. Бросто.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma)} \cdot d\bar{\varepsilon} = C. \quad (1.15)$$

II.6. Райса-Трейсі - загальна

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \left(0.558 \sinh\left(\frac{3\sigma}{2\sigma_i}\right) + 0.008\nu \cosh\left(\frac{3\sigma}{2\sigma_i}\right) \right) \cdot d\bar{\varepsilon} = C. \quad (1.16)$$

II.7. Райса-Трейсі - спрощена

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \exp\left(\frac{3\sigma}{2\sigma_i}\right) \cdot d\bar{\varepsilon} = C. \quad (1.17)$$

II.8. Макклінтока

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \left(\frac{\sqrt{3}}{2(1-n)} \sinh\left(\frac{\sqrt{3}}{2(1-n)} \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_i}\right) + \frac{3}{4} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_i} \right) \cdot d\bar{\varepsilon} = C. \quad (1.18)$$

II.9. Johnson–Cook fracture model

$$\bar{\varepsilon}_{fs} = C_1 + C_2 \exp(C_3 \eta). \quad (1.19)$$

II.10. Criterion: Xue–Wierzbicki model

$$\bar{\varepsilon}_{fs} = C_1 \exp(-C_2 \eta) - (C_1 \exp(-C_2 \eta) - C_3 \exp(-C_4 \eta)) \left(1 - \xi^{\frac{1}{n}} \right)^n. \quad (1.20)$$

де ξ - безрозмірний інваріантний параметр,

$$\xi = \frac{27}{2} \frac{s_1 s_2 s_3}{\sigma_i^3}, \quad (1.21)$$

s_1, s_2, s_3 - головні компоненти дівіатора напружень.

Очевидно, що зовнішньо ці критерії виглядають як окремі теорії.

Важливою задачею є аналіз цих критеріїв та дослідження їх взаємозв'язку з теорією підсумовування пошкоджень.

Слід зауважити, також, що роль пружних деформацій в процесах обробки тиском досі не з'ясована, зокрема і її вплив на деформовність заготовок. Хоча пластичне деформування є основним механізмом формоутворення в ОМТ, пружні деформації не зникають повністю, і їхній внесок у загальний стан напруження і деформації заготовки часто ігнорують або спрощують. В деяких випадках, особливо при невеликих пластичних деформаціях або на початкових стадіях пластичного деформування, це може призводити до похибок у розрахунках, зокрема, при моделюванні напруженого стану.

1.4. Висновки до 1 розділу

Штампкування обкочуванням включає в себе штампкування заготовок на сферо рухомих пресах і на установках торцевого розкочування.

На сьогодні значного розвитку набуло сферорухоме штампкування, яке вирізняється більшою універсальністю. Для цих процесів було створено широкий спектр обладнання та розроблено ефективні технологічні схеми формоутворення, серед яких основними є: осаджування, пряме і зворотне витискування, карбування, витягування, вирубання та пресування. Проведений аналіз технологічних схем прямого і зворотного витискування методом штампкування обкочуванням показав, що цей процес дозволяє отримувати складнопрофільні заготовки високої якості.

ШО на торцеобкочувальному обладнанні може реалізовуватися як циліндричним, так і конічним валками. Кут нахилу вісі конічного валка становить переважно 10°, що забезпечує меншу площу плями контакту валка із заготовкою і, відповідно, менші зусилля при деформуванні. Важливою перевагою торцеобкочувальних процесів є також можливість забезпечення направленої плинності матеріалу заготовки, що залежить від радіального зміщення вершини конічного валка та його розташування відносно осі обертання заготовки.

При цьому визначення раціональних параметрів технологічного процесу ШО забезпечує формування направленої плину матеріалу, що, у свою чергу, створює умови для утворення внутрішніх та зовнішніх бортів і фланців із великим відношенням їх діаметра до діаметра основної частини заготовки.

Недостатній рівень вивчення процесів ШО, зокрема деформовності заготовок із малопластичних матеріалів, залишається важливим чинником, що стримує їхнє широке впровадження та подальший розвиток.

Застосування сучасних методів дослідження НДС та моделювання граничного стану матеріалу заготовки при ШО потребує ґрунтовного обґрунтування, яке має базуватися на порівняльному аналізі світових досягнень у цій галузі. Тому необхідно здійснити порівняльний аналіз моделей оцінки руйнування за умов пластичної деформації, які є найбільш поширеними у зарубіжній літературі.

1. Розробити експериментальне обладнання та вибрати матеріали для досліджування процесів штампування обкочуванням, розробити рекомендації щодо проектування процесів формування складнопрофільних виробів методом ШО на основі його фізичного моделювання.

2. Дослідити напружено-деформований стан матеріалу заготовки під час формування складно профільних виробів за допомогою прямого та зворотнього витискування методом ШО.

3. Дослідити найбільш поширені в світовій літературі критерії руйнування у їх взаємозв'язку з теорією підсумовування пошкоджень.

4. Побудувати аналітичні представлення рівняння траєкторій деформування часток матеріалу небезпечних ділянок заготовки під час процесів прямого та зворотнього витискування методом штампування обкочуванням.

5. Розробити моделі деформовності для описання накопичення пошкоджень матеріалу небезпечних ділянок заготовки під час процесів прямого та зворотнього витискування методом штампування обкочуванням та здійснити відповідне моделювання.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДОМИХ КРИТЕРІЇВ РУЙНУВАННЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛІВ, ЩО ПІДЛЯГАЮТЬ ШТАМПУВАННЮ ОБКОЧУВАННЯМ

2.1. Дослідження відомих критеріїв руйнування у їх взаємозв'язку з теорією підсумовування пошкоджень

2.1.1. Відомі критерії руйнування та криві граничних пластичних деформацій при стаціонарному деформуванні за умови плоского напруженого стану

Для дослідження найвідоміших критеріїв руйнування, що наведені в розділі 1.4.2 застосуємо методику, що запропонована в [43]. Сутність цієї методики полягає у перетворенні вказаних моделей до вигляду, що вони можуть набувати під час описання стаціонарного деформування за умови плоского напруженого стану.

Під стаціонарним деформуванням за умов плоского напруженого стану розумітимемо пластичне деформування деякого зразка в умовах:

$$1. \quad \eta(\bar{\varepsilon}_i) = \eta_k = \text{const}, \quad \eta_k \in [-2; 2], \quad (2.1)$$

$$2. \quad \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 = 0, \quad |\sigma_1| + |\sigma_2| + |\sigma_3| > 0. \quad (2.2)$$

При цьому співвідношення умови 2) визначають умови плоского напруженого стану, а будь-яка траєкторія деформування (2.1) – стаціонарне деформування.

Термінологія «траєкторія деформування» для співвідношення

$$\eta = \eta(\bar{\varepsilon}_i) \quad (2.3)$$

або

$$\bar{\varepsilon}_i = \bar{\varepsilon}_i(\eta) \quad (2.4)$$

аргументується тим, що мова йде про лінію в координатах, одна з яких - η , обчислюється на основі значень компонент тензора напружень, а інша

координата - $\bar{\varepsilon}_i$, на основі компонент тензора приростів деформацій. Це означає, що, на наш погляд, нелогічно називати цю траєкторією ні «траєкторією деформацій» ні «траєкторією напружень».

В [27] показано, що між можливими видами плоского напруженого стану та множиною значень $\eta \in [-2; 2]$ існує взаємнооднозначна відповідність. Такої властивості не мають інші інваріантні безрозмірні показники, що на відміну від показника η , широко розповсюджені в класичній літературі [2]. Сюди, зокрема, відносяться, кут виду напруженого стану θ та безрозмірний показник ξ

$$\xi = \frac{27}{2} \frac{|s_{ij}|}{\sigma_i^3} = \cos(3\theta), \quad (2.5)$$

параметр Лоде

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (2.6)$$

третій інваріант напрямного тензора напружень

$$D = \frac{\sqrt{6}}{18} \xi \quad (2.7)$$

Тут $|s_{ij}|$ - визначник матриці, що складена з компонентів девіатора напружень.

За умов плоского напруженого стану виконуються співвідношення [27]

$$\xi = \frac{1}{2} \eta (3 - \eta^2), \quad -2 \leq \eta \leq 2, \quad (2.8)$$

параметр Лоде

$$\mu_\sigma = \sqrt{3} \operatorname{tg} \left(\frac{1}{3} \arccos \left(\frac{1}{2} \eta (3 - \eta^2) \right) - \frac{\pi}{6} \right), \quad -2 \leq \eta \leq 2. \quad (2.9)$$

Обернені до (2.8), (2.9) функції існують лише для окремих діапазонів: $-2 \leq \eta \leq -1$, $-1 \leq \eta \leq 1$, $1 \leq \eta \leq 2$.

Саме тому під час вибору координат для відображення залежності (1.10) було обрано показник η , який представляє відношення першого інваріанта

тензора напружень до інтенсивності напружень, що використовується різними авторами з різними масштабними коефіцієнтами.

Саме ця версія показника η традиційно використовується в числених працях Н. Dell, зокрема, [12]. В працях Вержбіцького та його багатьох послідовників [2, 3, 4, 5, 6] цей показник звичайно позначають так само (ми позначатимемо через $\bar{\eta}$) і визначають як

$$\bar{\eta} = \frac{1}{3}\eta \quad (2.10)$$

В табл. 2.1 наведено значення різних версій цього показника для найрозповсюдженіших схем плоского напруженого стану

Таблиця 2.1

Порівняння числових значень показників η і $\bar{\eta}$

	Двоосовий рівномірний стиск $\sigma_2 = \sigma_3 < 0$ $\sigma_1 = 0$	Рівномірний стиск $\sigma_3 < 0$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$	Чистий зсув $\sigma_1 = -\sigma_3 < 0$ $\sigma_2 = 0$	Рівномірний розтяг $\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$	Чистий згин $\sigma_1 = -\sigma_3 < 0$ $\sigma_2 = 0$	Двоосовий рівномірний розтяг $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$, $\sigma_3 = 0$
η	-2	-1	0	1	$\sqrt{3}$	2
$\bar{\eta}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	$\frac{2}{3}$

Джерело: сформовано автором

Саме тому, що для цих схем версія показника η , на відміну від версії показника $\bar{\eta}$, набуває цілих значень, ми вважаємо цю версію показника більш зручною. Зазначимо, що тут не йдеться про жодні принципові відмінності, а лише про уподобання різних авторів.

Зауважимо, що в [3] дано узагальнене представлення всіх моделей типу (1.5)

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} f(\bar{\eta}) d\bar{\varepsilon}_i = C, \quad (2.11)$$

де функцію f названо ваговою, що цілком відображає її сутність.

Під це представлення, а головне, під представлення (1.5), не підпадають аналітичні представлення моделей Кліфта

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \bar{\sigma} \cdot d\bar{\varepsilon} = C, \quad (2.12)$$

та Лероя

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} (\sigma_1 - \sigma) d\bar{\varepsilon}_i = C, \quad (2.13)$$

а також перша версія моделі Кокрофта

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma_1 d\bar{\varepsilon}_i = C. \quad (2.14)$$

Це моделі дещо іншого типу і, насправді, вони не аналізуються авторами [3]. Аналіз подібних моделей виходить за межі і цієї роботи.

Зазначимо, що структура вагової функції складається з трьох інших функцій:

1. Функції, що визначає принцип підсумовування пошкоджень.
2. Функції (1.10).
3. Функції (2.3).

Проаналізуємо інші моделі руйнування.

Запишемо модель граничного стану Кокрофта-Латама-Оха у такому вигляді:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_1(\bar{\varepsilon})}{\sigma_i(\bar{\varepsilon})} \cdot d\bar{\varepsilon} = C. \quad (2.15)$$

Слід зазначити, що в такому представленні аргументом підінтегральних функцій є накопичена пластична деформації $\bar{\varepsilon}$, що, в свою чергу, визначається як інтеграл

$$\bar{\varepsilon}(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_i(\tau) \cdot d\tau.$$

де t, τ - час; $\dot{\varepsilon}_i$ - інтенсивність швидкостей деформацій

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2)^2 + (\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_3)^2 + (\dot{\varepsilon}_3 - \dot{\varepsilon}_1)^2};$$

$\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \dot{\varepsilon}_3$ - головні компоненти тензора швидкостей деформацій.

Очевидно що функції $\sigma_1(\bar{\varepsilon})$, $\sigma_i(\bar{\varepsilon})$ є монотонно зростаючими для матеріалів, що зміцнюються при пластичному деформуванні.

В [43] показано, що при стаціонарному деформуванні за умови плоского напруженого стану справджується співвідношення.

$$\frac{\sigma_1(\bar{\varepsilon})}{\sigma_i(\bar{\varepsilon})} = \eta + 2 \cdot \cos \left[\frac{1}{3} \cdot \arccos(0,5 \cdot \eta \cdot (3 - \eta^2)) \right] = const, \quad -1 < \eta \leq 2,$$

отже, із моделі Кокрофта-Латама-Оха впливає залежність граничної деформації до руйнування від показника η за умови стаціонарного деформування.

$$\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta) = \frac{C}{\eta + 2 \cdot \cos \left[\frac{1}{3} \cdot \arccos(0,5 \cdot \eta \cdot (3 - \eta^2)) \right]}, \quad -1 < \eta \leq 2$$

Відповідно до цієї моделі матеріал має необмежену пластичність при напружених станах $\eta \leq -1$.

Аналогічно, з критерію

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma_m(\bar{\varepsilon})}{\sigma_i(\bar{\varepsilon})} \cdot d\bar{\varepsilon} = C.$$

впливає залежність граничної деформації до руйнування від показника η за умови стаціонарного деформування, що має вигляд:

$$\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta) = \frac{3 \cdot C}{\eta}, \quad \eta > 0.$$

Очевидно, що згідно цього співвідношення матеріал має необмежену пластичність при зсуві, що не відповідає відомим експериментальним даним. Отже, межі застосування цього співвідношення доволі обмежені.

З критерію Броз

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{2\sigma_1(\bar{\varepsilon})}{3(\sigma_1(\bar{\varepsilon}) - \sigma(\bar{\varepsilon}))} \cdot d\bar{\varepsilon} = C,$$

на основі методики що запропонована В. Михалевичем, також отримана залежність граничної деформації до руйнування від показника η за умови стаціонарного деформування при плоско напруженому стані:

$$\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta) = \frac{C \left(\eta - 3 \cdot \cos \left[\frac{1}{3} \cdot \arccos \left(\frac{1}{2} \cdot \eta \cdot (3 - \eta^2) \right) \right] \right)}{\eta + 2 \cdot \cos \left[\frac{1}{3} \cdot \arccos \left(\frac{1}{2} \cdot \eta \cdot (3 - \eta^2) \right) \right]},$$

$$-1 < \eta \leq 2$$

На рис. 2.1 представлені результати порівнянні обчислень за двома моделями, що калібрували на основі деформації до руйнування при $\eta = 0$. Модель Брозю не тільки так само, як і модель Кокрофта-Летема-Оха відображує нескінченну пластичність матеріалу при $\eta \leq -1$, а й з цього рисунку видно, що спостерігається практично збіг результатів обчислення за цими моделями на проміжку $-1 < \eta \leq 0$. Згідно моделі Брозю, при $\eta > 1$ пластичність матеріалу має різко зменшуватися і стає рівною нулю при $\eta \approx 1.96$.

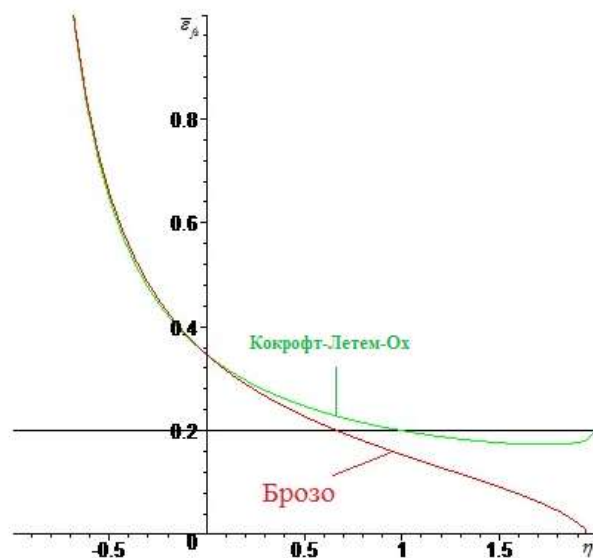


Рисунок 2.1 – Граничні криві деформацій при стаціонарному деформуванні за моделями Кокрофта-Летема-Оха та Брозю

Джерело: сформовано автором

Така поведінка кривої граничних деформацій суперечить численним експериментальним даним, що наведені в літературі [4, 5, 6, 12, 137].

II.5. Загальний критерій Райса-Трейсі

В цій моделі

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \left(0.558 \sinh\left(\frac{1}{2}\eta(\bar{\varepsilon})\right) + 0.008\nu(\bar{\varepsilon}) \cosh\left(\frac{1}{2}\eta(\bar{\varepsilon})\right) \right) \cdot d\bar{\varepsilon} = C, \quad (2.16)$$

що записана на основі (1.16), фігурує інваріантний безрозмірний показник ν [52]:

$$\nu = -\frac{3d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3}. \quad (2.17)$$

З використанням співвідношень теорії течії

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} s_{ij}. \quad (2.18)$$

Можемо записати вираз для обчислення показника ν через компоненти тензора напружень

$$\nu = -\frac{3s_2}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (2.19)$$

Слід зазначити, що тут замість компонентів тензора швидкостей деформацій фігурують компоненти тензора приростів пластичних деформацій.

З використанням методики, що запропонована авторами [27], стосовно плоского напруженого стану показник ν може бути представлений через показник η

$$\nu = \sqrt{3} \cot\left(\frac{1}{3} \arccos\left(\frac{1}{2}\eta(3 - \eta^2)\right) + \frac{\pi}{3}\right). \quad (2.20)$$

На рис. 2.2, показані графіки залежності різних інваріантних безрозмірних показників напруженого та деформованого стану від показника η , що справедливий в умовах плоского напруженого стану

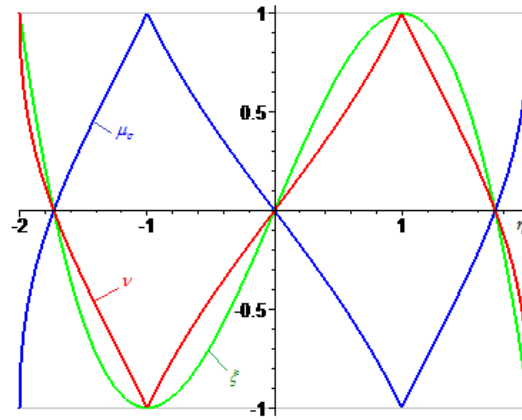


Рисунок 2.2 – Безрозмірні показники напруженого стану

Джерело: сформовано автором

Із порівняння співвідношень (2.9), (2.20), або ж (2.6), (2.19), випливає, що $\nu = -\mu_\sigma$.

Аналіз показує, що

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{fs}(\eta) = C \lim_{\eta \rightarrow 0} & \left(0.558 \sinh\left(\frac{\eta}{2}\right) + 0.008\sqrt{3} \times \right. \\ & \left. \times \cot\left(\frac{1}{3} \arccos\left(\frac{1}{2}\eta(3-\eta^2)\right) + \frac{\pi}{3}\right) \cosh\left(\frac{\eta}{2}\right) \right)^{-1} = \pm\infty. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Ця умова суперечить експериментальним даним для більшості матеріалів, нівелюючи практичну цінність цього співвідношення як можливої апроксимації кривої граничних деформацій при стаціонарному деформуванні. Хоча це співвідношення можна використовувати в більш вузькому діапазоні значень показника η , складність аналітичного виразу робить його доцільність сумнівною.

Варто підкреслити, що цей висновок жодним чином не применшує теоретичну та практичну цінність загальних результатів праці [52], що високо оцінена фахівцями.

Зазначимо, що спрощений варіант і до цього часу зберігає практичне значення.

По моделі «Макклінтока» (1.18):

З використанням підходу [37], стосовно плоского напруженого стану, модель Макклінтока може бути зведена до вигляду

$$\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta) = \frac{C}{\frac{\sqrt{3}}{2(1-n)} \sinh\left(\frac{\sqrt{3}}{3}(1-n)(\eta + \cos(\alpha))\right) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\alpha)}. \quad (2.22)$$

$$-1 < \eta \leq 2, \quad n \geq 0, n \neq 1$$

$$\alpha = \frac{1}{3} \arccos\left(\frac{1}{2}\eta(3 - \eta^2)\right) - \frac{\pi}{3}. \quad (2.23)$$

Модель Макклінтока, так само, як і модель Кокрофта-Летема-Оха, описує необмежену пластичність матеріалів при рівномірному стиску, тобто при $\eta \rightarrow -1 + 0$. Модель Макклінтока відображає спробу пов'язати властивості граничних деформацій в залежності від напруженого стану з коефіцієнтом зміцнення n того самого матеріалу. Це є важливою особливістю цієї моделі. Пошук подібних зв'язків між матеріальними сталими, що характеризують різні властивості матеріалу є надзвичайно важливим. Але якщо подібні параметри введені в залежність без достатнього обґрунтування, або, навіть, за наявності теоретичного обґрунтування не підтвердженого експериментальними даними, це приводить до невиправданого ускладнення самих залежностей та процедури їх використання.

В праці [37] розглядається крива течії матеріалу у вигляді

$$\sigma_i = \sigma_1 \bar{\varepsilon}^n, \quad (2.24)$$

де $\sigma_1 = \sigma_i(\bar{\varepsilon} = 1)$.

Варто звернути увагу, що в указаній праці припущено редакторську помилку і замість правильного виразу (2.24) записано помилковий вираз $\sigma_i = \sigma_1 \varepsilon^{-n}$.

Коефіцієнт зміцнення n Макклінток пропонує визначати на основі експериментальної кривої течії за співвідношенням

$$n = \frac{\sigma_i(\bar{\varepsilon}_{\max})}{\sigma_{avg}} - 1, \quad (2.25)$$

Продемонструємо сутність та деталі отримання цього співвідношення, що впливає з означення середнього значення функції $\sigma_i(\bar{\varepsilon})$ на відрізку $[0; \bar{\varepsilon}_{\max}]$:

$$\sigma_{avg} = \frac{1}{\bar{\varepsilon}_{\max}} \int_0^{\bar{\varepsilon}_{\max}} \sigma_i(x) dx = \frac{1}{\bar{\varepsilon}_{\max}} \int_0^{\bar{\varepsilon}_{\max}} \sigma_1 x^n dx = \frac{\sigma_1}{n+1} (\bar{\varepsilon}_{\max})^n, \quad (2.26)$$

або

$$\sigma_{avg} = \frac{\sigma_i(\bar{\varepsilon}_{\max})}{n+1}, \quad (2.27)$$

звідки і впливає співвідношення (2.25).

Наведемо графік типової кривої течії.

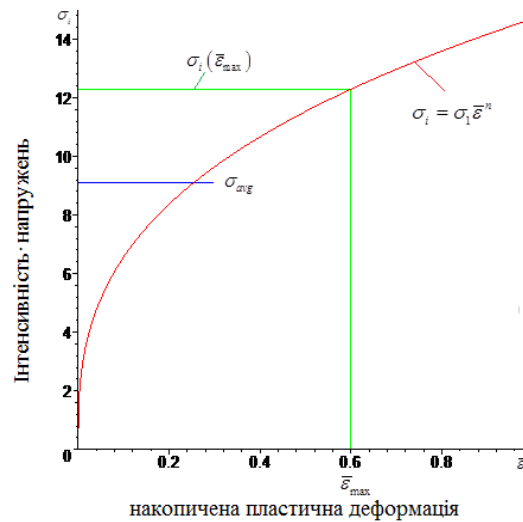


Рисунок 2.3 – Типова крива течії матеріалу

Джерело: сформовано автором

Для незміцнюваного матеріала $n=0$ і співвідношення (2.22) дещо спрощується

$$\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta) = \frac{2\sqrt{3}C}{3 \left(\sinh \left(\frac{\sqrt{3}}{3} (\eta + \cos(\alpha)) \right) - \sin(\alpha) \right)}. \quad (2.28)$$

$$-1 < \eta \leq 2, \quad n \geq 0, n \neq 1$$

Співвідношення (2.22) не існує при $n \neq 1$, але існує границя

$$\lim_{n \rightarrow 1} \bar{\varepsilon}_{fs}(\eta) = \frac{2\sqrt{3}}{3} \lim_{n \rightarrow 1} \frac{C}{\frac{1}{(1-n)} \sinh\left(\frac{\sqrt{3}}{3}(1-n)(\eta + \cos(\alpha))\right) - \sin(\alpha)} =$$

$$= \frac{2\sqrt{3}C}{\sqrt{3}(\eta + \cos(\alpha)) - 3\sin(\alpha)} \quad (2.29)$$

На рис. 2.4. наведені криві, з порівняння яких можна зробити висновок, що під час змінення значень параметра зміцнення n в широких межах, його вплив на величину граничних деформацій при стаціонарному деформуванні залишається нехтовно малим. Це свідчить: або про відсутність тісного зв'язку між мірою зміцнення матеріалів та залежністю величини граничних деформацій при стаціонарному деформуванні від показника напруженого стану, або про недосконалість відображення такого зв'язку в моделі Макклінтока.

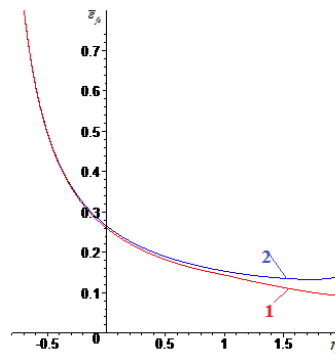


Рисунок 2.4 – Криві граничних деформацій при стаціонарному деформуванні, що розраховані за моделлю Макклінтока при різних значеннях параметра зміцнення: 1 – розрахунок за (2.22), (2.23) при $n=0$; 2 – розрахунок за (2.29), (2.23).

Джерело: сформовано автором

Критерій IDS.

Із співвідношення

$$\bar{e}_{fs} = \frac{e_T^+ \sinh\left(c(\eta^- - \eta)\right) + e_T^- \sinh\left(c(\eta - \eta^+)\right)}{\sinh\left(c(\eta^- - \eta^+)\right)} \quad (2.30)$$

де η^+, η^- - значення показника напруженого стану відповідно при

рівномірному двоосьовому розтязі та стиску; c - деякий параметр;

впливає, що величини e_T^- та e_T^+ є граничними деформаціями при відповідних рівномірних двоосьових умовах деформування

$$e_T^- = \bar{e}_{fs}(\eta = \eta^-), \quad (2.31)$$

$$e_T^+ = \bar{e}_{fs}(\eta = \eta^+). \quad (2.32)$$

Основна особливість та цінність співвідношення (2.30) полягає в тому, що це співвідношення призначене для описання руйнування матеріалів з початково анізотропією граничних деформацій. Так, для початково ортотропного матеріала параметр c пропонується визначати на основі таких співвідношень

$$c = k_0 + k_1 \cos(2\varphi) + k_2 \cos(4\varphi). \quad (2.33)$$

$$k_0 = \frac{1}{4}(c_0 + 2c_{45} + c_{90}), \quad (2.34)$$

$$k_1 = \frac{1}{2}(c_0 - c_{90}), \quad (2.35)$$

$$k_2 = \frac{1}{4}(c_0 - 2c_{45} + c_{90}), \quad (2.36)$$

де c_0, c_{45}, c_{90} - матеріальні сталі, що мають бути визначені під час випробовування зразків, що вирізані відповідно під кутом $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ до напрямку екструзії; φ - кут між напрямом екструзії та першою головною швидкістю деформацій.

Цікавим було б порівняти співвідношення (2.30) із співвідношенням, що виливає з моделі, розробленої автором [108].

Для початково ізотропного матеріала співвідношення (2.30) суттєво спрощується

$$\bar{e}_{fs} = d_0 \exp(-c\eta) + d_1 \exp(c\eta), \quad (2.37)$$

тим не менш, це співвідношення здатно описати немонотоний характер зміни граничних деформацій з ростом показника напруженого стану η . Зокрема,

йдеться про експериментально виявлений ефект для алюмінієвого матеріалу $\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=2) > \bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=\sqrt{3})$.

Співвідношення (2.28) є ще більш гнучким для описання ефектів немонотонного змінення функції $\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta)$, проте має значно більше матеріальних сталих, що мають бути визначені на основі експериментальних даних.

Із використанням співвідношень, що отримані в [27], можна показати, що для умов плоского напруженого стану справджується

$$\xi = \frac{\eta}{2}(3 - \eta^2), \quad (2.38)$$

Якщо при цьому покласти $c_1 = c_3 = d_1, c_2 = c, c_4 = -c, n \rightarrow +0$, співвідношення (2.28) стане тотожним (2.37). На наш погляд, це свідчить про достовірність отриманих експериментальних даних та їх ефективну теоретичну інтерпретацію, що здійснена різними науковцями незалежно один від одного.

Впродовж багатьох років найтипівішою вважалась залежність

$$\bar{\varepsilon}_{fs} = d_0 \exp(-c\eta), \quad (2.39)$$

що є частинним випадком (2.37) при $d_1 = 0$ та відображує монотонне зменшення граничної деформації для напружених станів із збільшенням показника η .

Альтернативою співвідношенням типу (2.37) можуть бути моделі [40]

$$\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta) = C_1 \cdot \exp\left(-\eta \cdot \ln\left(\frac{C_2(1-\eta)}{2} + \frac{C_3(1+\eta)}{2}\right)\right), \quad (2.40)$$

$$-2 \leq \eta \leq 2$$

$$\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta) = D_1 \cdot (D_2)^{\frac{\eta}{2}} \cdot (D_3)^{\frac{\eta^2}{2}}, \quad (2.41)$$

$$-2 \leq \eta \leq 2.$$

Ці моделі побудовані авторами за методикою, що має елементи подібності з конструюванням сплайн-функцій.

Серед переваг цих співвідношень слід відзначити здатність описувати монотонний та немонотонний характер відповідних залежностей, а також простоту визначення матеріальних сталих за результатами тестів при найпоширеніших напружених станах: $\eta = \{-1, 0, 1, 2\}$. Зокрема, якщо для калібрування використовувати e_c, e_s, e_t - граничні деформації відповідно при $\eta = \{-1, 0, 1\}$, то співвідношення (2.40), (2.41) набувають вигляду

$$\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta) = e_s \cdot \exp\left(-\eta \cdot \ln\left(\frac{(1-\eta) \cdot e_c}{2 \cdot e_s} + \frac{(1+\eta) \cdot e_t}{2 \cdot e_t}\right)\right), \quad (2.42)$$

$$-2 \leq \eta \leq 2,$$

$$\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta) = e_s \cdot \left(\frac{e_t}{e_c}\right)^{\frac{\eta}{2}} \cdot \left(\frac{e_c \cdot e_t}{e_s^2}\right)^{\frac{\eta^2}{2}}, \quad -2 \leq \eta \leq 2. \quad (2.43)$$

Аналогічні дії при використанні зовні простої моделі Джонсона-Кука призводять до більш громіздких співвідношень

$$\bar{\varepsilon}_{fs} = \frac{e_c e_t - e_s^2}{e_c + e_t - 2e_s} + \frac{e_s (e_c - e_s + e_t) - e_c e_t}{e_c + e_t - 2e_s} \left(\frac{e_s - e_t}{e_c - e_s}\right)^\eta. \quad (2.44)$$

Із рис. 2.5 видно збіг для різних моделей розрахункових результатів, що виконані з використанням експериментальних даних (2.30).

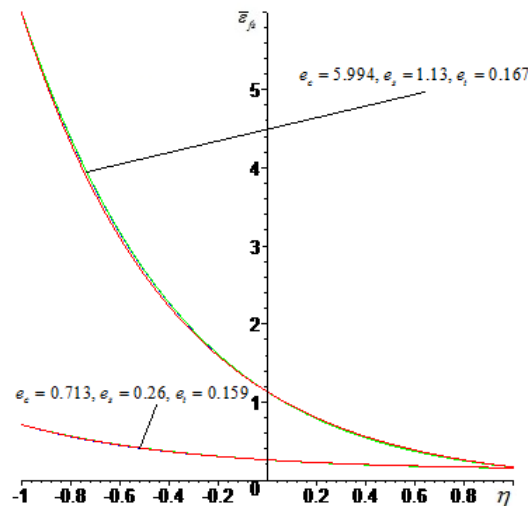


Рисунок 2.5 – Порівняння розрахункових значень за трьома моделями (2.42), (2.43), (2.44).

Джерело: сформовано автором

2.1.2. Траєкторії деформування при торцевому стисненні. Емпіричний критерій руйнування

В процесах штампування обкочуванням подібних торцевому стисненню, небезпечною ділянкою заготовки з точки зору тріщиноутворення є вільна бічна поверхня [4, 6]. Матеріал цієї ділянки знаходиться в умовах плоского напруженого стану.

В [4, 6] проведено експериментальне дослідження торцевого стиснення до руйнування серії циліндричних зразків з різною величиною відношення початкових висоти до діаметру зразка. Авторами [2, 5, 67] показано, що в координатах «осьова e_z - колова e_φ логарифмічні деформації» геометрична сукупність граничних точок, що відповідають моменту руйнування матеріалу бічної поверхні, є лінійною функцією

$$e_\varphi + \frac{1}{2}e_z = C, \quad (2.45)$$

де C - матеріальна стала.

Як зазначається в [4, 67], ці результати підтверджують експериментально отриману раніше закономірність, про що йдеться в цілому ряді наукових праць [8, 19, 63, 64].

Дослідимо, розрахункові результати граничної накопиченої деформації, що впливають з теорії підсумовування пошкоджень, у співставленні із емпіричним співвідношенням (2.45).

Побудуємо модель граничних деформацій матеріалу бічної поверхні при нестационарному деформуванні під час торцевого стиснення.

Використовуватимемо аналітичну залежність між компонентами осьової ε_z та колової ε_φ деформацій [40]:

$$\varepsilon_z = -\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_\varphi - \frac{3}{2} \cdot m \cdot \arctg\left(\frac{\varepsilon_\varphi}{m}\right), m > 0, \quad (2.46)$$

де m - параметр інтенсивності бочко утворення. З урахуванням цього співвідношення будуються траєкторії деформування.

Слід зазначити, що залежність отримана на основі конструювання

диференціального рівняння між компонентами тензора швидкостей деформації або тензора приростів пластичних деформацій.

Для випадку параметричного представлення траєкторії деформування (2.3)

$$\begin{cases} \eta = f_1(s); \\ \bar{\varepsilon} = f_2(s). \end{cases} \quad (2.47)$$

модель (2.1) набуває вигляду

$$\begin{cases} \bar{e}(s) = f_2(s) \\ \psi(s) = \int_0^s \frac{d(f_2(x))}{\bar{e}_{fs}[f_1(x)]} \cdot dx \end{cases} \quad (2.48)$$

Надалі використовуватимемо аналітичне представлення траєкторії деформування у вигляді параметричних співвідношень [40]:

$$\begin{cases} \eta(s) = \frac{1 - 3\cos^2(s)}{\sqrt{1 + 3\cos^4(s)}}, \\ \bar{e}_i(s) = m \cdot \int_0^s \sqrt{3 + \frac{1}{\cos^4(x)}} \cdot dx, \end{cases} \quad (2.49)$$

$$m \in [0, \infty), s \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$$

Базуючись на (2.48) з урахуванням (2.1) та використанням (2.42) і (2.49) запишемо модель для визначення граничної накопиченої деформації

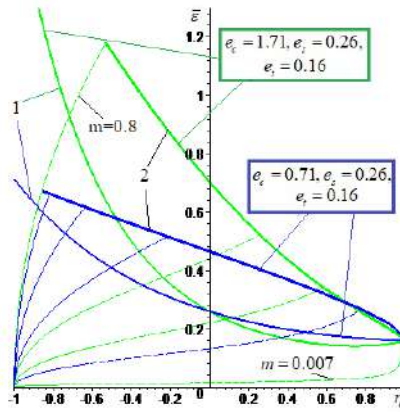
$$\bar{e}_f = m \cdot \int_0^{s_f} \sqrt{3 + \frac{1}{\cos^4(x)}} \cdot dx, \quad m \in [0, \infty), s_f \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right], \quad (2.50)$$

де s_f - є коренем нелінійного рівняння

$$m \int_0^{s_f} \frac{\sqrt{1 + 3\cos(x)^4}}{\cos(x)^2 e_s \left(\frac{2e_s e_p}{(e_s^2 - e_c e_p) \eta(x) + e_s^2 + e_c e_p} \right)^{\eta(x)}} dx - 1 = 0, \quad (2.51)$$

в якому $\eta(x)$ визначається першим рівнянням системи (2.49).

На рис. 2.6., 2.7 та у додатку А представлені результати розрахунків за відповідними співвідношеннями.



**Рисунок 2.6 - Траєкторії деформування матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні з бочкоутворенням та криві граничних деформацій при стаціонарному та нестаціонарному деформуванні. 1 – криві граничних деформацій при стаціонарному деформуванні, розрахунок за (2.42); 2 – криві граничних деформацій при нестаціонарному деформуванні - торцеве стиснення циліндричних зразків за умови бочкоутворення, розрахунок за (2.50), (2.51);
— - розрахунок за (2.49)**

Джерело: сформовано автором

Із отриманих даних випливає, що близькість до емпіричного критерію розрахункових граничних деформацій за теорією підсумовування пошкоджень в значній мірі визначається відношенням граничної деформації рівномірного стиску до граничної деформації зсуву: $\frac{e_c}{e_s}$. Для матеріалу з достатньо великим

значенням $\frac{e_c}{e_s} = \frac{0.71}{0.26} \approx 3$ розрахункова гранична крива за теорією

підсумовування пошкоджень вельми суттєво відрізняється від прямої лінії, що відображає емпіричний критерій (рис.2.7). Збільшення граничної деформації рівномірного стиску в 2.4 рази призводить практично до співпадіння розрахункової граничної кривої за теорією підсумовування пошкоджень з прямою лінією, що відображає емпіричний критерій.

Варто звернути увагу, що зазначене суттєве збільшення граничної

деформації рівномірного стиску здійснює нехтовно малий вплив на розрахункові значення кривої граничних деформацій при стаціонарному деформуванні в інтервалі $\eta \in (0,1)$ (криві 1 на рис. 2.6).

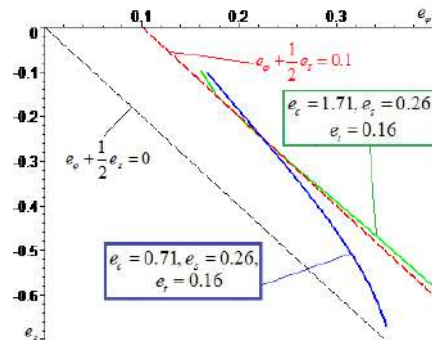


Рисунок 2.7 – Траєкторія деформацій при рівномірному стиску та криві граничних деформацій торцевого стиснення з бочкоутворенням

Джерело: сформовано автором

2.2. Побудова кривих граничних деформацій для матеріалів, що підлягають деформуванню методом ШО

Таким чином, одним з головних факторів, що впливають на пластичність металів в умовах холодного деформування, є схема напруженого стану. Залежність пластичності від показників, що характеризують схему напруженого стану, називають поверхнею граничних деформацій.

Найбільшого поширення набуло уявлення залежності пластичності від показника напруженого стану η (2.3). Показник η не враховує впливу третього інваріанта тензора напружень, тому криву граничних напружень у координатах « $\varepsilon_i - \eta$ » не вважають єдиною для всіх можливих видів напруженого стану.

Для об'єктивної оцінки деформовності металів у різних технологічних процесах необхідно мати «єдину» криву граничних деформацій, яка описує їх пластичність при різних схемах напруженого стану.

При розтягуванні циліндричних зразків на певному етапі деформування утворюється шийка, а отримане в результаті руйнування зразка значення граничної деформації перевищує аналогічні значення при більш «м'яких»

схемах напруженого стану.

Підвищення пластичності при розтягуванні в разі утворення шийки пояснюється В. А. Матвійчуком появою складного деформування. Надалі, під складним деформуванням будемо мати на увазі випадок, при якому напрямний тензор швидкостей деформацій $\beta_{ij}(\varepsilon_i) \neq const$. Появою складного деформування пояснюють також підвищення пластичності в разі утворення шийки автори роботи [75]. При цьому встановлений ним приріст деформації $\Delta \varepsilon_*$ лінійно залежить від відношення радіуса кривизни шийки R до її діаметру $d_{ш}$, і при $R / d_{ш} \geq 0,5$ може бути описаний рівнянням:

$$\Delta \varepsilon_* = 0,85 - 0,57 R / d_{ш}. \quad (2.52)$$

На рис. 2.8 зображений графічний вид залежності (2.52) збільшення міри пластичності $\Delta \varepsilon_*$ від відношення радіуса кривизни шийки R до її діаметру $d_{ш}$ для різних матеріалів: $\circ$ - ВТ9, $\triangle$ - ВТ25, $\times$ - ОТ4, $\square$ - ЕП517, ∇ - ЕІ 961, - ЕП866, $\diamond$ - ЕП718.

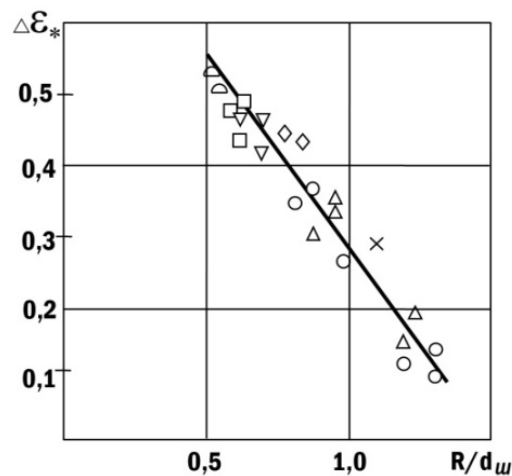


Рисунок 2.8 – Залежність збільшення міри пластичності $\Delta \varepsilon_*$ від відношення радіуса кривизни шийки R до її діаметру $d_{ш}$ для різних матеріалів

Джерело: [75]

Варто зазначити, що поява місцевого потоншення на заготовках у процесах ОМТ є ознакою пошкоджень, тому за граничну деформацію цілком обґрунтовано приймається величина ε_p . Якщо ж заготовки в технологічних процесах

руйнуються без утворення шийки, то для об'єктивної оцінки деформованості можна використовувати значення пластичності, отримані за результатами розтягування. При цьому необхідно враховувати підвищення пластичності, що обумовлене утворенням шийки й визначається залежністю (2.52).

При випробуванні циліндричних зразків на осадження основна складність полягає в усуненні тертя на торцях зразків для забезпечення одноосного стиснення ($\eta = -1, \mu_\sigma = 1$). На рис. 2.9 показана схема осадження суцільних циліндричних зразків із забезпеченням умов лінійного стиснення.

Проте варто відзначити, що навіть при використанні ефективного мастила й прокладок з шарів м'якої фольги, лінійне стиснення реалізувати важко.

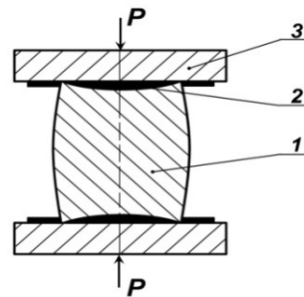


Рисунок 2.9 – Схема осадження суцільного циліндричного зразка із забезпеченням умов одновісного стиску: 1 - зразок, 2 - фольга, 3 - інструмент

Джерело: сформовано автором

Застосування таких прийомів, як поетапне шліфування крайок лунки на торцях або вдавнення їх осадкою без фольги, з наступною поетапною осадкою із фольгою, дозволяє витримувати напружений стан близький до лінійного стиснення ($\eta = -1$) тільки до певних ступенів деформації. При цьому інтенсивність деформації в момент руйнування можна визначити із співвідношення:

$$\varepsilon_* = \ln \frac{h_0}{h_*}, \quad (2.53)$$

де h_0 і h_* - висота вихідного зразка і в момент руйнування, відповідно.

На рис. 2.10 показаний вид вихідного та перетинів циліндричних зразків, осаджених до різних ступенів за викладеною методикою, зі збереженням прямолінійності бічних поверхонь 104.



Рисунок 2.10 – Зразки для випробування на осадження: вихідний зразок та вид перетинів циліндричних зразків, осаджених в умовах одновісного стиснення

Джерело: сформовано автором

У разі спотворення циліндричної форми зразка при осадженні (поява бочки), напружений стан відрізняється від одновісного стиску. У результаті порушується умова сталості показника напруженого стану, необхідна при побудові кривих граничних деформацій.

У цьому випадку точки кривих граничних деформацій можна отримати експериментально-розрахунковим методом [40]. Для побудови шляхів деформування частинок матеріалу, на бічну поверхню зразків, поблизу середнього по висоті перетину, на твердомірі Віккерса алмазною пірамідою наносять чотири відбитки в чотирьох симетрично розташованих точках екватора, рис. 2.11.

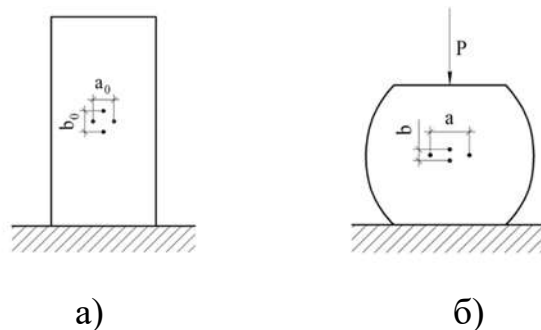


Рисунок 2.11 – Форма зразків і координатної сітки: а) до осадження, б) в процесі осадження

Джерело: сформовано автором

Осадження зразків проводять поетапно до появи тріщин на екваторі бічної поверхні. Поетапно на інструментальному мікроскопі, показаному на рис. 2.12, вимірюють діагоналі квадрата a_0, b_0, a_i, b_i в осьовому й окружному напрямку до й після осаджування, відповідно.



*Рисунок 2.12 – Загальний вигляд інструментального мікроскопа
ММІ-2*

Джерело: сформовано автором

За результатами вимірювань визначають осьову $\varepsilon_z = -\ln \frac{a_0}{a_i}$ й окружну деформацію $\varepsilon_\theta = \ln \frac{b_i}{b_0}$, а також значення інтенсивності деформацій і показника напруженого стану

$$\varepsilon_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_z^2 + \varepsilon_z \varepsilon_\theta + \varepsilon_\theta^2}, \quad (2.54)$$

$$\eta = \sqrt{3} \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{\sqrt{\varepsilon_z^2 + \varepsilon_z \varepsilon_\theta + \varepsilon_\theta^2}}. \quad (2.55)$$

Перевагою кручення, при випробуванні металів на пластичність, є той факт, що в процесі кручення циліндричних зразків напруження $\sigma_1 = -\sigma_3$, а

$\sigma_2 = 0$. Таким чином, при випробуванні витримуються постійні значення показників напруженого стану $\eta = 0$ і $\mu_\sigma = 0$, де μ_σ параметр Надаї-Лоде.

Інтенсивність деформацій на поверхні зразка визначається співвідношенням:

$$\varepsilon_u = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{3}}, \quad (2.56)$$

де α - кут зсуву, що вимірюється між вихідним і поточним положенням профільної риски на поверхні закрученого циліндричного зразка.

При визначенні граничної деформації в момент руйнування зразка, вимірювання кута α варто α проводити безпосередньо біля місця руйнування.

В результаті досліджень було встановлено, що криві граничних деформацій з необхідною для практики точністю, можна будувати за результатами випробування зразків на кручення й осаджування, а значення граничних деформацій при розтягуванні отримувати з використанням апробованої для різних металів апроксимуючої залежності В. А. Огороднікова [141, 142]:

$$\varepsilon_* = \varepsilon_*(\eta = 0) \exp \left[-\eta \ln \frac{\varepsilon_*(\eta = -1)}{\varepsilon_*(\eta = 0)} \right], \quad (2.57)$$

де $\varepsilon_*(\eta = -1)$ і $\varepsilon_*(\eta = 0)$ - граничні деформації при лінійному стисненні й крученні циліндричних зразків, відповідно.

Підвищення точності визначення пластичності при напруженому стані, що відповідає одновісному розтяг $\varepsilon_*(\eta = +1)$ у, за рахунок запобігання втраті стійкості деформування зразка у вигляді утворення шийки та забезпечення сталості значень показників напруженого стану протягом всього процесу випробування, можна забезпечити шляхом вальцювання заготовок до руйнування [133].

Згідно з відзначеним способом деформування вільної бічної поверхні циліндричного зразка в умовах одновісного розтягу відбувається при його

вальцюванні валками, а збільшення ступеня деформації та доведення матеріалу до руйнування забезпечується внаслідок зростання радіусів валків по мірі вальцювання та деформуванням зразка на клин.

На рис. 2.13 показано вальцювання зразка на клин валками, радіуси яких зростають. Відповідно до способу, дослідний циліндричний зразок 1, з нанесеною на його бічну поверхню подільною сіткою, закріплюється в утримувачі 3 і поблизу утримувача обтискується валками 2 при найменших радіусах їх поперечних перерізів. Вмикається обертання валків і здійснюється вальцювання заготовки на клин внаслідок зростання радіуса валків. Пластичність визначається за величиною деформації в момент появи тріщин на вільній поверхні [104].

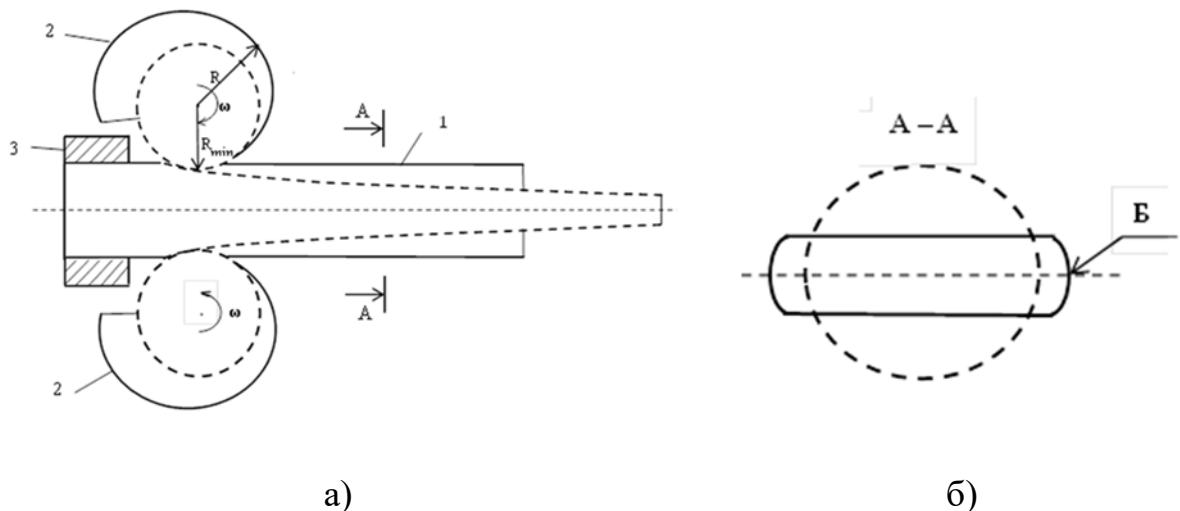


Рисунок 2.13 – Схематичне зображення процесу вальцювання на а); переріз деформованої заготовки; б) Б – поверхня контролю за деформаціями й руйнуванням

Джерело: [104]

У випадку необхідності отримання за одне випробування двох значень пластичності металу при різних (але постійних в процесі деформування) показниках напруженого стану η здійснюють вальцювання на клин криволінійного зразка.

Для цього вальцювання проводять конічними валками, радіуси яких зростають по мірі вальцювання зразка. При цьому менше zdeформована

внутрішня бічна поверхня зразка матиме менше значення показника η , а більше здеформована зовнішня поверхня зразка матиме більше значення показника η (рис. 2.14) [104].

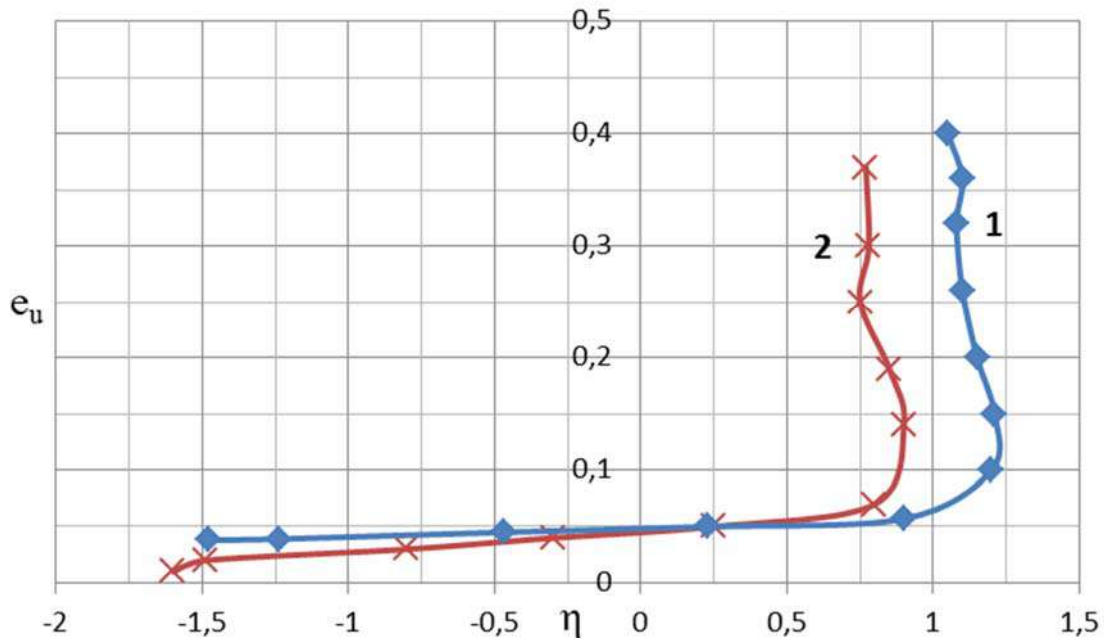


Рисунок 2.14 – Траєкторії шляхів деформування точки зовнішньої 1 та внутрішньої 2 вільних бічних поверхонь заготовки [104].

Джерело: [104]

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

В табл. 2.2 наведені величини граничних деформацій металів при стаціонарному деформуванні для різних значень показника напруженого стану, а також коефіцієнти чутливості пластичності до зміни цього показника. Ці дані отримані на основі літературних даних [137].

Граничні деформації за умов стаціонарного деформування при різних значеннях показника напруженого стану [137]

№ п/п	Матеріал	Дані для побудови діаграми пластичності			Коефіцієнти чутливості пластичності для показника η	
		$\varepsilon_p (\eta_1 = 1)$	$\varepsilon_p (\eta_1 = 0)$	$\varepsilon_p (\eta_1 = -1)$	$\lambda_1 = \ln \left(\frac{\varepsilon_p (\eta_1 = 0)}{\varepsilon_p (\eta_1 = 1)} \right)$	$\lambda_2 = \ln \left(\frac{\varepsilon_p (\eta_1 = -1)}{\varepsilon_p (\eta_1 = 0)} \right)$
1	2	3	4	5	6	7
1	BT-1	0,64	1,15	2,9	0,58	0,92
2	P12	0,17	0,55	1,9	1,17	1,236
3	P6M5	0,23	0,46	0,95	0,69	0,72
4	20-A	1	1,3	1,7	0,26	0,25
5	AMГ-2	1,05	1,57	2,25	0,4	0,35
6	BT14	0,15	0,64	1,3	1,45	0,7
7	P18	0,03	0,37	1,16	2,5	1,14
8	P9	0,1	0,48	1,2	1,56	0,91
9	40XH2MA	0,48	0,76	1,52	0,45	0,69
10	Сталь 40	0,09	0,37	∞	1,4	∞
11	OT-4	0,35	0,75	1,6	0,762	0,757
12	40X	0,08	0,86	1,5	2,37	0,556
13	30XMA	0,31	0,48	2,0	0,43	1,42
14	Сталь 35	0,2	0,53	1,63	0,97	1,1
15	08КП	0,355	0,5	0,7	0,342	0,336
16	У8А	0,03	0,39	1,2	2,56	1,12
17	13M5-A	0,28	0,38	0,9	0,305	0,862
18	XH70BMTЮ	0,38	0,68	1,1	0,58	0,481
19	XH77TЮP	0,29	0,62	0,96	0,76	0,437
20	ЛC59-1	0,4	0,55	0,65	0,318	0,176
21	ШX-15	0,2	0,52	1,8	2,6	1,24
22	Д-1	0,3	0,47	0,5	0,2	0,3
23	30XГСА	0,75	1,05	1,45	0,33	0,32
24	Сталь 3	0,25	0,36	∞	0,365	∞
25	Сталь 10	0,3	0,67	2,67	0,803	1,38
26	40X13	0,35	0,84	3,3	0,875	1,37
27	AB	1,25	2,25	3,5	0,59	0,44
28	ЛC62	0,45	1,1	1,5	0,894	0,31
29	Сталь 45	0,15	0,4	1,1	0,981	1,01
30	Д16Т	0,08	0,42	0,9	1,66	0,762
31	X18H9T	0,38	0,76	1,6	0,693	0,744
32	Сталь 20	0,32	0,62	1,23	0,66	0,685
33	AMГ5B	0,735	1,0	1,25	0,31	0,223
34	Д16	0,875	1,25	1,625	0,36	0,262
35	Сталь 35	0,25	0,534	1,63	0,76	1,12
36	Л62	0,4	0,59	1,75	0,39	1,09
37	У8А (2 партія)	0,255	0,39	1,2	0,425	1,12
38	Д16 (2 партія)	0,10	0,41	1,5	1,46	1,30
39	Ст20 (2 партія)	0,3	0,65	1,25	0,773	0,654
40	Ст10 (2 партія)	0,32	0,65	1,42	0,710	0,780
41	Ст38Х2МЮА	0,55	0,75	1,30	0,30	0,551
42	Ст38Х2МЮА термооброблена	0,485	0,74	1,00	0,42	0,30
43	Ст30Х3МФА	0,74	0,85	1,13	0,14	0,28
44	Ст30Х3МФА термооброблена	0,74	0,85	1,13	0,11	0,92

Джерело: [137]

2.3. Висновки до 2 розділу

1. В літературі накопичено значний обсяг експериментальних даних, що стосуються в основному, граничних деформацій різних матеріалів за умови стаціонарного пластичного деформування. Що стосується двох інших компонентів теорії підсумування пошкоджень а саме моделей підсумування пошкоджень та моделей траєкторії деформування макрочастинок матеріалу в небезпечній зоні заготовки, то відповідним питанням в літературі присвячено менше уваги.

2. Переважна більшість найвідоміших моделей руйнування, щоподані в літературі інтегральними представленнями, є, насправді, різними варіантами залежності граничних деформацій від показників напружено-деформованого стану при стаціонарному деформуванні, інтегрованими в модель, що базується на лінійному принципі накопичення пошкоджень. Це зумовлює великий клас загальних для всіх зазначених моделей закономірностей руйнування при нестаціонарному деформуванні.

3. Висвітлено зв'язок між відомим емпіричним критерієм руйнування матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні та теорією підсумовування пошкоджень. Показано, що домінуючий вплив на форму граничної лінії в координатах «осьова – колова логарифмічні деформації» здійснює величина граничної деформації при рівномірному стисненні. І з ростом цієї величини за незмінності інших умов, вказана форма лінії наближається до прямої.

4. Наведені результати отримані на основі аналізу праць з надвисокими наукометричними показниками (кількість посилань Scopus від декількох сотен до декількох тисяч), що вказує на актуальність та високу якість представлених досліджень. Велика кількість посилань на оригінальні роботи є ознакою того, що вони мають значний вплив на наукову спільноту та стосуються актуальної і затребуваної області досліджень. Отже, це означає, що наше дослідження відповідає рівню поточного стану науки, досягнутого

міжнародною науковою спільнотою та має певний потенціал бути включеними до майбутніх наукових дискусій і впливати на розвиток галузі.

5. Відкриття нових закономірностей між зв'язком теорії підсумовування та емпіричним критерієм руйнування свідчить про те, що дослідження не обмежуються лише покращенням існуючих знань, але й сприяють розширенню наукового розуміння, що є ключовою ознакою інноваційності також вказує на високий рівень досліджень.

РОЗДІЛ 3. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТА ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК У ПРОЦЕСАХ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

3.1. Методи аналізу напружено-деформованого стану в процесах ШО

При розробці та вдосконаленні процесів ШО особливо важливою є інформація про напружено-деформований стан (НДС) матеріалу заготовок і вплив на нього різних технологічних параметрів. На підставі такої інформації можна визначати силові параметри процесу, здійснювати оцінку деформовності матеріалу заготовок і стійкості інструментального оснащення, цілеспрямовано розширювати технологічні можливості процесу на стадії його розробки, прогнозувати службові характеристики виробів. Найбільш об'єктивними є результати дослідження НДС матеріалу заготовок, що отримані із застосуванням різних методів досліджень. Відзначимо коротко основні методи дослідження НДС матеріалу заготовок, що використовуються при аналізі процесів ШО.

Інженерний метод. Базується на спільному розв'язанні рівнянь рівноваги й пластичності. Метод висвітлено в працях закордонних науковців: М. Закса, Е. Зибеля, Т. Кармана та ін. Відповідно до даного методу приймається ряд гіпотез (гіпотеза плоских перетинів, Хаара-Кармана, радіального плину матеріалу тощо) і задача зводиться до статично визначеної. При цьому не розглядається кінематика процесів деформування.

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

З огляду на складності механіки формоутворення заготовок методом ШО через вплив численних факторів для аналізу НДС матеріалу найбільш доцільно використовувати різні експериментально-розрахункові методи.

Метод вимірювання твердості. Метод отримав розвиток завдяки працям Г. Д. Деля, В.А. Огороднікова, В.А. Матвійчука та ін. В основу методу покладена залежність між твердістю деформованого металу й інтенсивністю напружень при пластичному деформуванні. Твердість матеріалу пов'язана єдиною залежністю з максимальною, за всю історію пластичного деформування, інтенсивністю напружень σ_i [81]. Причому пружна деформація, в разі циклічного деформування металів, не впливає на твердість. Отже, визначення σ_i за результатами вимірювання твердості можливе лише для випадків пластичної формозміни. Таким чином, для процесів обробки тиском за результатами вимірювання твердості можна визначити в пластичній зоні інтенсивність напружень σ_i , а з урахуванням гіпотези про єдину криву течії і інтенсивність деформацій e_i . Отже, вимірювання твердості є ефективним методом дослідження НДС внутрішніх зон заготовок при обробці тиском без попереднього їх розділення.

При дослідженні тонкопрофільних виробів, отриманих методом ШО, найбільш прийнятним для вимірювання твердості є спосіб Віккерса, що забезпечує мінімальну пластичну зону навколо відбитка. Використання методу вимірювання твердості передбачає наявність градуовального графіка «інтенсивність напружень - твердість - ступінь деформації» ($\sigma_i - HV - e_i$).

Градуовальні графіки металів, що обробляються методами ШО, будують за результатами вимірювання твердості на твердомірі «Віккерс» у перетинах циліндричних зразків, осаджених в умовах лінійного напруженого стану. Зразки осаджують на гідравлічному пресі до різних ступенів (15-20 зразків на один градуований графік). При цьому визначають величини σ_i й e_i за результатами вимірювання розмірів зразків і зусилля осаджування за формулами:

$$\sigma_u = \frac{4P}{\pi d^2}; \varepsilon_i = \ln \frac{h_0}{h}, \quad (3.1)$$

де: P - деформуюче зусилля;

d - діаметр деформованого зразка;

h_0 і h - висота зразка до і після деформування.

Потім зразки розрізають у меридіональному напрямку, поміщають в обойму й заливають епоксидною смолою. Після затвердіння зразки в обоймі шліфують з використанням набору шліфувальних шкурок, полірують і в 10-15 точках перетину вимірюють твердість. За середніми значеннями твердості й розрахованими величинам σ_i і ε_i будують градувальні графіки.

На рис. 3.1 представлений загальний вигляд гідравлічних пресів.



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд гідравлічних пресів

Джерело: сформовано автором

На рис. 3.2 зображені заготовки, отримані методом ШО за комбінованою схемою пряме і зворотне витискування, розрізані, залиті в обойму, прошліфовані та опрацьовані шляхом вимірювання твердості з побудовою ізоліній твердості. З використанням побудованого градувального графіку на їх основі отримані ізолінії інтенсивності напружень й інтенсивності деформацій [45].



*Рисунок 3.2 – Вигляд перерізів заготовок під вимірювання твердості
Джерело: сформовано автором*

На рис. 3.3 і 3.4 побудовані градувальні графіки міді М06 і низко легованих сталей 30ХГСА і 40ХН2МА, відповідно. Особливий інтерес представляє градувальний графік міді М06, яка має сильну залежність інтенсивності напружень від інтенсивності деформацій до значень останньої $\varepsilon_i \geq 1$. Це дозволяє з достатньою точністю визначити за результатами вимірювання твердості інтенсивність деформацій до відносно високих її значень. Тобто, мідь можна використовувати для фізичного моделювання процесів ШО інших металів [45].

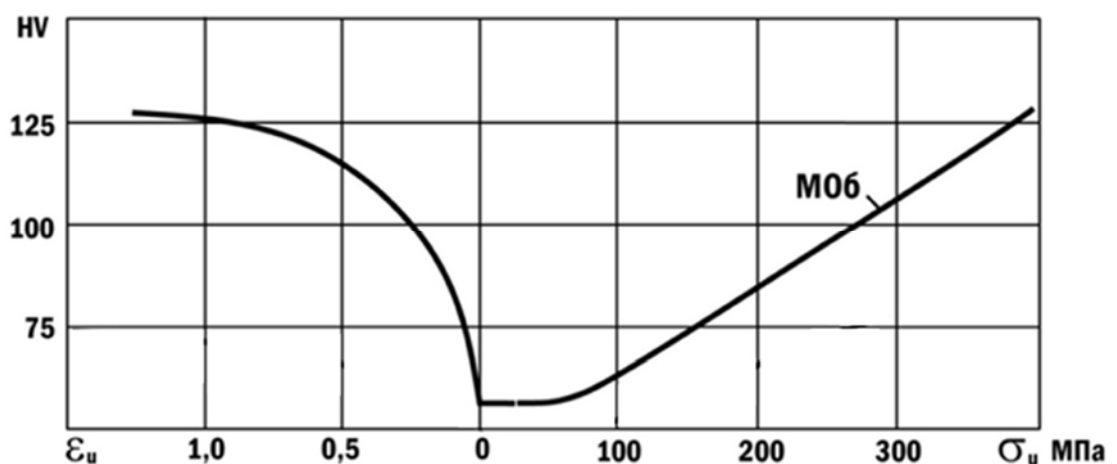


Рисунок 3.3 – Градувальний графік $\sigma_u - HV - \varepsilon_i$ міді М06

Джерело: сформовано автором

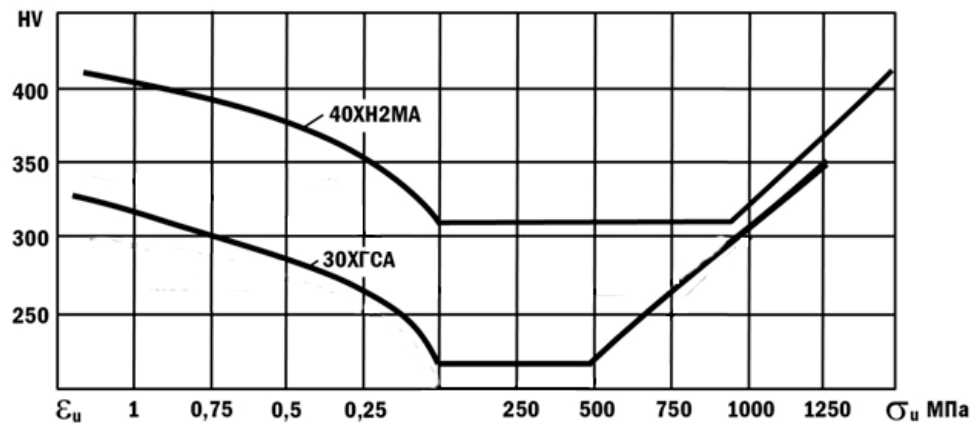


Рисунок 3.4 – Градувальні графіки « $\sigma_u - HV - \epsilon_i$ » низьколегованих сталей

Джерело: сформовано автором

Для дослідження особливо тонкостінних елементів метод вимірювання твердості неприйнятний через малі розміри досліджуваної пластичної зони в порівнянні із розміром відбитку індентора. Тому для аналізу зміцнення зазначених зон використовують вимірювання мікротвердості матеріалу μHV . У порівнянні з методом вимірювання твердості, визначення НДС пластичної зони виміром мікротвердості пов'язано з рядом труднощів. По-перше, при вимірюванні твердості відбиток піраміди багаторазово перекриває різні структурні складові, які мають різну твердість. При однорідному матеріалі в результаті вимірів виходить значення середньої твердості, яка залежить тільки від зміцнення.

При вимірюванні мікротвердості розмір відбитка, як правило, не перевищує розміру окремої структурної складової. Тому для отримання достовірних даних необхідно вимірювати мікротвердість в одній і тій же структурній складовій, бажано в тій, що найбільше зміцнюється. Це не завжди можливо, особливо, якщо треба отримати інформацію у вигляді масиву величин на деякій ділянці.

З іншого боку, оскільки твердість пов'язана з мікротвердістю структурних складових, то цей зв'язок можна представити у вигляді деякої

залежності [102, 103]. В роботі [105] зазначена залежність прийнята у вигляді лінійної моделі:

$$H = H_1\alpha_1 + H_2\alpha_2 + C \quad (3.2)$$

де α_1, α_2, C - постійні, які не залежать від ε_i .

Таким чином, мікротвердість структурних складових можна перерахувати в макротвердість матеріалу й отримати вже обґрунтовану залежність.

З іншого боку, якщо в заготовці є лінії рівня з однаковим ступенем зміцнення, то дослідження НДС можна проводити безпосереднім вимірюванням мікротвердості. Для цього необхідно набрати тільки статистику значень мікротвердості μHV на кожному рівні.

Проведені дослідження показали, що якщо в зоні з однаковим ступенем зміцнення зробити близько 15 вимірювань мікротвердості, то отримаємо її середнє значення, яке однозначно корелює з величинами σ_i і ε_i . При цьому немає необхідності стежити за мікротвердістю якої-небудь окремої структурної складової.

Для побудови градувальних графіків $\sigma_u - HV - \varepsilon_i$ використовують зразки, як і для вимірювання твердості. Однак підготовка поверхні під вимір мікротвердості істотно відрізняється, оскільки навіть незначний наклеп поверхневого шару спотворює результати вимірювань. У той час, як при вимірюванні твердості, наклепаний тонкий шар продавлюється пірамідою і на показання твердості помітно не впливає.

При дослідженні виміром твердості НДС пластичної зони заготовок, отриманих методами ШО, їх розрізають і готують поверхню аналогічно поверхні градувальних зразків. Потім з кроком, що виключає накладення пластичних зон відбитків індентора, проводять вимірювання твердості. За результатами вимірювання твердості деформованої зони і з використанням градувальних графіків отримують ізолінії розподілу σ_i і ε_i . При необхідності точність отриманих результатів на окремих ділянках (як правило,

поблизу вільної поверхні заготовки) перевіряють методом сіток.

Метод ліній ковзання. Використовується для визначення НДС при розв'язанні плоских задач, у яких рівняння рівноваги і пластичності утворюють замкнену систему диференціальних рівнянь гіперболічного типу [143].

За допомогою методу, на основі побудови поля ліній ковзання, що відповідає статичним і кінематичним граничним умовам, визначається розподіл напружень, швидкостей деформацій, величина накопиченого по лініях плину ступеня деформації, показник напруженого стану:

$$\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}, \quad (3.3)$$

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

$I_2(D_\sigma)$ – другий інваріант девіатора напружень. Отримані результати дослідження НДС заготовки дозволяють знаходити енергосилові параметри процесу, величину використаного ресурсу пластичності металу, параметри якості виробленої продукції. Метод полів ліній ковзання був розвинений для умов дослідження процесів прокатки завдяки працям [81] та інших дослідників.

Метод сіток. Належить до найбільш поширеного експериментально-розрахункового методу визначення НДС деформованих заготовок. Зміни координатно-ділильних сіток дозволяють встановити компоненти деформації на різних стадіях процесу деформування [136].

З використанням даної методики дослідження можуть проводитися шляхом поетапного вимірювання координат вузлів, тобто визначенням полів зрушень за певний проміжок часу, з наступним визначенням полів швидкостей деформацій. Напружений стан визначається за співвідношеннями теорії течії. Методика [136] заснована на кінцево-різницевому поданні рівняння рівноваги, що ускладнює її використання в областях зі складною геометрією. Напружений стан розраховується за деформованим станом із використанням співвідношень теорії пластичності. При цьому поле напружень повинно

задовольняти рівнянням рівноваги, умовам пластичності, закону течії і граничним умовам. До недоліків перерахованих методик належить трудомісткість вимірювань і їх недостатня точність при наявності малих деформацій та викривлення сторін осередку сітки.

Метод скінченних елементів (МСЕ). Цей метод є узагальненням варіаційного й належить до ефективних сучасних методів, що дозволяє визначати НДС неоднорідних середовищ [78].

При дослідженні процесів ОМТ накопичено великий досвід використання числових методів для визначення напружено-деформованого стану прямими варіаційними методами, зокрема методом Рітца, при якому вважається тотожною робота зовнішніх та внутрішніх сил. Використання МСЕ дозволяє значною мірою подолати труднощі вибору координатних функцій та використати можливості варіаційних методів для визначення не лише інтегральних, а й локальних характеристик процесів пластичного зміцнення поверхонь деталей машин.

МСЕ є ефективним чисельним методом для розв'язку широкого кола крайових завдань механіки суцільного середовища. Він полягає в заміні досліджуваного об'єкта сукупністю певної кількості дискретних елементів, зв'язаних між собою вузлами. Безпосередній перехід до розрахункової формули дає можливість природно формувати граничні умови, довільно розміщувати вузли сітки елементів.

3.2. Аналіз результатів дослідження НДС матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом ШО

Найбільшого розвитку й використання набули процеси ШО при отриманні складнопрофільних деталей шляхом реалізації радіального плину матеріалу циліндричних заготовок із використанням схем відборткування, роздачі, обтискування та ін. Разом з тим, для ряду заготовок характерним є складний профіль торцевої частини, який можна отримати шляхом прямого

витискування (пів муфти – рис. 3.5а, кільця упорних підшипників – рис.3.6б тощо) [97, 103].

Пряме витискування методом ШО можна реалізувати в розкочувальному штампі з реалізацією необхідного профілю на торці заготовки, протилежному торцю, з яким контактує валок.

На рис. 3.5 зображені технологічні схеми формування та торці заготовки відповідних елементів.

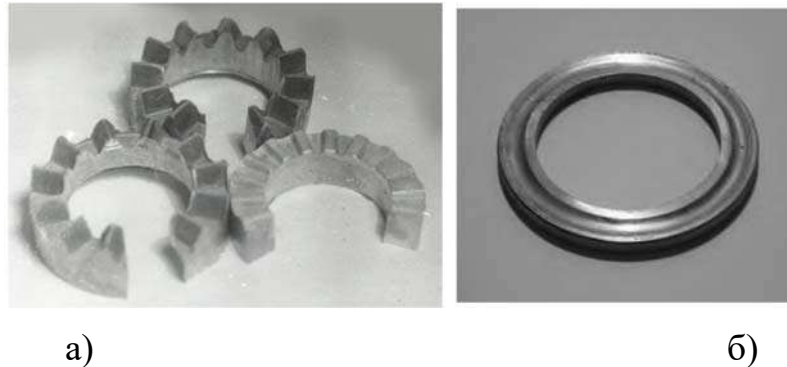


Рисунок 3.5 – Заготовки, отримані методом ШО: а) півмуфти кулачкові, на різних етапах обкочування; б) кільце упорного підшипника

Джерело: [107]

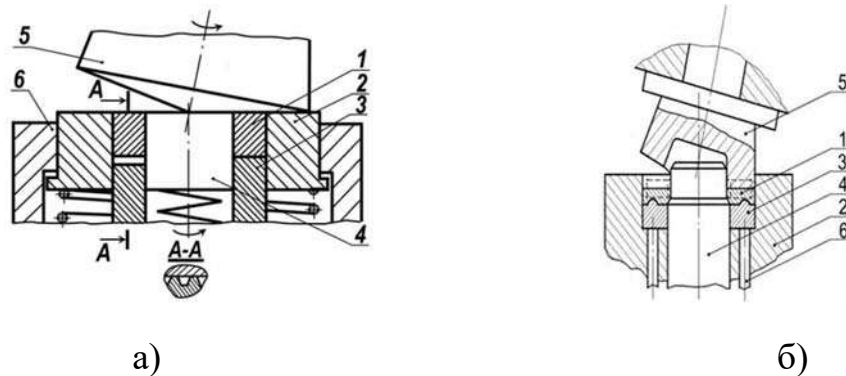


Рисунок 3.6 – Технологічні схеми прямого витискування профілю на торці заготовки методом ШО: а) в підпружиненій матриці й оправці, б) в калібрі штампа

Джерело: [107]

Недостатнє дослідження даного процесу не сприяє розробці технологічних схем із заданим плином матеріалу та формуванням необхідних

елементів виробу. Відсутність інформації про НДС матеріалу заготовки унеможлиблює проведення оцінки деформовності та визначення технологічних можливостей процесу за факторами руйнування матеріалу заготовки і стійкості інструмента. Невизначеною залишається також технологічна спадковість отриманих виробів. Тому дослідження НДС матеріалу заготовок є одним із важливих факторів при вдосконаленні процесів штампування обкочуванням (ШО) [34, 35, 36]. Для встановлення впливу різних технологічних параметрів на НДС матеріалу спочатку нами були застосовані експериментальні методи дослідження – метод вимірювання твердості, метод ділильних сіток та аналіз мікроструктури матеріалу.

Застосування відзначених методів у даній роботі дозволяє побудувати шляхи деформування часток матеріалу в небезпечних зонах заготовки, які використовуються при оцінці деформовності матеріалу.

Для фізичного моделювання процесу прямого витискування методом ШО кільцева заготовка складається із двох кілець – внутрішнього і зовнішнього. На зовнішній циліндричній поверхні внутрішнього кільця наносилася прямокутна ділильна сітка. Вигляд деформованих методом ШО кілець, з відрізаною частиною зовнішнього кільця, показано на рис. 3.7.

На рис. 3.7 подано вид деформованої сітки на поверхні внутрішнього кільця на початковій а), проміжній б) і заключній в) стадіях прямого витискування методом ШО.

На рис. 3.8 – вид деформованої сітки на зовнішній поверхні кулачка.



Рисунок 3.7 – Вид кілець після прямого витискування торцевого профілю методом ШО і відрізання частини зовнішнього кільця

Джерело: [103]

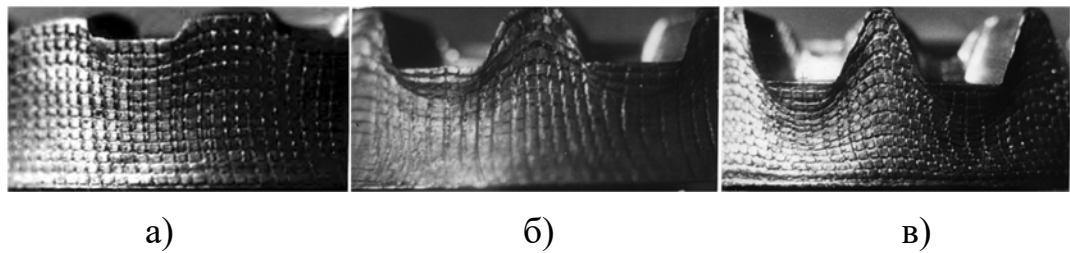


Рисунок 3.8 – Вид деформованої сітки на зовнішній поверхні внутрішнього кільця на різних стадіях прямого витискування методом ШО

Джерело: [103]

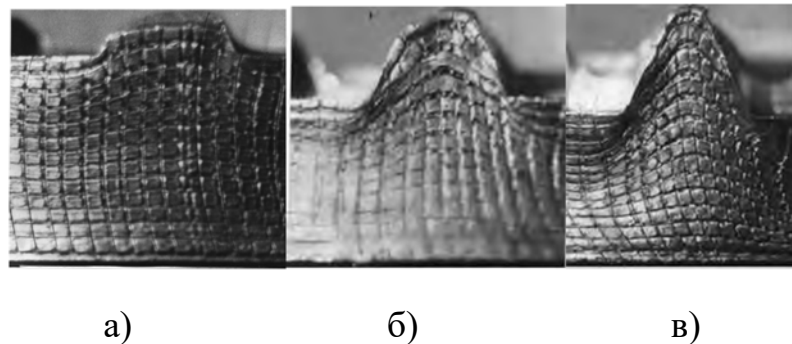


Рисунок 3.9 – Вид деформованої сітки на зовнішній поверхні кулачка на різних стадіях прямого витискування методом ШО

Джерело: [103]

При фізичному моделюванні процесів прямого витискування методом ШО у якості матеріалів заготовок було вибрано мідь М0б і армозалізо. Для міді характерним є висока змінюваність при пластичному деформуванні, що дозволяє з високим ступенем точності визначати розподіл інтенсивності деформацій внутрішніх зон заготовок, а також яскраво виражена, про те не однорідна вихідна мікроструктура. Армозалізо має рівномірну структуру зерен, тому може доповнити результати дослідження мікроструктур цим аналізом.

Вид деформованої мікроструктури матеріалу заготовки з міді М0б в поперечному перерізі кулачка на проміжній і заключній стадії деформування показано на рис. 3.10. На рис. 3.11 представлений збільшений вигляд мікроструктури міді М0б в характерних точках (відповідно до рис. 3.10б) сформованого профілю.

Заготовка з армозаліза (рис. 3.12) має дрібнозернисту структуру, яка досліджувалася для окремих зон при значному збільшенні [103].

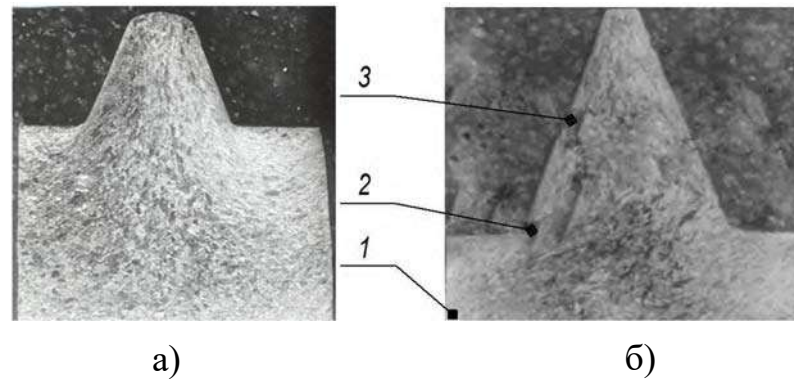


Рисунок 3.10 – Вид деформованої мікроструктури матеріалу заготовки з міді М06 в поперечному перерізі кулачка на проміжній і заключній стадії деформування

Джерело: [103]

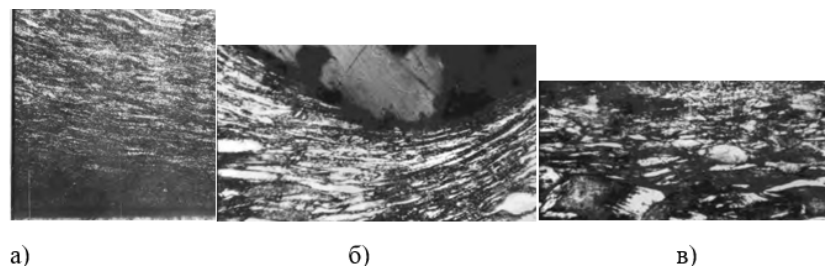


Рисунок 3.11 – Збільшений вигляд мікроструктури заготовки в характерних точках сформованого профілю відповідно до рис. 3.10б: а) – точка 1 (зона контакту з валком); б) – точка 2; в) – точка 3

Джерело: [103]

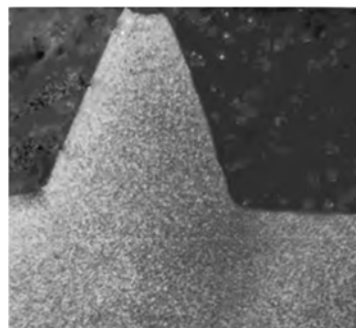


Рисунок 3.12 – Вид деформованої мікроструктури матеріалу заготовки із армозаліза в поперечному перерізі кулачка на заключній стадії деформування

Джерело: [103]

Метод вимірювання твердості є ефективним методом визначення σ_i зон заготовки без попереднього її розділення. Отже, для процесів прямого витискування методом ШО можна визначати впластичній зоні заготовки за результатами вимірювання твердості інтенсивність напружень σ_i , а з урахуванням гіпотези про єдину криву плинності інтенсивність деформацій ε_i .

Градувальний графік міди М06 зображений на рис. 3.3.

Дослідження НДС матеріалу заготовки методом вимірювання твердості проводили за методикою, представленою в роботі [45]. На рис. 3.13 показаний характер розподілу інтенсивності деформацій у зоні витиснутого елемента, отриманий методом вимірювання твердості.

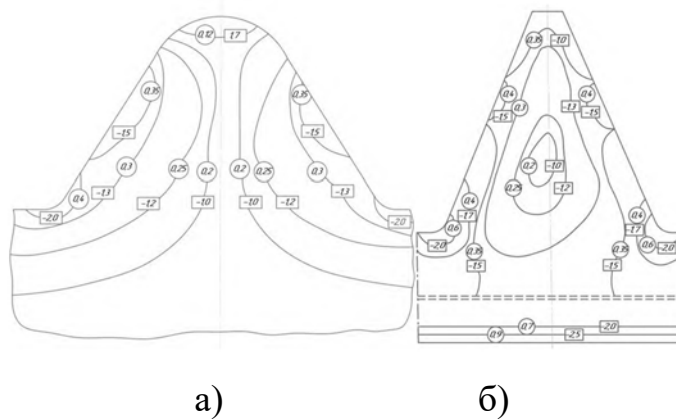


Рисунок 3.13 – Характер розподілу параметрів НДС в елементі заготовки, отриманому витискуванням методом ШО на проміжній а) і заключній б) стадіях: $(\square) \eta = const$ і $(\square) \varepsilon_i = const$

Джерело: [45]

Таким чином, розподіл інтенсивності деформацій у зоні витиснутого елемента (див. рис. 3.13), отриманий методом вимірювання твердості, свідчить про досить нерівномірний характер деформованого стану в перерізі заготовки. Найбільша інтенсивність деформацій, яка спостерігається в зоні контакту валка з заготовкою, сягає значень $\varepsilon_i = 0,9 - 1,0$ та може їх перевищувати. Наступною, найбільш zdeформованою, є зона входу металу в формоутворюючий канал. Тут інтенсивність деформацій сягає значень

$\varepsilon_i = 0,6 - 0,7$. Найменший рівень деформацій спостерігається на вільній вершині витиснутого елемента та в його центральній частині, а інтенсивність деформацій тут сягає значень $\varepsilon_i = 0,1 - 0,2$.

Для дослідження НДС пластичної зони заготовки при прямому витискуванні методом ШО застосовують також метод координатних подільних сіток, побудований на використанні методики, заснованої на теорії R -функцій [105]. При цьому здійснювалося поетапне витискування елемента (див. рис. 3.8) - плоска задача. Характер розподілу ізоліній $\varepsilon_i = const$ у зоні витиснутого елемента, отриманий за результатами вимірювання координатної подільної сітки, поданий на рис. 3.13.

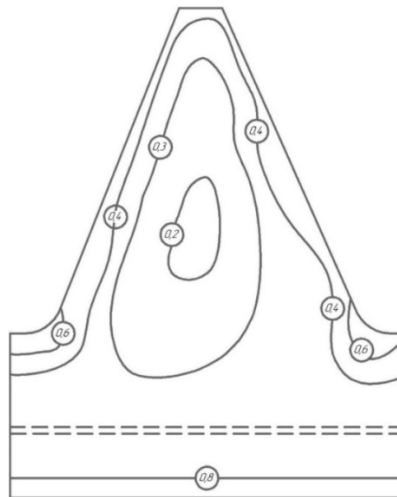


Рисунок 3.14 – Характер розподілу інтенсивності деформацій у площині витиснутого методом ШО кулачка, отриманий за результатами вимірювання координатної подільної сітки

Джерело: [105]

Таким чином, характер розподілу деформованого стану, отриманий методом координатних подільних сіток, співпадає з отриманим за результатами вимірювання твердості. Показник напруженого стану в зоні максимальних деформацій становить $\eta = -2 \dots -2,0$ (див. рис. 3.13). Ці умови свідчать про наявність тут значних напружень стиску, що робить відносно безпечною деформовність матеріалу заготовки. Проте на ділянках поблизу

основи зуба виникає небезпека руйнування інструментального оснащення. Матеріал заготовки у вершини зуба підлягає відносно невеликим деформаціям, проте показник напруженого стану тут $\eta > +1$, що вимагає проведення оцінки деформовності матеріалу.

Під час формування вершини зуба на стадії, коли його поверхня ще не контактує з матрицею і є вільною, НДС матеріалу може бути досліджений з використанням теорії пластичного згину широкої смуги за аналогією, як це зроблено для забуртовки зовнішнього фланця [24, 25].

НДС осередку під час його згинання поперечною силою P досліджується із врахуванням зміцнення. При цьому, як звичайно, нехтується дією сили перерізу Q , що породжують нехтовно малі дотичні напруження, проте враховується згинаючий момент, що створений цією силою, як показано на рис. 3.15.

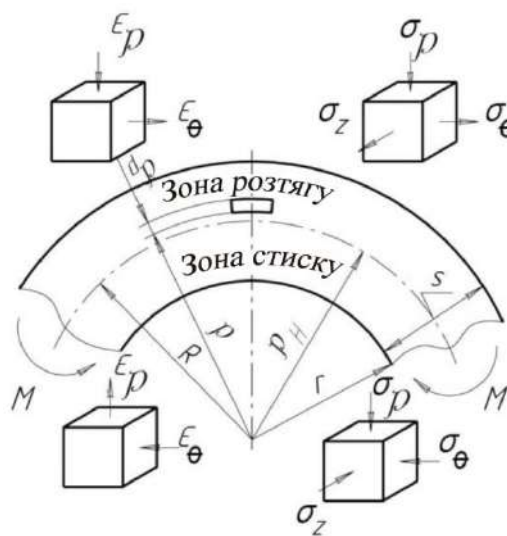


Рисунок 3.15 - Схема напружено-деформованого стану металу при згинанні

Джерело: [25]

Напружений стан елемента у зоні згинання буде об'ємним, а деформований – плоским ($\varepsilon_z = 0$). Загальне рівняння рівноваги елемента зони заготовки постійної товщини при вісесиметричній деформації заготовки із врахуванням сил тертя на контактні поверхні:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\mu\rho}{\sin\alpha} \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0, \quad (3.4)$$

де σ_ρ - меридіональне напруження; σ_θ - широтне напруження; μ - коефіцієнт тертя; ρ - відстань від осі симетрії; R_ρ, R_θ - радіуси кривизни меридіональному та широтному перерізах.

В умовах, коли тертям можна знехтувати, рівняння (3.4) набуває вигляду:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta \quad (3.5)$$

Оскільки маємо рівняння із двома невідомими, то доповнимо його енергетичною умовою пластичності:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\rho)^2} = \sigma_s. \quad (3.6)$$

При плоскій деформації:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2}. \quad (3.7)$$

Тоді із врахуванням (3.7) умова пластичності (3.6) запишеться у вигляді:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s. \quad (3.8)$$

Для отримання розв'язків, що дають аналітичний вираз поля напружень із урахуванням зміцнення, необхідно у першу чергу мати аналітичний вираз кривої зміцнення (залежності напруження текучості від деформації). Використання кривої зміцнення в координатах $\sigma_s - \varepsilon_i$ при аналізі операцій обробки металів тиском призводить до значних математичних труднощів, навіть якщо залежність напруження текучості від інтенсивності деформацій задана простою аналітичною функцією. Ці труднощі обумовлені складним функціональним зв'язком деформацій між собою. Криву зміцнення подано у вигляді степеневі апроксимації [77]:

$$\sigma_s = \sigma_m + A\varepsilon_i^n, \quad (3.9)$$

де σ_m - границя текучості.

Для випадку плоского деформованого стану:

$$\begin{aligned}\varepsilon_\theta &= -\varepsilon_\rho; \\ \varepsilon_z &= 0.\end{aligned}\tag{3.10}$$

Тоді:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\theta - \varepsilon_\rho)^2 + (\varepsilon_\rho - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_\theta.\tag{3.11}$$

Як видно з рис. 3.15:

$$\varepsilon_\theta = \frac{l - l_n}{l_n} = \frac{\rho}{\rho_n} - 1.\tag{3.12}$$

Враховуючи, що:

$$\ln(x) = \ln(1 + (x - 1)) \approx x - 1,$$

отримаємо:

$$\varepsilon_\theta \approx \ln\left(\frac{\rho}{\rho_n}\right).\tag{3.13}$$

Для зони розтягу (зовнішні волокна) розподілення напружень визначатиметься з наступних рівнянь:

$$\left\{\begin{aligned}\rho \cdot \frac{\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta &= 0; \\ \sigma_\rho(R) &= 0; \\ \sigma_\theta - \sigma_\rho &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s; \\ \sigma_z &= \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2}; \\ \sigma_s &= \sigma_m + A\varepsilon_i^n; \\ \varepsilon_i &= \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho}{\rho_n}\end{aligned}\right. .\tag{3.14}$$

Для зони стискання (внутрішні волокна), відповідно:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \cdot \frac{\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0; \\ \sigma_\rho(r) = 0; \\ \sigma_\rho - \sigma_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s; \\ \sigma_z = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2}; \\ \sigma_s = \sigma_m + A\varepsilon_i^n; \\ \varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho_h}{\rho} \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Результатом розв'язання системи рівнянь (3.14) та (3.15) є функція розподілу напружень по товщині заготовки із врахуванням зміцнення.

Для зони розтягу:

$$\sigma_\rho = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[\sigma_m \cdot \ln \left(\frac{\rho}{R} \right) + \frac{2^n}{\sqrt{3}^n} \cdot \frac{A}{n+1} \left[\left(\ln \frac{\rho}{\rho_h} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{R}{\rho_h} \right)^{n+1} \right] \right], \quad (3.16)$$

$$\sigma_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[\sigma_m + A \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_h} \right)^n + \sigma_m \cdot \ln \frac{\rho}{R} + \frac{2^n}{\sqrt{3}^n} \cdot \frac{A}{n+1} \cdot \left[\left(\ln \frac{\rho}{\rho_h} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{R}{\rho_h} \right)^{n+1} \right] \right], \quad (3.17)$$

$$\sigma_z = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \left[\sigma_m + A \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_h} \right)^n \right] + \sigma_m \cdot \ln \frac{\rho}{R} + \frac{2^n}{\sqrt{3}^n} \cdot \frac{A}{n+1} \cdot \left[\left(\ln \frac{\rho}{\rho_h} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{R}{\rho_h} \right)^{n+1} \right] \right] \quad (3.18)$$

для зони стиску:

$$\sigma_\rho = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[\sigma_m \cdot \ln \left(\frac{r}{\rho} \right) + \frac{2^n}{\sqrt{3}^n} \cdot \frac{A}{n+1} \cdot \left[\left(\ln \frac{\rho_h}{\rho} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{\rho_h}{r} \right)^{n+1} \right] \right], \quad (3.19)$$

$$\sigma_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[-\sigma_m - A \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{\rho_h}{\rho} \right)^n + \sigma_m \cdot \ln \frac{r}{\rho} + \frac{2^n}{\sqrt{3}^n} \cdot \frac{A}{n+1} \cdot \left[\left(\ln \frac{\rho_h}{\rho} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{\rho_h}{r} \right)^{n+1} \right] \right], \quad (3.20)$$

$$\sigma_z = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[-\frac{1}{2} \cdot \left[\sigma_m + A \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{\rho_H}{\rho} \right)^n \right] + \sigma_m \cdot \ln \frac{r}{\rho} + \right. \\ \left. + \frac{2^n}{\sqrt{3}^n} \cdot \frac{A}{n+1} \cdot \left[\left(\ln \frac{\rho_H}{\rho} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{\rho_H}{r} \right)^{n+1} \right] \right] \quad (3.21)$$

З формул (3.16) і (3.19) видно, що напруження σ_ρ зростають за абсолютною величиною по мірі віддалення від поверхні заготовки.

В точках нейтральної поверхні при $\rho = \rho_H$ напруження σ_ρ , що визначаються для зон стиску та розтягуються бути одними й тими самими, отже, отримаємо:

$$\sigma_m \cdot \ln \left(\frac{\rho_H^2}{R \cdot r} \right) + \frac{2^n}{\sqrt{3}^n} \cdot \frac{A}{n+1} \left[\left(\ln \frac{\rho_H}{r} \right)^{n+1} - \left(\ln \frac{R}{\rho_H} \right)^{n+1} \right] = 0. \quad (3.22)$$

На рис. 3.16 приведена схема НДС металу в осередку згинання при ШО.

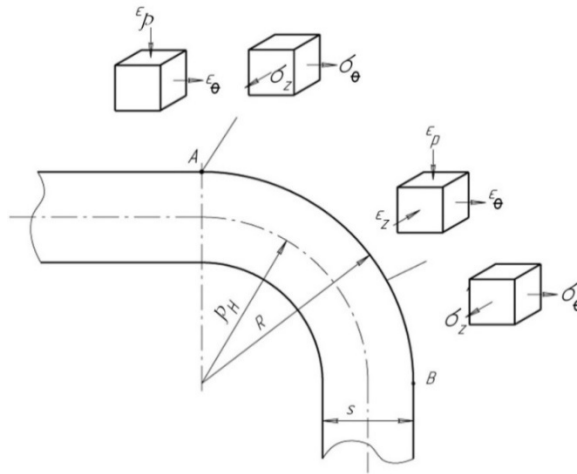


Рисунок 3.16 - Схема НДС металу в осередку згинання при ШО

Джерело: [25]

Згідно з (3.16), (3.17) та (3.18) у небезпечній зоні AB напруження мають значення:

$$\sigma_\rho = 0; \quad (3.23)$$

$$\sigma_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[\sigma_m + A \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho}{\rho_H} \right)^n \right], \quad (3.24)$$

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left[\sigma_m + A \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^n \right]. \quad (3.25)$$

Гідростатичне напруження σ та інтенсивність напружень σ_i при цьому дорівнюють:

$$\sigma = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \left[\sigma_m + A \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^n \right],$$

$$\sigma_i = \sigma_m + A \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^n$$

Тоді показник η , що характеризує напружений стан матеріалу заготовки дорівнює:

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_i} = \sqrt{3} \approx 1,73. \quad (3.26)$$

Отриманий результат свідчить про те що показник напруженого стану в небезпечній зоні заготовки не залежить від радіусу згинання і є сталим протягом усього процесу пластичного деформування.

Колова деформація на зовнішніх волокнах при згинанні нейтральної поверхні на радіус ρ_n :

$$\varepsilon_\theta = \frac{R - \rho_n}{\rho_n} = \frac{s}{2 \cdot \rho_n} = \frac{s}{2 \cdot r + s} = \frac{s}{2 \cdot R_{on} + s}. \quad (3.27)$$

Згідно з (3.11), інтенсивність накопиченої деформації на зовнішніх волокнах у залежності від радіусу оправки визначиться за формулою:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{3} \cdot s}{2 \cdot R_{on} + s} \leq \varepsilon_{*c} (\eta = 1,73), \quad (3.28)$$

де $\varepsilon_{*c} (\eta = 1,73)$ - величина накопиченої деформації, що може сприймати матеріал без руйнування при напружено-деформованому стані, який характеризується показником $\eta = 1,73$. Значення інтенсивності беремо із діаграми пластичності, що побудована у координатах $\eta - \varepsilon_{*c}$.

Важливою особливістю даної технологічної схеми є те, що частки металу з вільної вершини зуба й «жорсткої» схеми напруженого стану, в процесі витискування переходять на контакт з інструментом, де їх деформації продовжують зростати в умовах «пом'якшення» схеми напруженого стану від $\eta = \sqrt{3}$ до відємних значень. Все це необхідно враховувати при побудові шляхів деформування часток матеріалу заготовки, для оцінки його деформовності.

До особливостей деформування належить також те, що як видно з рис. 3.9 і 3.13, НДС по відношенню до профілю витиснутого елемента має певну асиметрію. Це пов'язано із асиметричним прикладенням навантаження при обкочуванні заготовки. Такий характер плинучості є корисним, якщо бічні поверхні елемента мають різні кути нахилу. При необхідності усунення відзначеної асиметрії варто передбачити реверсування заготовки.

При зміні параметрів профілю елемента, що характеризується величинами, приведеними на рис. 3.17, значення інтенсивності деформацій і показника напруженого стану будуть дещо змінюватися, проте характер їх розподілу зберігатиметься. Зберігатиметься також характер розподілу відзначених величин і при зміні матеріалів, якщо умови тертя залишатимуться незмінними.

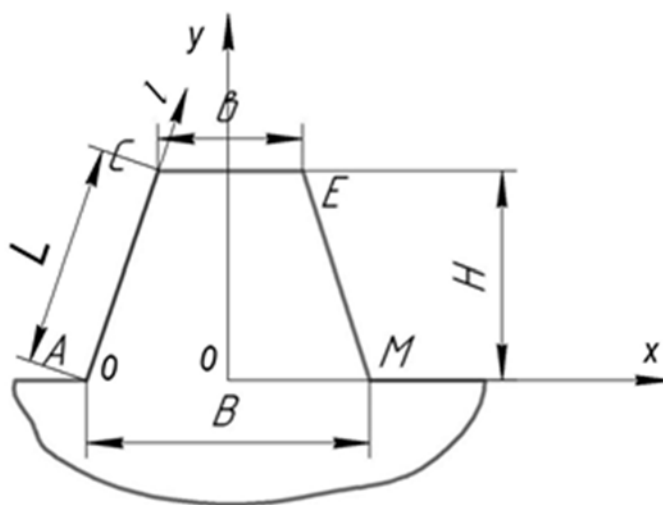


Рисунок 3.17 – Характерні параметри профілю елемента, що витискується методом ШО

Джерело: [25]

Для оцінки деформовності матеріалу заготовки та визначення граничних деформацій, з точки зору запобігання руйнуванню матеріалу або забезпечення необхідних технічних характеристик деталі, необхідно мати шляхи деформування часток небезпечних зон. На рис. 3.18 вказані шляхи деформування часток матеріалу заготовки в найбільш деформованих зонах, отримані методом координатних подільних сіток з використанням теорії R -функцій [48].

Особливість шляхів деформування полягає в тому, що на початковому етапі витискування матеріал на лінії ОМ підлягає розтягу при показнику напруженого стану $\eta = 1,73$. При цьому величина інтенсивності деформацій є відносно незначною, досягаючи для вільної поверхні на заключному етапі формоутворення значень $\varepsilon_i = 0,15 - 0,2$.

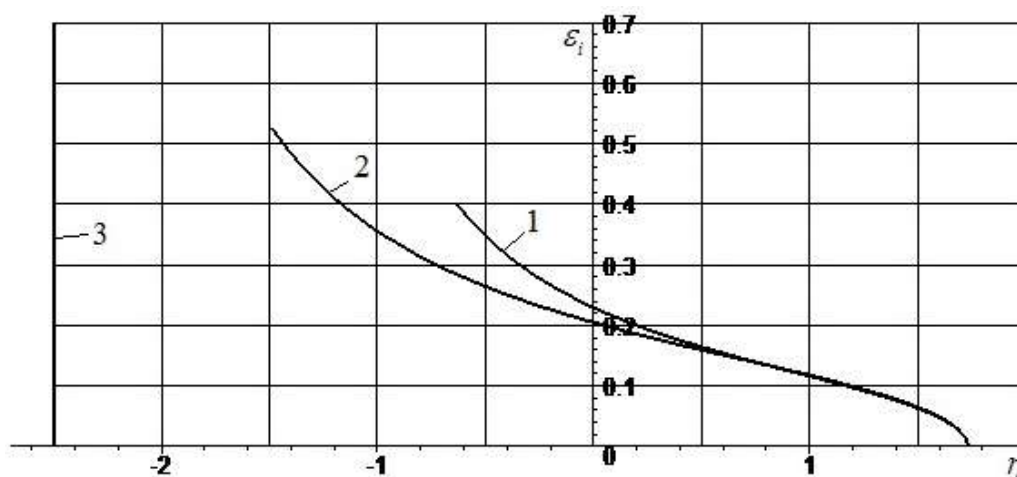


Рисунок 3.18 – Шляхи деформування часток матеріалу заготовки в найбільш характерних деформованих зонах: 1 – посередині бічної поверхні АС; 2 – на вході у формоутворюючий канал (поблизу точки А); 3 – в зоні контакту заготовки з валком

Джерело: [105]

В подальшому, при контакті з бічною поверхнею каналу матриці, деформування продовжується в умовах $\eta = -1,0 \dots -1,5$. Для найбільш деформованої приконтантної з валком зони заготовки шлях деформування 3 можна представити за середнім у зоні натискання валка значенням показника

$$\eta = -2,5 \dots -2,0.$$

3.3. Аналіз результатів дослідження НДС матеріалу заготовок при прямому та зворотному витискуванні методом ШО

Схема ШО, що представлена на рис.3.19а, забезпечує пряме та зворотне витискування тонкостінного елемента фланця й реалізується при додатному зміщенні вершини конічного валка (див рис.3.19а). При зміщенні вершини валка за вісь заготовки можна забезпечити течію матеріалу фланця в середину заготовки.

Схема ШО, представлена на рис.3.19б, забезпечує пряме та зворотне витискування тонкостінного елемента фланця й реалізується при від'ємному зміщенні осі циліндричного валка (див рис.3.19а).

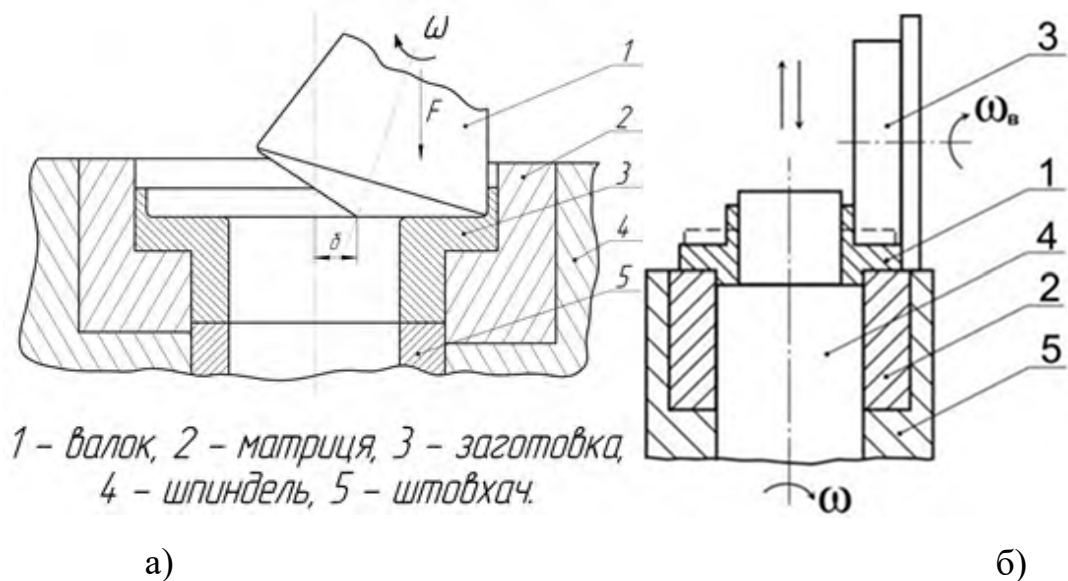


Рисунок 3.19 – Схеми прямого та зворотного витискування фланців з тонкостінними елементами методом ШО на торці кільцевої заготовки конічним а) і циліндричним б) валками: 1 – заготовка; 2– матриця; 3 – валок; 4 – оправка-штовхач; 5– шпindel

Джерело: [105]

Для вдосконалення процесів було проведено аналіз НДС матеріалу заготовки при операціях прямого і зворотного витискування методом ШО.

На рис. 3.20 представлені ізолінії розподілу інтенсивності напружень $\sigma_i = const$ і деформацій $\varepsilon_i = const$, що отримані за результатами вимірювання твердості $\varepsilon_i = const$ в перерізах заготовок на різних стадіях обкочування (відповідні шліфи показані на рис. 3.10).

Аналіз отриманих даних, що стосується першої стадії обкочування, дозволив виявити деякі характерні зони розподілу НДС (рис. 3.20, а).

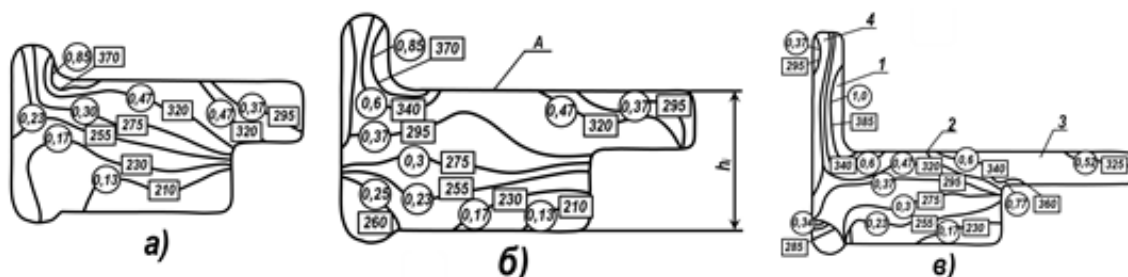


Рисунок 3.20 – Розподіл ізоліній $\varepsilon_i = const(\square)$ і $\sigma_i = const(\square)$ у

перерізах сформованих ШО кільцевих заготовок з міді М06

Джерело: [105]

Найбільш деформованою є зона тонкостінного елемента 1, що формується у результаті плину металу із зони 2. Незначне подальше деформування зони 1, при збільшенні висоти тонкостінного елемента (рис. 3.21, залежність 1), відбувається за рахунок послідовних циклічних зсувів у осьовому напрямі, обумовлених особливостями локального навантаження при ШО, та посиленні опору плину металу в щілину між валком і оправкою;

Зона 2, де найбільша степінь деформації спостерігається на контакті з валком (поверхня А), що поступово зменшується по мірі віддалення від контактної поверхні. Матеріал, при цьому із зони 2 (рис. 3.18, в) переміщується в зони 1 та 3, а інтенсивність його плину в тому чи іншому напрямі залежить від взаємного розташування валка й заготовки:

Зона 3 – фланцева частина заготовки, є зоною відносно рівномірної деформації. Зростання інтенсивності деформацій на периферії фланця, у

залежності від відносного збільшення його довжини, зображена на рис. 3.20 лінією 2.

Розподіл показника напруженого стану η по довжині дуги контакту в середній частині фланця і вздовж контуру заготовки, що формується валком, представлено на рис. 3.22. Таким чином, у зоні з найбільшою інтенсивністю деформацій спостерігається схема напруженого стану, що приблизно відповідає двовісному стиску ($\eta \approx -2$).

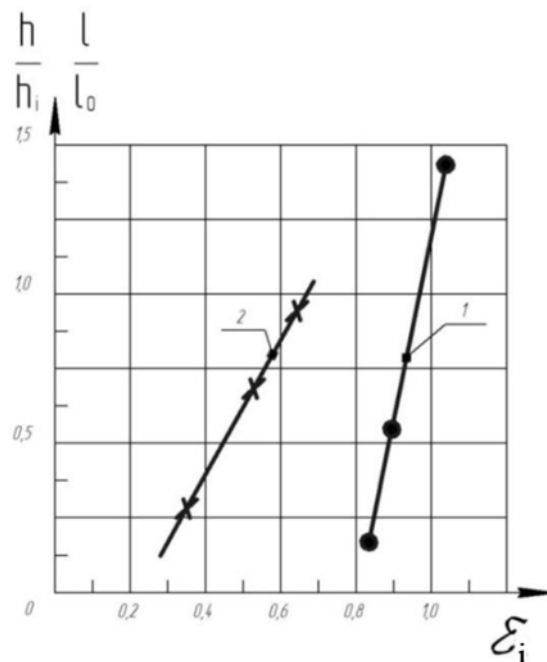


Рисунок 3.21 – Залежність відносної зміни висоти тонкостінного елемента h / h_i від максимальної інтенсивності деформацій (1) та відносного розміру фланця l / l_0 від інтенсивності деформацій на його периферійній ділянці (2), відповідно до рис. 3.20

Джерело: [105]

Використання металів з більш високим опором пластичному деформуванню σ_s , а також збільшення одиничного обтискування Δh призводить до зростання рівня напружень, проте не чинить помітного впливу на значення показника η [101].

Потрібно відзначити, що в зоні формування максимальних деформацій у тонкостінному елементі має місце «м'яка» схема напруженого стану

($\eta < -1,5$). Більш жорстка схема напруженого стану має місце у фланцевій частині заготовки, а саме на периферійній, вільній від контакту з інструментом поверхні (рис. 3.20).

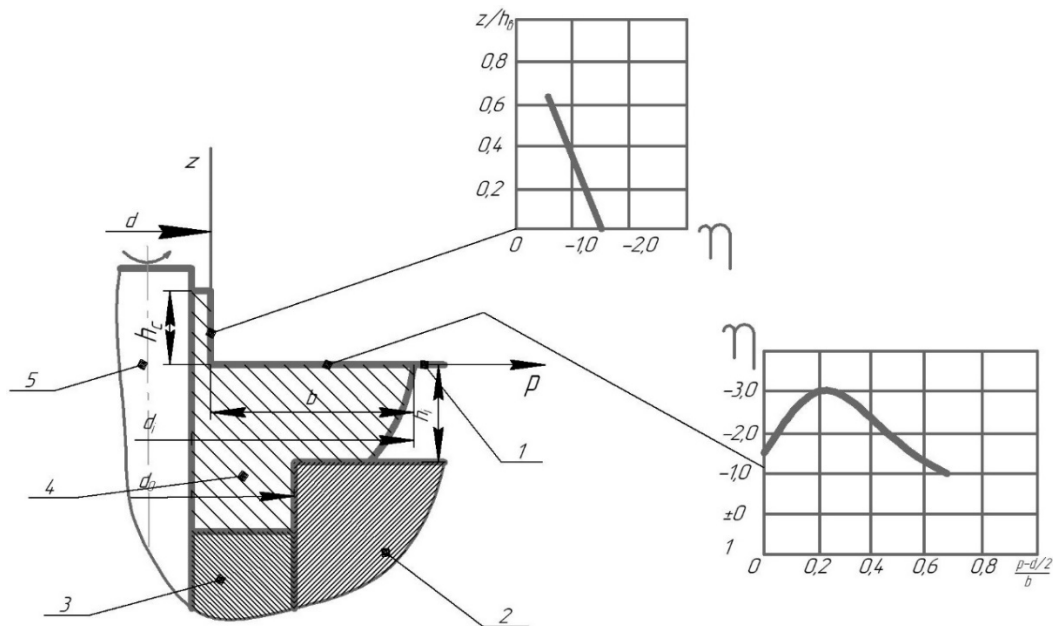


Рисунок 3.20 – Розподіл показника напруженого стану по висоті тонкостінного елементар по ширині фланця

Джерело: [105]

Тому оцінку деформовності матеріалу заготовки, для визначення гранично досяжної інтенсивності деформацій ε_* або величини використаного ресурсу пластичності ψ_B , варто проводити саме для цієї зони.

На рис. 3.21 представлені шляхи деформування часток металу вільної поверхні фланця при його висаджуванні, в залежності від параметрів процесу ШО.

Таким чином, найбільш сприятливими, в плані деформовності, є шляхи деформування при мінімальному відношенню деформованої висоти до товщини стінки заготовки і від'ємному зміщенню вершини валка.

Таким чином, знаючи основні параметри заготовки та її положення при ШО, такі як h_0 , b_0 і δ , ми можемо аналітично описати шляхи деформування часток металу на небезпечній зовнішній поверхні фланця і використати це для

оцінки деформовності матеріалу заготовки.

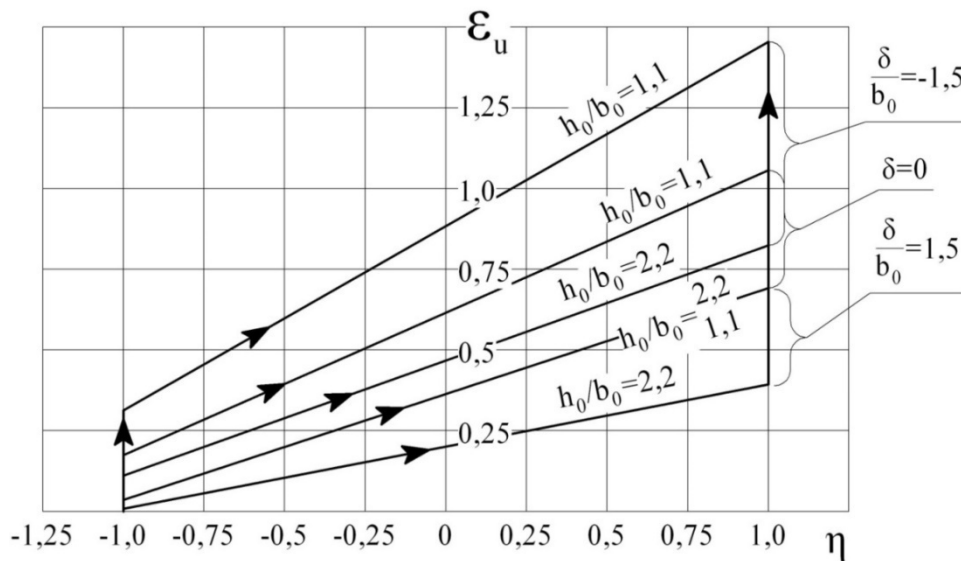


Рисунок 3.21 – Шляхи деформування $\longrightarrow$ вільної поверхні периферійної частини фланця при висаджуванні методом ШО (h_0, b_0 - вихідна під обкочування висота й товщина стінки трубної заготовки, δ - величина зміщення вершини конічного валка від осі заготовки)

Джерело: [105]

3.4. Феноменологічні критерії деформовності металів. Визначення ресурсу пластичності

Для оцінки пластичного стану при великих пластичних деформаціях було розроблено низку критеріїв, що подані в працях В. А. Огородникова [46, 141], Г. Д. Деся [12], В. М. Михалевича [18, 27, 38, 108] та ін. При розрахунку використаного ресурсу пластичності в одноперехідних процесах обробки металів тиском для запобігання пошкодженням використовують деяку скалярну характеристику граничної деформації.

Один з найпростіших критеріїв для оцінки граничного пластичного деформування, може бути записаний у вигляді:

$$e_i = \int_0^{t_0} \epsilon_i d\tau \leq e_p(\eta), \quad (3.29)$$

який можна записати у вигляді:

$$\Psi = \frac{e_i}{e_p(\eta)} \leq 1, \quad (3.30)$$

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

У критерії (3.30) величина e_p залежить від температури випробувань, швидкості деформацій і показника напруженого стану η , якому відповідає момент руйнування матеріалу. При оцінці величини e_p нехтують впливом історії деформування і граничну деформацію, при якій відбувається руйнування, визначають лише показником η .

Критерій деформовності В. Л. Колмогорова [108], отриманий з використанням гіпотези про «пропорційну залежність між накопиченням пошкодженостей приросту деформації», має вигляд:

$$\Psi = \int_0^{t_p^*} E(t-\tau) \cdot B(\tau) \frac{\varepsilon_i(\tau)}{e_p(\eta(\tau))} d\tau \leq 1, \quad (3.31)$$

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

Практичне використання критерію, записаного у вигляді (3.31) ускладнено, оскільки значення коефіцієнтів $E(\tau)$ і $B(\tau)$ при різних процесах пластичного деформування залишаються невизначеними. Тому ці коефіцієнти зазвичай приймаються рівними одиниці. Тоді:

$$\Psi = \int_0^{e_p^*} \frac{de_i}{e_p(e_i)} \leq 1. \quad (3.32)$$

При не динамічних навантаженнях, близьких до простих, критерій (3.32) зводиться до критерію (3.30) при $\eta_1 = const$. У загальному випадку за заданою

функцією $e_i(\eta)$ та діаграмою пластичності можна встановити залежність $e_p(e_i)$ і, виконавши інтегрування в (3.32), провести оцінку деформовності.

У працях В. А. Огороднікова досліджена залежність граничної деформації від схеми напруженого стану, історії деформування і градієнта пластичних деформацій. Спільно з Г. Делем було запропоновано критерій деформування, що враховує нелінійне накопичення пошкоджень і різні шляхи навантаження металу [108]:

$$\Psi = \int_0^{e_i^*} \left(1 + a \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_i} \right) \cdot \frac{e_i^{a \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_i}}}{\left[e_p(\eta(e_i)) \right]^{1 + a \cdot \operatorname{arctg} \frac{d\eta}{de_i}}} de_i \leq 1. \quad (3.33)$$

Застосування критерію (3.33) для процесів, у яких шлях деформування і швидкість зміни показника $\frac{d\eta}{de_i}$ істотно змінюються, призводить до розбіжності розрахункових і експериментальних даних. Критерій (3.33) у зазначеному випадку дає точніші результати. Що стосується порівняння результатів розрахунку граничних деформацій за критеріями (3.31) і (3.32), торозходження залежить від кривизни траєкторії деформування $\frac{d\eta}{de_i}$. У випадку якщо $\frac{d\eta}{de_i} > 4$, розрахунок за критерієм (3.33) дає результати ближчі до експериментальних даних.

Використання критерію (3.33) можливе й у випадках, коли відома поверхня граничних деформацій у координатах $e_p(\eta; \chi)$. У цьому разі в літературі пропонується критерій у вигляді:

$$\Psi = \int_0^{e_p^*} \left(1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right) \right) \cdot \frac{e_i^{0.2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right)}}{\left[e_p(\eta(e_i), \chi(e_i)) \right]^{1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{de_i} + \frac{d\chi}{de_i} \right)}} de_i \leq 1. \quad (3.34)$$

У більшості випадків спостерігається слабкий вплив властивостей матеріалу на шлях деформування частинок матеріалу в небезпечній зоні деформованих заготовок $\eta = \eta(e_i)$. Цей факт підтверджений експериментально для процесів осадки в осьовому й радіальному напрямках, поперечного витискування, холодної висадки, ШО, радіального кування тощо, що описано в роботах В. А. Огороднікова та В. А. Матвійчука [35, 141]. Отже, для розрахунку граничних технологічних параметрів процесів обробки тиском можна скористатися залежностями, знайденими на моделі з іншого матеріалу. Тому при фізичному моделюванні процесів ШО ми часто використовували мідні заготовки.

У розглянутих вище умовах передбачається, що накопичення пошкоджень у деформованому металі підлягає скалярному опису, однак, у разі, коли розглядаються багатоперехідні операції ШО (не динамічне навантаження не є однорідним, з розвантаженням, зміною напрямку деформування, з проявом ефекту Баушингера) відзначається розбіжність розрахункових і експериментальних даних. У цьому випадку треба застосовувати критерії деформованості, в яких за міру пошкоджень прийнято тензор другого рангу, тобто, в загальному випадку критерій повинен враховувати направлений характер пошкоджень. Таким чином, подальшим кроком у розвитку теорії деформування стало подання накопичення пошкодження у вигляді тензора другого рангу.

Ідеї врахування направленої характеру пошкоджень за допомогою тензора пошкоджень належать О. А. Ільюшину. Г. Д. Дель знайшов конкретний вид підінтегральної функції тензора пошкоджень і запропонував тензорно-лінійну модель накопичення пошкоджень при холодному пластичному деформуванні тіл, що мають у вихідному стані ізотропію граничних деформацій. У [108] цей критерій деформування наведено у вигляді:

$$\Psi_{ij} = \int_0^{e_i} \left(1 - a + 2a \frac{e_i}{e_*(\eta)} \right) \cdot \beta_{ij} \frac{de_i}{e_*(\eta)}. \quad (3.35)$$

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

a підбирається так, щоб задовольнити умову руйнування:

$$\Psi_{ij} \cdot \Psi_{ij} = 1 \quad (3.36)$$

У роботах В. М. Михалевича [108] розроблена тензорно-нелінійна модель накопичення пошкоджень:

$$\Psi_{ij} = \int_0^{e_i} \left(A\beta_{ij} + B \left(\beta_{ik}\beta_{kj} - \frac{1}{3}\delta_{ij} \right) \right) de_i, \quad (3.37)$$

де A і B – деякі функції;

$\beta_{ik}\beta_{kj}$ – квадрат тензора β_{ij} ;

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

При простому деформуванні ($\beta_{ij} = \text{const}$) співвідношення (3.37) набуває вигляду:

$$\Psi_{ij} = a\beta_{ij} + b \left(\beta_{ik}\beta_{kj} - \frac{1}{3}\delta_{ij} \right) \quad (3.38)$$

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

В працях В. А. Матвійчука зазначається, під час розробки маловідходних та безвідходних процесів обробки металів тиском значний інтерес становить оцінка деформовності шару металу, що вичерпав ресурс пластичності при руйнуванні зсувним відрізанням, але піддається подальшому деформуванню. Такий стан матеріалу характерний для технологічних операцій, що включають механічне різання, зокрема різання ножицями, де

процес руйнування здійснюється переважно по зсуву, а пошкоджені зони матеріалу залишаються в структурі заготовки.

Подібні процеси мають місце, наприклад, при виробництві кульок, кріпильних виробів тощо. У розроблюваних методах прикладом такого випадку є процес безвідходного різання листів на квадрати з подальшим їх переформуванням методом торцевого прокатування. При цьому на бічній поверхні заготовки, що деформується в умовах осадки з тертям на торцях, у певний момент з'являються мікротріщини, які з часом поширюються в тіло заготовки.

Дослідження процесу утворення та розвитку тріщин у шарах металу після зсувного відрізання, включно з операцією різання ножицями, проводили з використанням математичної моделі накопичення пошкоджень, що базується на тензорно-нелінійному представленні (3.37). Зазначається, також, що ефекти, пов'язані з залишковою пластичною деформацією на другому етапі деформування при вичерпанні ресурсу пластичності на першому етапі, більш повно описуються в рамках моделі (3.37) у порівнянні з моделлю (3.35).

3.5. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням

Вибір критеріального підходу для оцінки деформовності матеріалу заготовок при ШО залежить, головним чином, від виду деформування: просте чи складне. При прямому витискуванні методом ШО, що представлене технологічною схемою на рис. 3.6а, фотографіями на рис. 3.9 і шляхами деформування на рис. 3.18 видно, що шляхи деформування мають певну особливість. Ця особливість полягає в тому, що на початковому етапі витискування матеріал на лінії ОМ (див. рис. 3.17) підлягає розтягу при показнику напруженого стану $\eta = 1,73$. При цьому величина інтенсивності деформацій є відносно незначною, досягаючи для вільної поверхні на заключному етапі формоутворення значень $\varepsilon_i = 0,15 - 0,2$ (див. рис. 3.13, 3.14).

В подальшому, при контакті з бічною поверхнею каналу матриці, деформування частини часток матеріалу продовжується вже в умовах $\eta = -1,0 \dots -1,5$ (див. рис. 3.18). Для найбільш деформованої приконтантної з валком зони заготовки шлях деформування 3 можна представити за середнім у зоні натискання валка значенням показника $\eta = -2,5 \dots -2,0$ (див. рис. 3.18).

З метою оцінки деформовності заготовки необхідно застосувати один із критеріїв деформовності. Побудова математичної моделі деформовності вказаних зон заготовки передбачає побудову відповідних шляхів деформування.

Для моделювання шляхів деформування, що зображені траєкторіями 1, 2 на рис. 3.18, нами сконструйована параметрично задана функція:

$$\begin{cases} \eta(t) = \frac{b \cdot (\operatorname{tg}(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + c \cdot t^2}} \\ \bar{e}_{eq}(t) = m \cdot \int_0^t \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3} \cdot dx \end{cases}, \quad t \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.39)$$

де a, b, c, m - параметри апроксимації.

Перевіримо, чи задовольняє запропонована модель шляхів деформування деяким граничним умовам:

$$1. \quad \lim_{t \rightarrow 0+} \eta(t) = \sqrt{3} \quad (3.40)$$

$$2. \quad \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \eta(t) = -1.5 \div -1. \quad (3.41)$$

Дійсно, для першої умови маємо:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0+} \eta(t) &= \lim_{t \rightarrow 0+} \frac{b \cdot (\operatorname{tg}(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + c \cdot t^2}} = \\ &= \lim_{t \rightarrow 0+} \frac{b \cdot \frac{\operatorname{tg}(t)}{\operatorname{tg}(t)} + (a \cdot \sqrt{1+c} - b) \cdot \frac{t}{\operatorname{tg}(t)}}{\sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2(t)}{\operatorname{tg}^2(t)} + c \cdot \frac{t^2}{\operatorname{tg}^2(t)}}} \end{aligned} \quad (3.42)$$

З урахуванням першої визначеної границі:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sin(t)}{t} = 1$$

та умови:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \cos(t) = 1,$$

матимемо:

$$\lim_{t \rightarrow 0+} \eta(t) = a \quad . \quad (3.43)$$

Звідси випливає, що параметр a дорівнює $a = \sqrt{3}$.

Для другої умови на основі (3.39) можемо записати:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \eta(t) &= \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \frac{b \cdot (tg(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{tg^2(t) + c \cdot t^2}} = \\ &= \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \frac{b \cdot \frac{tg(t)}{tg(t)} + (a \cdot \sqrt{1+c} - b) \cdot \frac{t}{tg(t)}}{\sqrt{\frac{tg^2(t)}{tg^2(t)} + c \cdot \frac{t^2}{tg^2(t)}}} = \end{aligned} \quad (3.44)$$

З урахуванням того, що

$$\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \frac{t}{tg(t)} = 0,$$

матимемо:

$$\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \eta(t) = b. \quad (3.45)$$

Отже, вибір значення параметра b з діапазону, що вказаний у граничній умові 2, визначає стадію процесу деформування заготовки під час її контакту з бічною поверхнею каналу матриці.

Неважко довести, також, що:

$$\lim_{c \rightarrow 0+} \eta(t) = b + (a - b) \cdot \frac{t}{tg(t)},$$

$$\lim_{c \rightarrow +\infty} \eta(t) = a.$$

Певною мірою, вплив вибору конкретного значення цього параметра на форму траєкторії деформування може бути відображений вибором відповідного значення параметра m

На рис. 3.22. відображено вплив вибору значень параметрів функції на форму траєкторії деформування.

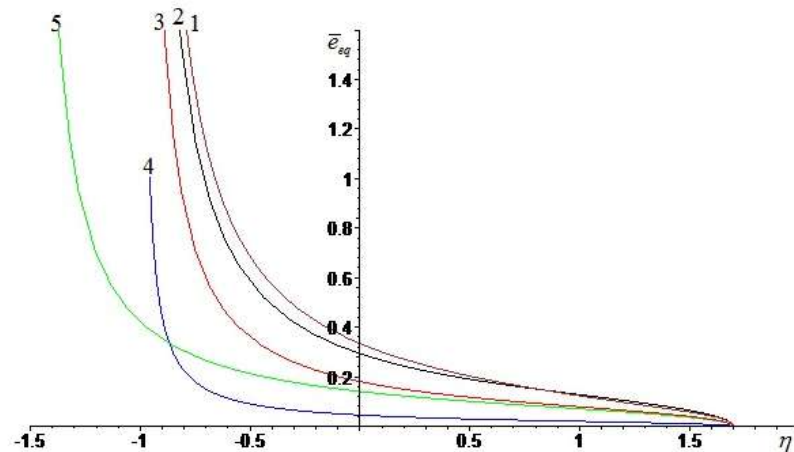


Рисунок 3.22 – Траєкторії деформування: розрахунки за (3.39),
 $a = 1.7$; $1 \div 4 - b = -1$; $5 - b = -1.5$; $2, 3, 4 - c = 0.1$; $1 - c = 30$; $1 - c = 0.08$;
 $1 \div 5 - m = 0.02, 0.065, 0.04, 0.01, 0.04$

Джерело: сформовано автором

Для оцінки деформовності матеріалу заготовок побудували модель накопичення пошкоджень, що базується на критерії В. Огороднікова та певної методики побудови апроксимації кривої граничних деформацій:

$$\psi(t) = \int_0^t \frac{n \cdot m^n \cdot \left(\int_0^x \sqrt{\frac{1}{\cos^4 \tau} + 3} \cdot d\tau \right)^{n-1}}{(\varepsilon_{*s}[\eta(x)])^n} \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3} \cdot dx, \quad (3.46)$$

$$n = 1 + 0.2 \cdot \arctg \left(\frac{d\eta}{d\bar{\varepsilon}_{eq}} \right). \quad (3.47)$$

Використовуватимемо трипараметричну апроксимацію кривої граничних деформацій при стаціонарному деформуванні:

$$\varepsilon_{*s}(\eta) = \varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{\eta}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{\eta^2}{2}}, \quad (3.48)$$

Тоді крива накопичення пошкоджень у координатах $\eta-\psi$ набуває такого вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(t) = \frac{b \cdot (tg(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{tg^2(t) + c \cdot t^2}}, \\ \psi(t) = \int_0^t \frac{n \cdot m^n \cdot \left(\int_0^x \sqrt{\frac{1}{\cos^4 \tau} + 3} \cdot d\tau \right)^{n-1} \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3}}{\left(\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1)}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)} \right)^{\frac{\eta(x)}{2}} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1) \cdot \bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)}{\varepsilon_{fs}^2(\eta=0)} \right)^{\frac{\eta^2(x)}{2}} \right)^n} \cdot dx, \end{array} \right. t \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right], \quad (3.49)$$

Похідна $\frac{d\eta}{d\bar{\varepsilon}_{eq}}$ визначається, як похідна параметрично заданої функції

(3.39). В результаті, модель (3.45), (3.46) набуває доволі громіздкого вигляду.

Аналіз траєкторій деформування, що зображені на рис. 3.22, свідчить, що на початковій стадії деформування, що супроводжується різкою зміною напруженого стану від $\eta \approx 1.7$ до від'ємних значень швидкість $\frac{d\eta}{d\bar{\varepsilon}_{eq}}$ можна

вважати сталою та для різних траєкторій змінюється приблизно в діапазоні від -17 до -4. У цьому випадку, відповідно до (3.46), значення параметра нелінійності n належить діапазону $0.69 \div 0.73$.

На заключній стадії деформування, відповідно до форми траєкторій деформування, показник напруженого стану майже не змінюється на фоні значного збільшення накопиченої деформації. Отже, розрахункова величина накопичення пошкоджень на цій стадії практично не залежить від значення показника нелінійності накопичення пошкоджень n . Це означає, що моделювання деформовності при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням можна здійснювати за умови $n = n_i = const$.

При $n=1$ – матимемо лінійний принцип накопичення пошкоджень, відповідно якого на основі (3.47) матимемо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(t) = \frac{b \cdot (tg(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{tg^2(t) + c \cdot t^2}}, \\ \psi(t) = m \cdot \int_0^t \frac{\sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3}}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1)}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)} \right)^{\frac{\eta(x)}{2}} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1) \cdot \bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)}{\varepsilon_{fs}^2(\eta=0)} \right)^{\frac{\eta^2(x)}{2}}} \cdot dx, \end{array} \right. t \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right], \quad (3.50)$$

Результати моделювання деформовності за вказаних умов показано на рис. 3.23 та у додатку Б.

Із представлених даних видно, що розрахункові значення координат критичних точок для досліджуваної траєкторії деформування нехтовно мало відрізняються один від одного за значенням показника напруженого стану η та суттєво відрізняються за величиною граничної деформації. В усіх випадках розрахункові значення граничної деформації в 2÷4 рази менше, ніж значення накопиченої деформації в точці перетину даної траєкторії з кривою граничних деформацій при стаціонарному навантаженні.

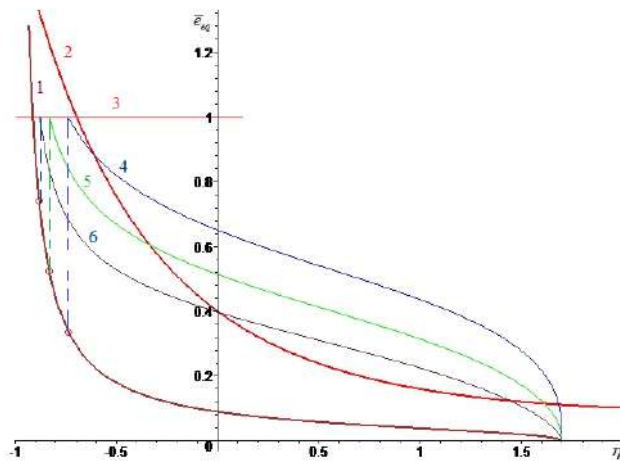


Рисунок 3.23 – Дослідження деформовності матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом ШО: 1- траєкторія деформування (3.39), $a = 1.7, b = -1, c = 0.08, m = 0.02$; 2 – крива граничних деформацій сталі 14X17H2 - розрахунок за (3.48) при $\varepsilon_{*s}(\eta = -1) = 1.6, \varepsilon_{*s}(\eta = 0) = 0.4, \varepsilon_{*s}(\eta = 1) = 0.16$; 4, 5, 6 – криві накопичення пошкоджень -розрахунок за (3.49) при $n = 0.73, 1, 1.27$; $\circ$ - розрахункові значення граничної деформації

Джерело: сформовано автором

З отриманих даних випливає, що в порівнянні з лінійним принципом накопичення пошкоджень, розрахунок за моделлю, що базується на критерії В. А. Огороднікова знижує розрахункові значення граничної деформації. В

той же час, ігнорування співвідношення (3.46) та призначення параметру нелінійності накопичення пошкодження значень, що задовольняють умову $n > 1$, призводить до підвищення розрахункового значення граничної деформації в порівнянні з лінійним принципом накопичення пошкоджень.

3.6. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при зворотньому витискуванні методом штампування обкочуванням

Проведемо оцінку деформовності матеріалу заготовок при операціях прямого й зворотного витискування методом ШО (див. рис. 1.6б і 1.6г).

Схема ШО, що представлена на рис. 1.6б, забезпечує витискування зовнішнього фланця, а схема рис. 1.6г – пряме та зворотне витискування тонкостінного елемента фланця.

На рис. 3.22 показано вигляд заготовок та їх поперечних перерізів при штампуванні обкочуванням, реалізованому за схемами, зображеними на рис. 1.6 відповідно.

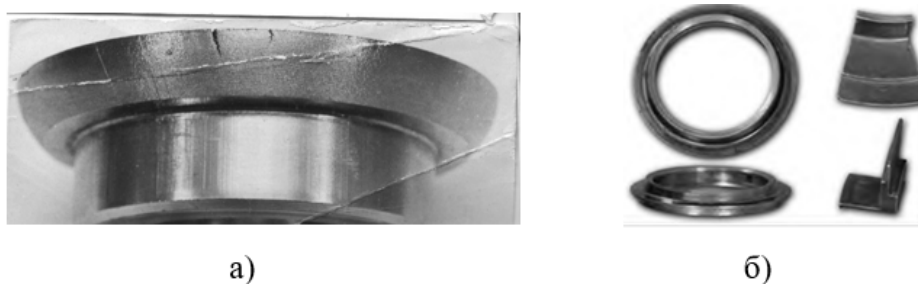


Рисунок 3.24 – Вигляд заготовок при штампуванні обкочуванням, реалізованому за схемами рис. 1.6б і 1.6г

Джерело: сформовано автором

Необхідно відзначити, що форма поверхні периферії фланця і внутрішньої поверхні кільцевої заготовки, а також форма периферії фланця й інтенсивність плину матеріалу в зону тонкостінного елемента суттєво залежать від величини й напрямку зміщення валка δ . Відповідно змінюватиметься і НДС матеріалу заготовки, що є головним фактором при оцінці деформовності матеріалу. Тому аналізу НДС матеріалу найбільш

небезпечних зон заготовок була приділена значна увага [101, 102].

На рис. 3.5 представлені ізолінії розподілу інтенсивності напружень $\sigma_i = \text{const}$ $\sigma_u = \text{const}$ деформацій $\varepsilon_i = \text{const}$, що отримані за результатами вимірювання твердості $\varepsilon_i = \text{const}$ в перерізах заготовок, виготовлених за технологічними схемами, представленими на рис. 1.6г і 1.6б.

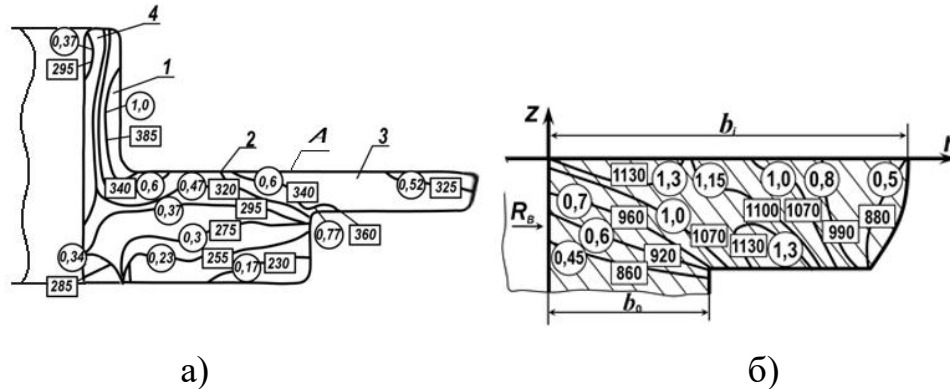


Рисунок 3.25 – Розподіл ізоліній $\varepsilon_i = \text{const}$ ($\square$) $\varepsilon_u = \text{const}$ і $\sigma_i = \text{const}$ ($\square$)

$\sigma_u = \text{const}$ в перерізах, сформованих ШО кільцевих заготовок: а) з міді М06, де 1, 2, 3, 4 – характерні зони заготовки; б) зі сталі 30ХГСА

Джерело: [101]

Таким чином, у сформованому методом обкочування перерізі заготовки (рис. 3.24 а) можна виділити характерні зони розподілу НДС, які описані раніше.

При висаджуванні фланця за схемою 1.6б найбільш жорстка схема напруженого стану має місце на периферійній, вільній від контакту з інструментом, випуклій поверхні. Тому оцінку деформовності матеріалу заготовки, для визначення гранично досяжної інтенсивності деформацій ε_* або величини використаного ресурсу пластичності ψ_B , потрібно проводити саме для цієї зони.

Оцінку деформовності проводимо на основі феноменологічної теорії, для чого скористаємося побудованими кривими граничних деформацій і шляхами деформування часток металу небезпечної зони заготовки в координатах « $\varepsilon_i - \eta$ ».

На рис. 3.26 представлені криві граничних деформацій сталей і шляхи деформування часток металу вільної поверхні фланця при його висаджуванні, у залежності від параметрів процесу ШО [105, 134, 137, 138].

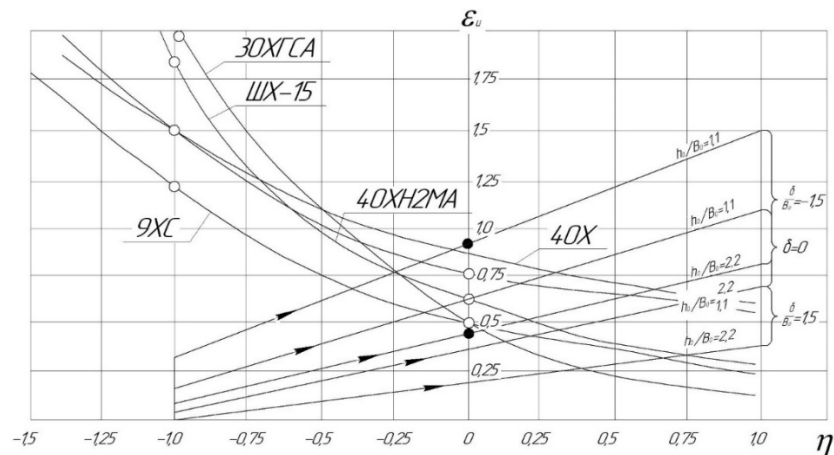


Рисунок 3.26 – Криві граничних деформацій сталей —○— і шляхи деформування —→— вільної поверхні периферійної частини фланця при висаджуванні методом ШО (h_0, b_0 - вихідна під обкочування висота й товщина стінки трубної заготовки, δ - величина зміщення вершини конічного валка від осі заготовки (див. рис. 1.7а))

Джерело: [138]

Шляхи (траєкторії) деформування на рис. 3.25 показані певною мірою схематично, за результатами проведених експериментів. Побудуємо математичну модель цих траєкторій.

Як базисну, візьмемо однопараметричну функцію, що «склеєна» з елементарної функції синус та дотичної до неї в деякій точці.

Загальний вигляд дотичної до графіка функції $\varepsilon_i = f(\eta)$ в точці η_1 має вигляд:

$$\varepsilon_i = f'(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1) + f(\eta_1) . \quad (3.51)$$

Для функції $\varepsilon_i = \sin(\eta)$ рівняння дотичної прямої в точці η_1 матиме вигляд:

$$\varepsilon_i = \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1) . \quad (3.52)$$

Отже, базисна функція набуває вигляду:

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \sin(\eta), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1), & \eta > \eta_1 \end{cases} \quad (3.53)$$

Отримана функція є сплайн-подібною. Тобто ця функція «склеєна» з двох різних функцій: частин синусоїди та дотичної до неї. В точці «склейки» $\eta = \eta_1$ виконується не тільки умова неперервності функції, а й її першої похідної.

Графіки функцій, що описуються рівнянням (3.50) за різних значень η_1 , наведено на рис. 3.27 [138].

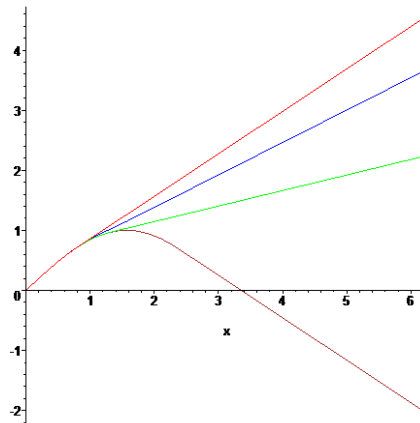


Рисунок 3.27 – Графіки математичної моделі траєкторій

деформування (3.51) за різних значень $\eta_1 = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{3\pi}{4}$

Джерело: сформовано автором

Аналіз НДС вільної поверхні периферійної частини фланця при висаджуванні методом ШО показав, що початкова ділянка траєкторії деформування близька до вертикальної прямої, отже, для забезпечення цієї умови необхідно графіки кривих, що показані на рис. 3.25, повернути проти руху годинникової стрілки на деякий кут [138].

При повороті осей координат на кут α за годинниковою стрілкою формули переходу від старих координат (x, y) до нових (x', y') або від старих до нових мають відповідно вигляд:

$$\begin{cases} x = x' \cdot \cos(\alpha) + y' \cdot \sin(\alpha) \\ y = -x' \cdot \sin(\alpha) + y' \cdot \cos(\alpha) \end{cases} \quad (3.54)$$

$$\begin{cases} x' = x \cdot \cos(\alpha) - y \cdot \sin(\alpha) \\ y' = x \cdot \sin(\alpha) + y \cdot \cos(\alpha) \end{cases} \quad (3.55)$$

Знайдемо координати $(\eta'_1, \varepsilon'_{i1})$ точки $(\eta_1, \sin(\eta_1))$ в нових осях координат (η', ε'_i) при повороті кривої (3.49) відносно початку координат на кут α проти годинникової стрілки. Для цього використовуватимемо співвідношення (3.55):

$$\begin{cases} \eta'_1 = \eta_1 \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta_1) \cdot \sin(\alpha) \\ \varepsilon'_{i1} = \eta_1 \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta_1) \cdot \cos(\alpha) \end{cases} \quad (3.56)$$

При $\alpha = \frac{\pi}{4}$ попередні співвідношення набувають спрощеного вигляду:

$$\begin{cases} \eta'_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta_1 - \sin(\eta_1)) \\ \varepsilon'_{i1} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta_1 + \sin(\eta_1)) \end{cases} \quad (3.57)$$

На основі отриманого співвідношення складемо таблицю відповідності між старими та новими координатами для деяких точок при $\alpha = \frac{\pi}{4}$.

Таблиця 3.1

Відповідність між координатами для деяких точок при $\alpha = \frac{\pi}{4}$

η_1	$\frac{\pi}{4} \approx 0,79$	$\frac{\pi}{3} \approx 1,1$	$\frac{\pi}{2} \approx 1,57$	$\frac{3\pi}{4} \approx 2,36$
$\sin(\eta_1)$	$\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,71$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,87$	1	$\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,71$
η'_1	$\frac{\sqrt{2}\pi}{8} - \frac{1}{2} \approx 0,06$	$\frac{\sqrt{2}\pi}{6} - \frac{\sqrt{6}}{4} \approx 0,13$	$\frac{\sqrt{2}\pi}{4} - \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,4$	$\frac{3\sqrt{2}\pi}{8} - \frac{1}{2} \approx 1,17$
ε'_{i1}	$\frac{\sqrt{2}\pi}{8} + \frac{1}{2} \approx 1,06$	$\frac{\sqrt{2}\pi}{6} + \frac{\sqrt{6}}{4} \approx 1,36$	$\frac{\sqrt{2}\pi}{4} + \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 1,81$	$\frac{3\sqrt{2}\pi}{8} + \frac{1}{2} \approx 2,17$

Джерело: сформовано автором

В нових осях координат (η', ε'_i) рівняння типу (3.51), з урахуванням

формул перетворення (3.53), набуватиме такого виду:

$$\begin{cases} \eta' = \eta \cdot \cos(\alpha) - \varepsilon_i(\eta) \cdot \sin(\alpha) \\ \varepsilon'_i = \eta \cdot \sin(\alpha) + \varepsilon_i(\eta) \cdot \cos(\alpha) \end{cases} \quad (3.58)$$

Перепишемо останню систему рівнянь з урахуванням вигляду базисної функції (3.51):

$$\begin{cases} \eta' = \begin{cases} \eta \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta) \cdot \sin(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \cos(\alpha) - [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \sin(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = \begin{cases} \eta \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta) \cdot \cos(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \sin(\alpha) + [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \cos(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (3.59)$$

При $\alpha = \frac{\pi}{4}$ на основі (3.57) матимемо:

$$\begin{cases} \eta' = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{cases} \eta + \sin(\eta), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1), & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \begin{cases} -\eta + \sin(\eta), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ -\eta + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (3.60)$$

На рис. 3.26 побудовано графіки математичної моделі траєкторій деформування (3.51) за різних значень $\eta_1 = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{3\pi}{4}$

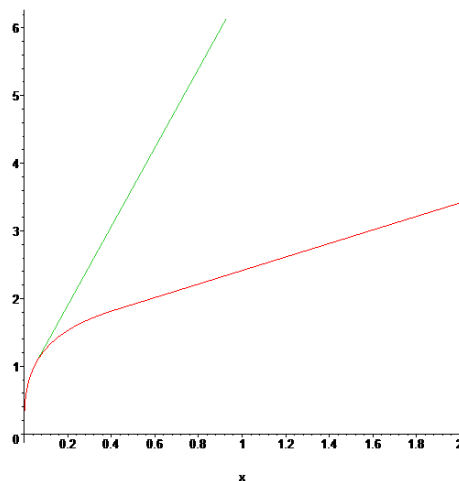


Рисунок 3.28 – Графіки математичної моделі траєкторій деформування

(3.51) за різних значень $\eta_1 = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{3\pi}{4}$

Джерело: сформовано автором

Зсунемо графік базисної функції ліворуч на 1 так, щоб задовольнити умову:

$$\varepsilon_i(\eta = -1) = 0, \quad (3.61)$$

Отримаємо:

$$\begin{cases} \eta' = \begin{cases} \eta \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta) \cdot \sin(\alpha) - 1, & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \cos(\alpha) - [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \sin(\alpha) - 1, & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = \begin{cases} \eta \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta) \cdot \cos(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \sin(\alpha) + [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \cos(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (3.62)$$

Графіки функцій, що описуються отриманим рівнянням за різних значень η_1 , наведено на рис. 3.27.

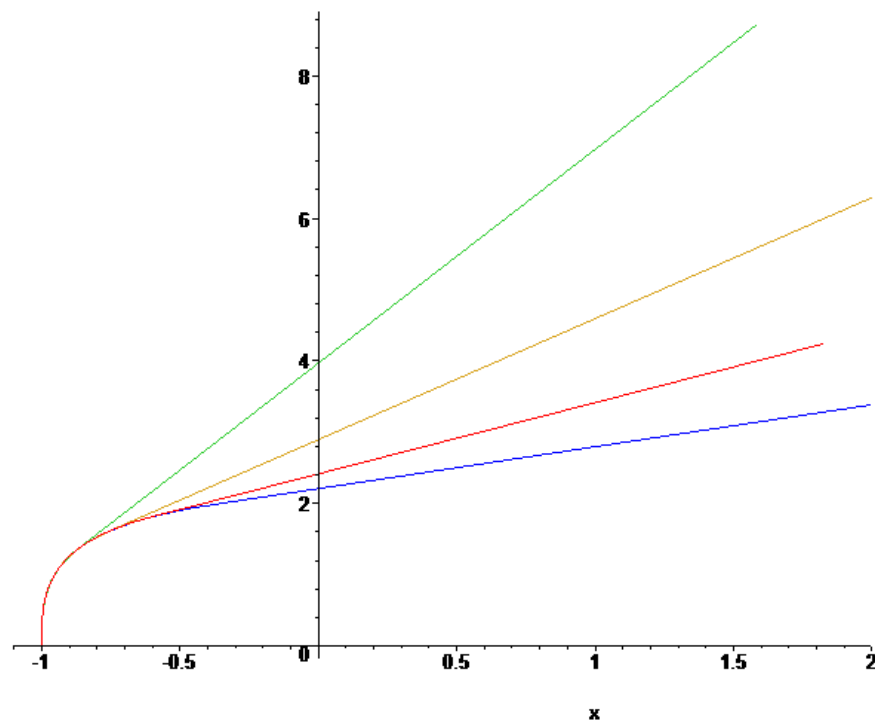


Рисунок 3.29 – Графіки математичної моделі траєкторій деформування

$$(3.60) \text{ за різних значень } \eta_1 = \frac{\pi}{4}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{3\pi}{4}.$$

Джерело: сформовано автором

Узагальнимо останню апроксимацію шляху деформування з метою описання довільного діапазону зміни накопиченої пластичної деформації [138]:

$$\begin{cases} \eta' = \begin{cases} \eta \cdot \cos(\alpha) - \sin(\eta) \cdot \sin(\alpha) - 1, & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \cos(\alpha) - [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \sin(\alpha) - 1, & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i = b \cdot \begin{cases} \eta \cdot \sin(\alpha) + \sin(\eta) \cdot \cos(\alpha), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \eta \cdot \sin(\alpha) + [\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)] \cdot \cos(\alpha), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (3.63)$$

де b - стала, що залежить від параметрів технологічного процесу.

Для зручності подальшого використання перепозначимо в останньому співвідношенні деякі змінні відповідно до традиційних позначень теорії деформовності, тоді

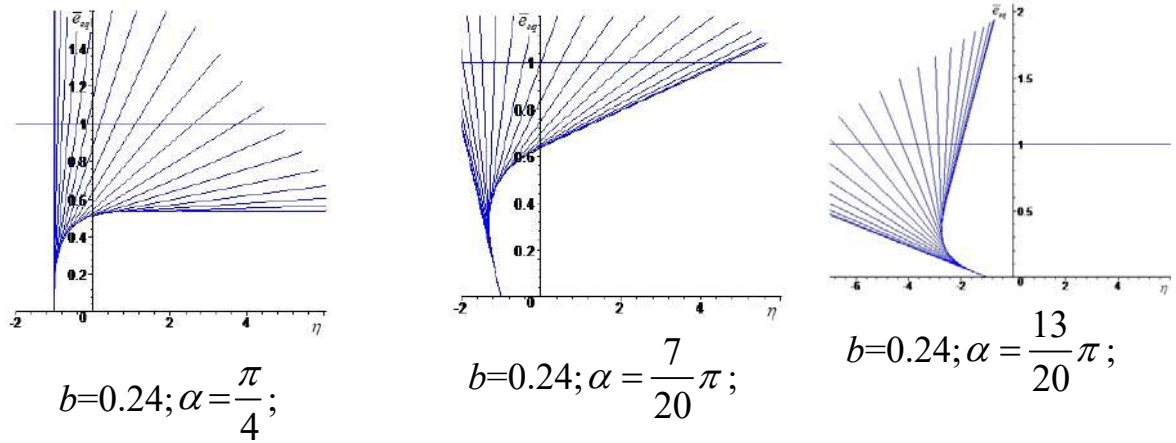
$$\begin{cases} \eta = \begin{cases} t \cdot \cos(\alpha) - \sin(t) \cdot \sin(\alpha) - 1, & 0 \leq t \leq x_0 \\ t \cdot \cos(\alpha) - [\sin(x_0) + \cos(x_0) \cdot (t - x_0)] \cdot \sin(\alpha) - 1, & \eta > x_0 \end{cases} \\ \bar{\varepsilon}_{eq} = b \cdot \begin{cases} t \cdot \sin(\alpha) + \sin(t) \cdot \cos(\alpha), & 0 \leq t \leq x_0 \\ t \cdot \sin(\alpha) + [\sin(x_0) + \cos(x_0) \cdot (t - x_0)] \cdot \cos(\alpha), & t > x_0 \end{cases} \end{cases}, \quad (3.64)$$

де відповідність між попередніми та новими позначеннями має такий вигляд

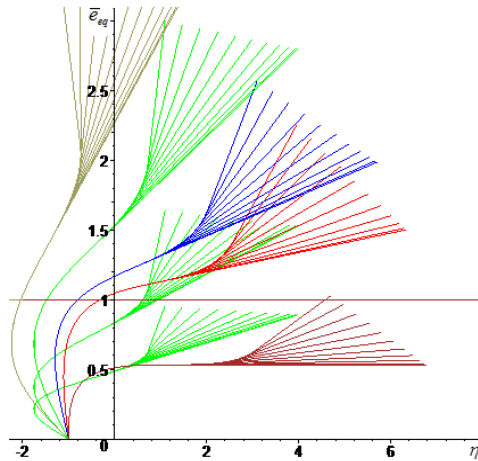
Попередні позначення	η'	ε'_i	η	η_1
Нові позначення	η	$\bar{\varepsilon}_{eq}$	t	x_0

Отже, на базі однопараметричної сплайн-подібної функції ми побудували трипараметричну модель траєкторії деформацій, що задана параметрично.

Результати моделювання траєкторій деформування за отриманим співвідношенням показано на рис. 3.30 а, б.



$$a) x_0 = 0, \frac{\pi}{20}, \frac{\pi}{10}, \frac{3\pi}{20}, \frac{\pi}{5}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{10}, \frac{7\pi}{20}, \frac{2\pi}{5}, \frac{9\pi}{20}, \frac{\pi}{2}, \frac{11\pi}{20}, \frac{3\pi}{5}, \frac{13\pi}{20}, \frac{7\pi}{10}, \frac{3\pi}{4}, \frac{4\pi}{5}, \frac{17\pi}{20}, \frac{9\pi}{10}, \frac{19\pi}{20}, \pi.$$



$$b) x_0 = \pi, \frac{21\pi}{20}, \frac{11\pi}{10}, \frac{23\pi}{20}, \frac{6\pi}{5}, \frac{5\pi}{4}, \frac{13\pi}{10}, \frac{27\pi}{20}, \frac{7\pi}{5}, \frac{29\pi}{20}, \frac{3\pi}{2};$$

$$\text{khaki} - b=0.44; \alpha = \frac{11}{20}\pi; \text{green} - b=0.44, 0.24, 0.14; \alpha = \frac{9}{20}\pi;$$

$$\text{blue} - b=0.44; \alpha = \frac{7}{20}\pi; \text{red} - b=0.44; \alpha = \frac{3}{10}\pi; \text{brown} - b=0.24; \alpha = \frac{\pi}{4}.$$

Рисунок 3.30 – Траєкторії деформування макрочастинок матеріалу заготовки під час операцій штампування обкочуванням за різними технологічними схемами:

$$x_0 = \pi, \frac{21\pi}{20}, \frac{11\pi}{10}, \frac{23\pi}{20}, \frac{6\pi}{5}, \frac{5\pi}{4}, \frac{13\pi}{10}, \frac{27\pi}{20}, \frac{7\pi}{5}, \frac{29\pi}{20}, \frac{3\pi}{2}$$

Джерело: сформовано автором

Аналіз отриманих результатів показує, що запропонована методика

побудови моделі траєкторії деформацій та побудована модель цілком працездатні та доволі ефективні в плані відображення особливостей перебігу зміни напружено-деформованого стану матеріалу заготовки під час технологічних операцій штампування обкочуванням.

Використаємо окремий, спрощений варіант попереднього співвідношення при $\alpha = \frac{\pi}{4}$:

$$\begin{cases} \eta'(\eta) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta - \sin(\eta)) - 1, & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta - \sin(\eta_1) - \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)) - 1, & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon'_i(\eta) = b \cdot \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta + \sin(\eta)), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\eta + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (\eta - \eta_1)), & \eta > \eta_1 \end{cases} \end{cases} \quad (3.65)$$

Надалі використовуватимемо модель підсумовування пошкоджень зі степеневою апроксимацією функції пошкоджень:

$$\psi(\bar{\varepsilon}_i) = \int_0^{\bar{\varepsilon}_i} \frac{n \cdot \varepsilon_i^{n-1}}{\left[\varepsilon_{*s}(\eta(\varepsilon_i)) \right]^n} \cdot d\varepsilon_i \leq 1, \quad \bar{\varepsilon}_i \leq \varepsilon_*, \quad (3.66)$$

де n – матеріальна стала, що характеризує міру нелінійності підсумовування пошкоджень.

Якщо $n=1$ – нелінійна модель (3.63) вироджується в модель, що відображує лінійний принцип підсумовування пошкоджень:

$$\psi(\bar{\varepsilon}_i) = \int_0^{\bar{\varepsilon}_i} \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{*s}[\eta(\varepsilon_i)]} \leq 1, \quad \bar{\varepsilon}_i \leq \varepsilon_*, \quad (3.67)$$

За умови $n = 1 + 0.2 \cdot \arctg\left(\frac{d\eta}{d\varepsilon_i}\right)$ – нелінійна модель (3.63) стає тотожною критерію В. Огороднікова.

У випадку параметричного рівняння шляху деформування:

$$\begin{cases} \eta = \varphi(t) \\ \varepsilon_i = \omega(t) \end{cases} \quad (3.68)$$

лінійний принцип підсумовування пошкоджень (3.64) набуває вигляду:

$$\psi(\bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \frac{\omega'(t) \cdot dt}{\varepsilon_{*s}[\eta(t)]} \leq 1, \bar{t}_i \leq t_*, \omega(t_*) = \varepsilon_* \quad (3.69)$$

Таким чином, нами описаний загальний вираз моделі лінійного підсумовування пошкоджень для випадку параметричного завдання шляху деформування $\eta - \varepsilon_i$.

Використовуватимемо в подальшому трипараметричну апроксимацію кривої граничних деформацій при стаціонарному деформуванні:

$$\varepsilon_{*s}(\eta) = \varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{\eta}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{\eta^2}{2}}. \quad (3.70)$$

Оскільки шлях деформування заданий у вигляді параметричних співвідношень, то останню апроксимацію також запишемо в параметричному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(t) = \begin{cases} y_1(t), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ y_2(t), & \eta > \eta_1 \end{cases} \\ \varepsilon_{*s}(t) = \varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{y_1(t)}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{y_1^2(t)}{2}}, & 0 \leq t \leq \eta_1, \\ \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{y_2(t)}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{y_2^2(t)}{2}}, & t > \eta_1 \end{cases} \end{array} \right. \quad (3.71)$$

де

$$\begin{aligned} y_1(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (t - \sin(t)) - 1, \\ y_2(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (t - \sin(\eta_1) - \cos(\eta_1) \cdot (t - \eta_1)) - 1 \end{aligned} \quad (3.72)$$

З урахуванням (3.64), (3.66) можемо записати:

$$\omega'(t) = b \cdot \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (1 + \cos(\eta)), & 0 \leq \eta \leq \eta_1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (1 + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (1 - \eta_1)), & \eta > \eta_1 \end{cases}. \quad (3.73)$$

В результаті модель (3.67), що базується на лінійному принципі

підсумовування пошкоджень, набуває вигляду:

$$\psi(\bar{t}) = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot b \cdot \begin{cases} z_1(\bar{t}), & 0 \leq \bar{t} \leq \eta_1 \cap \bar{t} \leq t_* \\ z_1(\eta_1) + z_2(\bar{t}), & \bar{t} > \eta_1 \cap \bar{t} \leq t_* \end{cases} \quad (3.74)$$

де

$$z_1(\bar{t}) = \int_0^{\bar{t}} \frac{(1 + \cos(t)) \cdot dt}{\varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{y_1(t)}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{y_1^2(t)}{2}}}, \quad (3.75)$$

$$z_2(\bar{t}) = \int_{\eta_1}^{\bar{t}} \frac{(1 + \sin(\eta_1) + \cos(\eta_1) \cdot (1 - \eta_1)) \cdot dt}{\varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{y_2(t)}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{y_2^2(t)}{2}}} \quad (3.76)$$

Результати розрахунків накопичення пошкоджень у матеріалі заготовки при ШО за побудованою моделлю наведено на рис. 3.31, 3.32 та у додатку В.

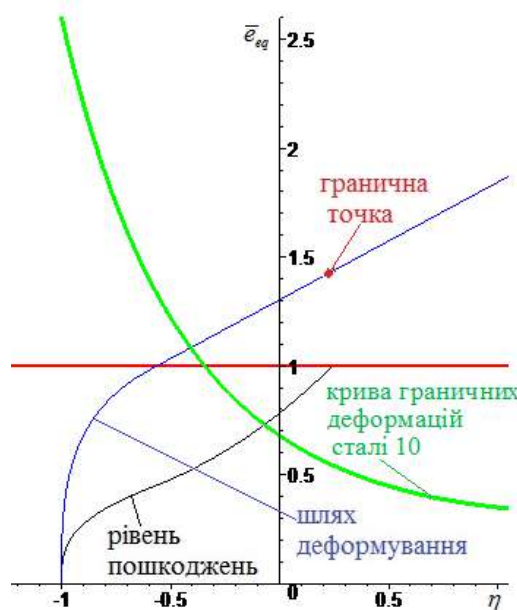


Рисунок 3.31 – Графічне представлення за побудованою моделлю накопичення пошкоджень у матеріалі небезпечної зони фланця при висаджуванні методом ШО заготовки із сталі 10

Джерело: [138]

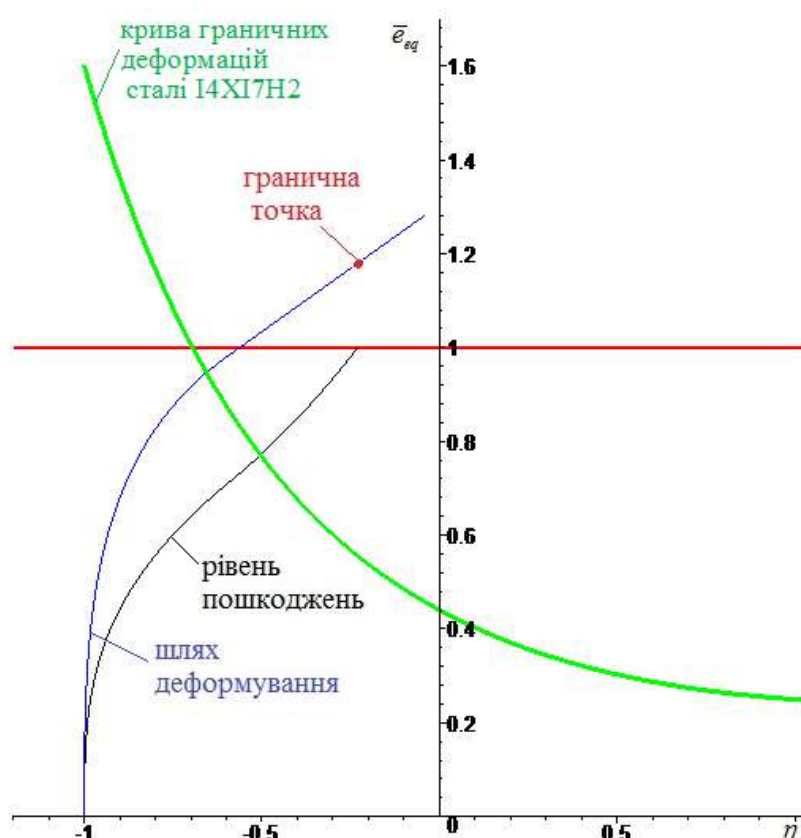


Рисунок 3.32 – Графічне представлення за побудованою моделлю накопичення пошкоджень в матеріалі небезпечної зони фланця при висаджуванні методом ШО заготовки із сталі 14X17H2

Джерело: [138]

3.7. Висновки до 3 розділу

Напружено-деформований стан матеріалу заготовок є важливою характеристикою, необхідною для оцінки деформованості й визначення силових параметрів.

Пряме витискування методом ШО розглянуто нами на прикладі формування торцевих зубців зубчатої муфти. Для підвищення точності визначення інтенсивності деформацій у поперечних перерізах заготовки в якості матеріалу для фізичного моделювання зазвичай обирають сильно зміцнювальний матеріал – мідь М06. У результаті теоретичного дослідження напружено-деформованого стану (НДС) у вершині зубця з використанням

теорії пластичного згину смуги було визначено характер розподілу показника напруженого стану в пластичній області. Найжорсткіший напружений стан спостерігається у вершині витискуваних зубців, проте, згідно з результатами візуального аналізу спотвореної ділильної сітки, нанесеної на поверхню заготовки, саме тут зафіксовано найменші деформації. Найбільші деформації утворюються в основі зубця, однак напружений стан у цій зоні наближається до всебічного стиску.

Отримані дані є основою для побудови траєкторії деформування часток металу в координатах показник напруженого стану - накопичена деформація, що необхідно для побудови моделі деформовності заготовки при ШО та подальшої оцінки придатності заготовок із різних матеріалів до операцій прямого та зворотнього витискування.

Побудовані дві моделі деформовності заготовок з метою описання накопичення пошкоджень матеріалу небезпечних ділянок заготовки під час процесів прямого та зворотнього витискування методом штампування обкочуванням. Кожна модель складається з трьох базисних елементів: аналітичного представлення траєкторії деформування в координатах «показник напруженого стану – накопичена пластична деформація»; апроксимації кривої граничних деформацій та моделі підсумовування пошкоджень.

В обох моделях використовується одне й те саме трипараметричне представлення кривої граничних деформацій при стаціонарному деформуванні. В якості моделей підсумовування обрано степеневу модель та її окремі варіанти: модель В. А. Огороднікова та модель, що базується на лінійному принципі накопичення пошкоджень. Траєкторії деформування подано окремими параметричними співвідношеннями, що побудовані за різними методиками. Кожна з моделей включає функціональну залежність рівня накопичених пошкоджень із змінною показника напруженого стану.

Моделі деформовності, що базуються на моделі лінійного принципу накопичення отримано як окремий варіант кожної з побудованих моделей.

Стосовно процесу прямого витискування сконструйовано параметричні рівняння траєкторії деформування. Функціональна залежність для показника напруженого стану від деякого параметра містить три сталих. Функціональна залежність для накопиченої деформації подана неелементарною функцією з одною сталою. Конкретні значення вказаних сталих або діапазон їх можливих значень визначали на основі граничних умов із використанням елементів теорії границь функцій. Оскільки модель деформовності, що базується на моделі підсумовування В. А. Огороднікова набуває вельми громізкого виду, доволі складного для проведення обчислювальних експериментів, з урахуванням особливостей цих траєкторій обґрунтовано можливість використання степеневі моделі підсумовування із сталим значенням показника нелінійності накопичення пошкоджень. Запропонована методика обчислення значення цього показника для конкретної траєкторії деформування та з'ясовано, що для досліджуваних траєкторій показник нелінійності накопичення пошкоджень набуває додатних значень, менших одиниці. Числові експерименти із значеннями цього показника, рівними та більше одиниці, показали значну монотонно зростаючу залежність розрахункової величини граничної деформації.

Для побудови траєкторій деформування небезпечних ділянок матеріалу заготовок під час зворотнього витискування зовнішніх фланців методом ШО запропоновано оригінальну методику. Сутність методики полягає у конструюванні базисної сплайн-подібної функції, склеєної з елементарної функції синус та дотичної до неї в деякій точці. Шляхом повороту базисної функції на деякий кут навколо початку координат та зсуву вздовж однієї з осей координат отримано параметричну модель траєкторій деформування, що містить три сталі. Числове дослідження з наочним виведенням результатів у

вигляді графіків показало, що запропонована модель траєкторії деформування здатна описати широкий спектр особливостей перебігу зміни напружено-деформованого стану матеріалу заготовки під час технологічних операцій витискування методом ШО. В результаті дослідження деформовності заготовок отримано графічні представлення особливостей перебігу накопичення пошкоджень аж до досягнення граничного стану для заготовок із сталі 10 та сталі І4ХІ7Н2.

Використовуючи розроблені моделі можна проводити моделювання деформовності шляхом зміни значень параметрів моделі, що відображать механічні властивості матеріалів та параметри технологічного процесу, визначаючи таким чином величину використаного ресурсу пластичності або граничні до руйнування деформації.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ТА ФІЗИЧНЕ І 3D МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕТОДОМ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

4.1. Комп'ютерне моделювання процесу формоутворення складно профільної деталі та напружено-деформованого стану матеріалу заготовок при торцевому штампуванні обкочуванням

Комп'ютерне моделювання здійснювали в середовищі програмного комплексу DEFORM-3D [82]. Цей комплекс за допомогою числового моделювання методом скінченних елементів дозволяє виконувати аналіз напружено-деформованого стану матеріалу заготовки, її формозмінення, термічних і механічних параметрів.

На рис. 4.1. показано стадії формозміни трубчастої заготовки під час формування внутрішнього бурта деталі типу «стакан» методом штампування торцевим обкочуванням трубчастої заготовки.

Для здійснення моделювання було задано такі параметри.

Геометрія та розміри заготовки:

Тип заготовки: циліндрична.

Розміри: діаметр 25 мм; висота 50 мм; товщина стінки 5 мм.

Тип матеріалу: АМг3

Механічні властивості:

Межа текучості ($\sigma_{0,2}$): 215 МПа.

Модуль пружності: $7,0 \times 10^4$ МПа.

Відносне подовження (δ): 20-25%.

Коефіцієнт тертя: 0,5

Криві деформаційного зміцнення, отримані експериментально.

Температура: кімнатна.

Модель сітки (FEM):

Тип елементів: тетраедричні.

Кількість елементів: 11705.

Адаптивне уточнення сітки: активовано для областей із високими градієнтами напружень.

Інструмент та його параметри:

Тип інструмента: штампувальний конічний ролик.

Матеріал: тверда інструментальна сталь.

Швидкість обертання: $9,15 \text{ рад/с}$ або $9,15 \cdot \frac{60}{2\pi} \approx 87,37 \text{ об/хв.}$

Траєкторія руху: обертальний рух

Граничні умови процесу

Температура: кімнатна.

Контактні умови:

Тип контакту: вузловий контакт із тертям.

Модель тертя: кулонівська.

Час процесу: 25 сек.

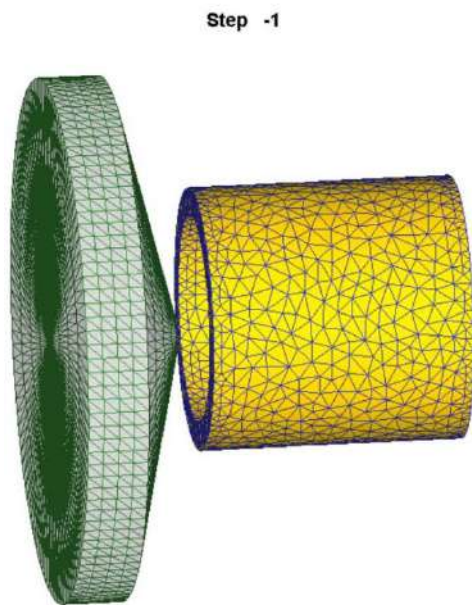
Візуалізація та аналіз результатів.

Графічне представлення зміни форми заготовки.

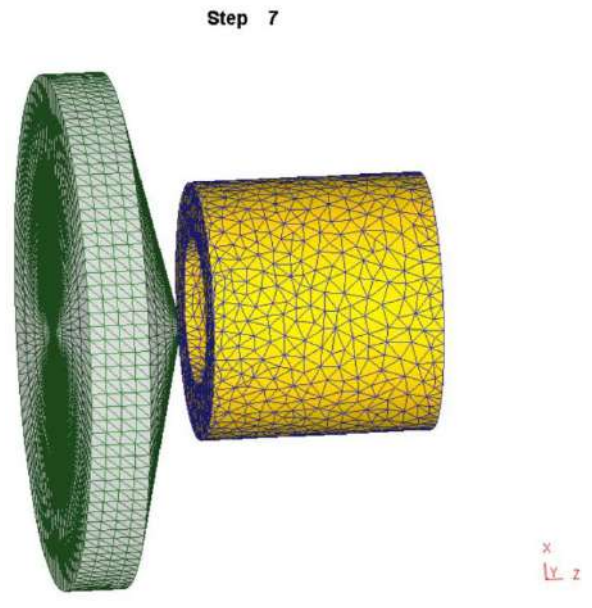
Результати розподілу НДС матеріалу заготовки.

На рис. 4.1, 4.2 показано стадії формозміни торцевого обкочування заготовки циліндричної форми. Вигляд заготовки на тих самих стадіях у перерізі показано на рис. 4.3. Варто звернути увагу, що візуально вигляд заготовки з середини під час процесу локального деформування: штампування торцевим обкочуванням нагадує процес об'ємного формозміннення шляхом видавлювання заготовки в оправці за допомогою пуансона сфероподібної форми.

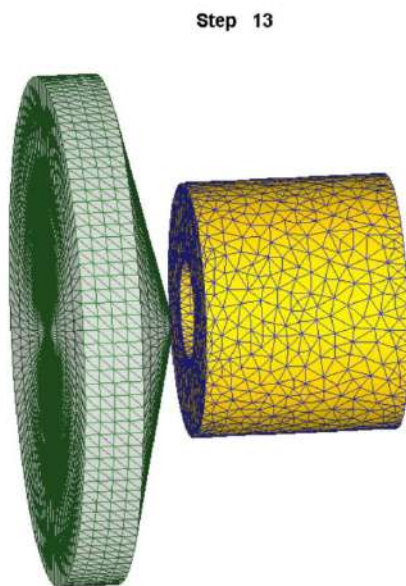
Важливо, що обраний кут нахилу обкочувального інструменту та величина радіального зміщення осі валка відносно осі заготовки забезпечує утворення внутрішнього бурта заготовки за умов незмінності її зовнішнього діаметра.



а) Початок процесу штампування – крок 1.



б) Етап з яскраво вираженим зменшенням внутрішнього діаметру заготовки – крок 7.



в) Етап формування внутрішнього бурта заготовки – крок 13.

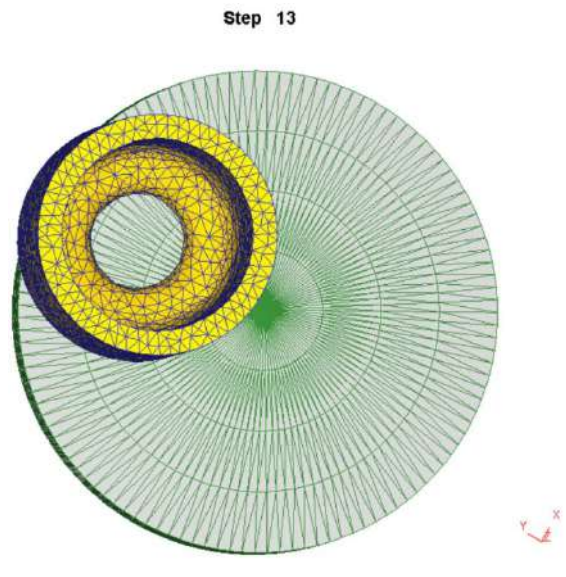
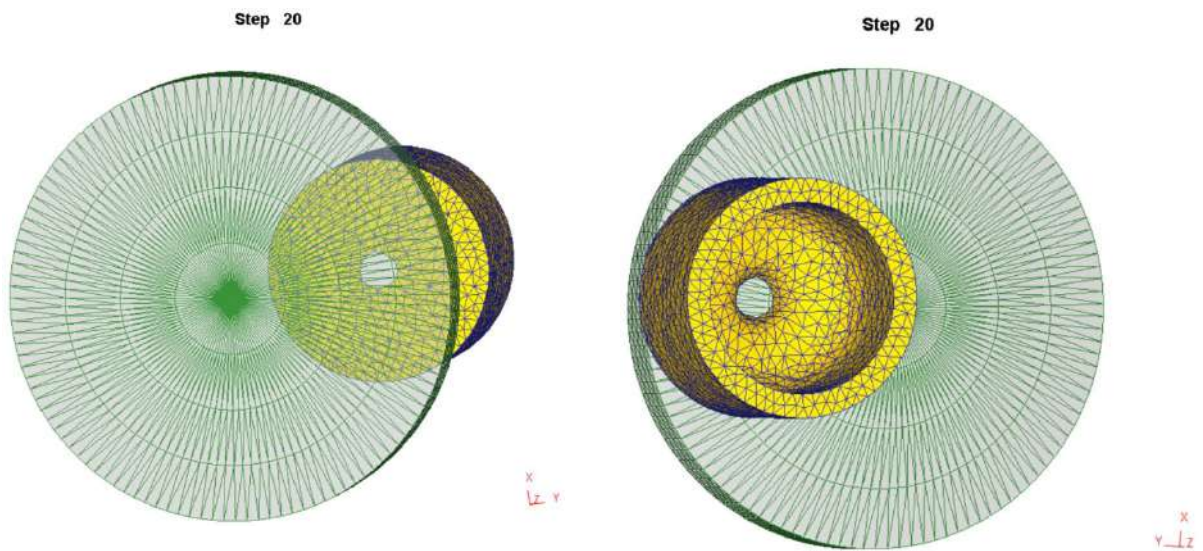
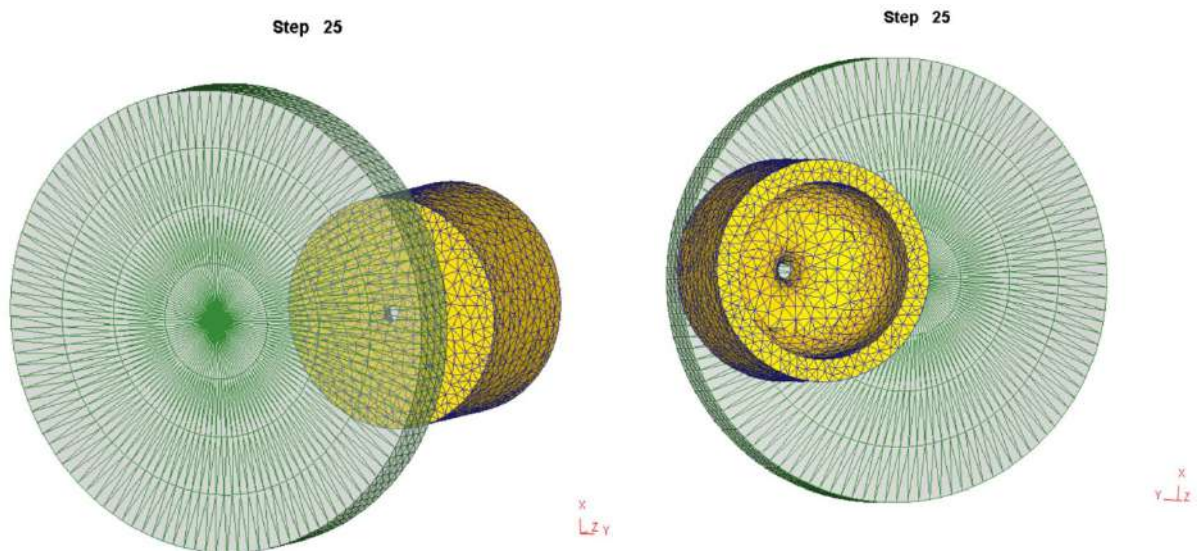


Рисунок 4.1 – Початкові етапи формування внутрішнього бурта заготовки зі сторони контакту з валком

Джерело: сформовано автором



а) Етап формування внутрішнього бурта заготовки на завершальній стадії –
 крок 20.



б) Фінальний етап формування внутрішнього бурта заготовки – крок 25.

**Рисунок 4.2 – Звершальні етапи формування внутрішнього бурта
 заготовки зі сторони контакту з валком**

Джерело: сформовано автором

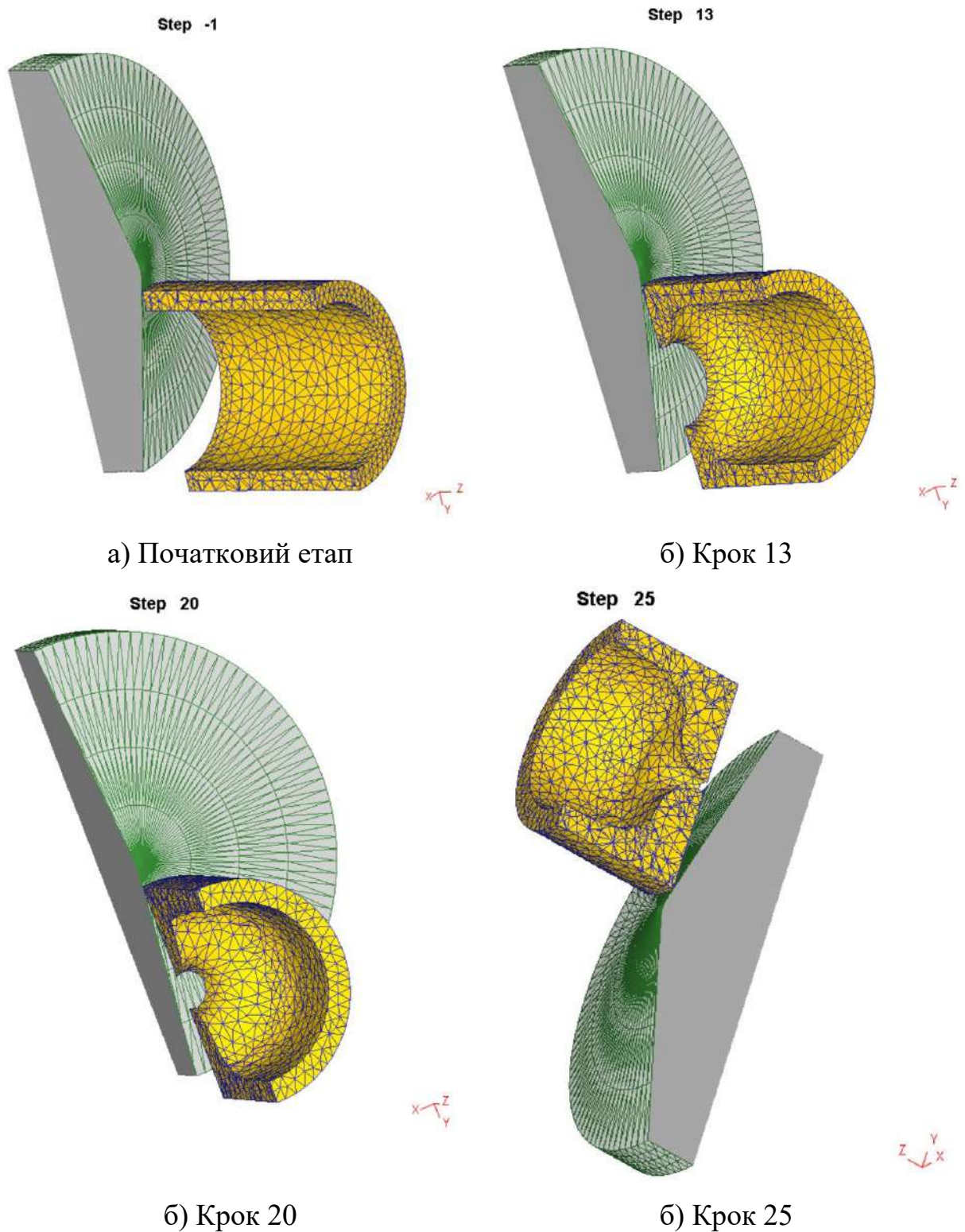
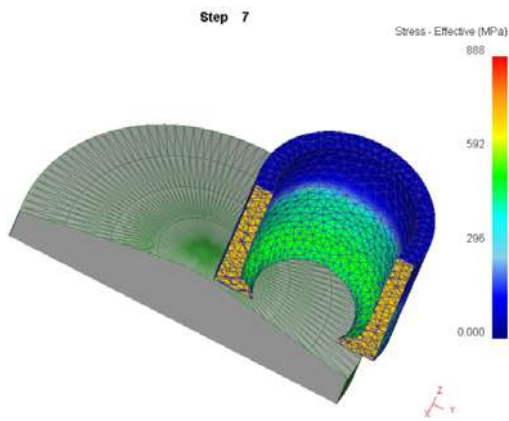


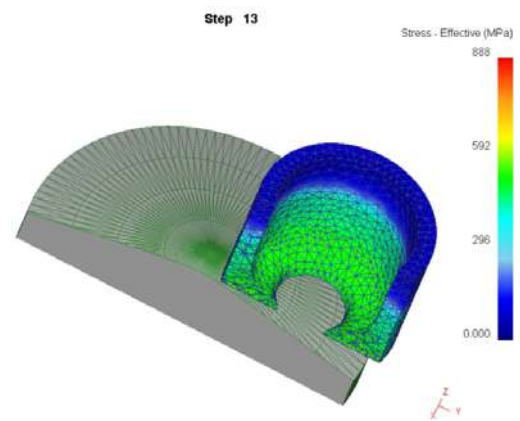
Рисунок 4.3 – Процес формування внутрішнього бурта заготовки в зоні контакту з валком: вигляд у перерізі

Джерело: сформовано автором

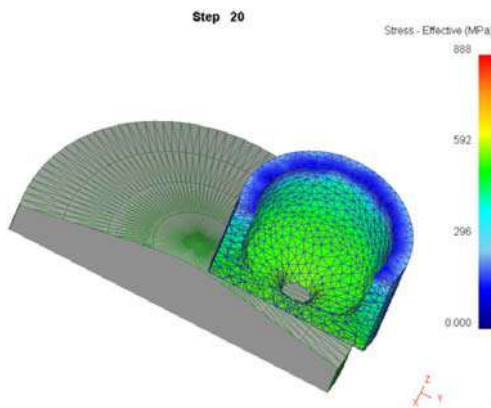
На рис. 4.4, 4.5 показано розподіл інтенсивності напружень та середнього напруження.



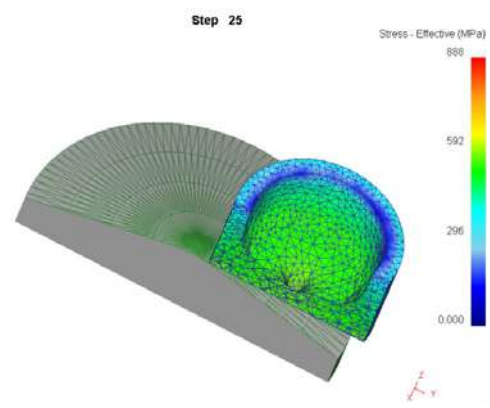
а) Крок 7



б) Крок 13

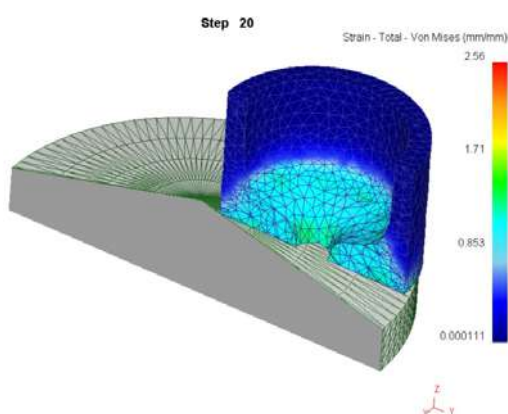


б) Крок 20

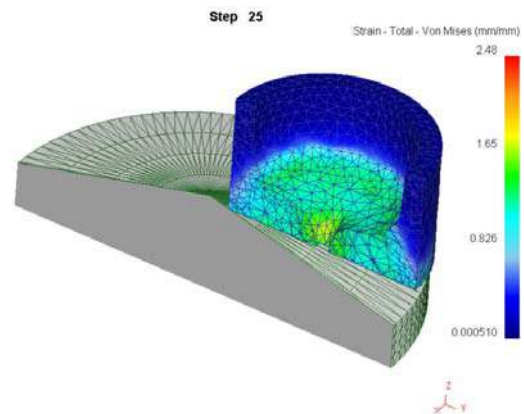


б) Крок 25

Рисунок 4.4 – Розподіл інтенсивності напружень в матеріалі заготовки на різних стадіях процесу формування її внутрішнього бурта
Джерело: сформовано автором

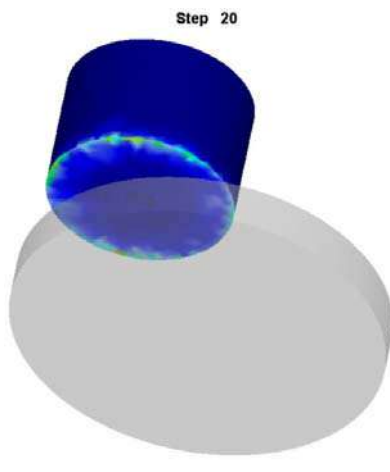


б) Крок 20

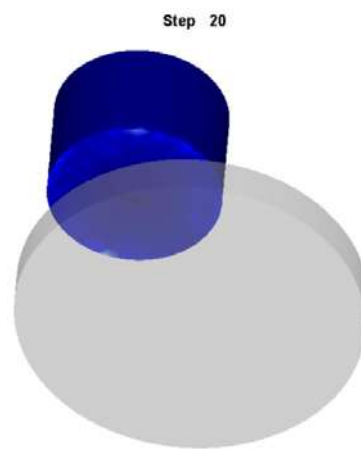


б) Крок 25

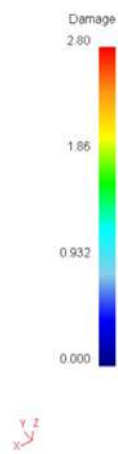
Рисунок 4.5 – Розподіл інтенсивності деформацій в матеріалі заготовки на різних стадіях процесу формування її внутрішнього бурта
Джерело: сформовано автором



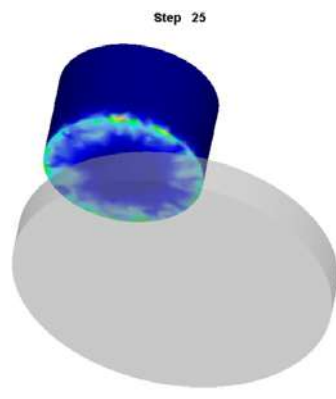
а) Модель Кокрофта-Латама



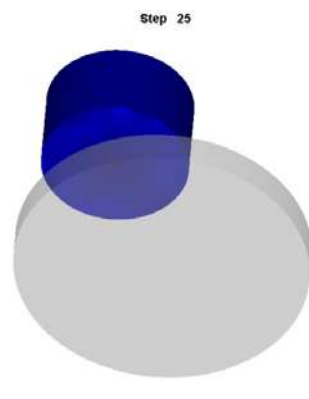
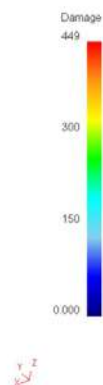
б) Модель Райса-Трейсі



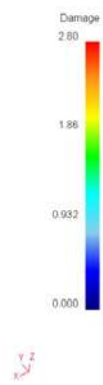
Крок 20



в) Модель Кокрофта-Латама



г) Модель Райса-Трейсі



Крок 25

Рисунок 4.6 – Розподіл пошкоджень в матеріалі заготовки на різних стадях процесу формування її внутрішнього бурта

Джерело: сформовано автором

Аналіз результатів розподілу інтенсивності напружень та інтенсивності деформацій в матеріалі заготовки на різних стадях процесу формування її внутрішнього бурта, що представлені на рис. 4.4 - 4.5., показав збільшення пластичної деформації до $0,7 \div 1,5$ на фоні практично незмінної величини інтенсивності напружень впродовж останніх етапів формозміння.

Що ж стосується результатів розподілу пошкоджень у матеріалі заготовки, представлених на рис. 4.6, то їх аналіз показав, що використання моделей, доступних в програмному комплексі Deform 3D, не забезпечують

адекватного відображення якісної картини процесу накопичення пошкоджень за досліджених умов формування. Подібні висновки були зроблені й іншими дослідниками [136].

4.2. Вибір базового верстата та розробка додаткового устаткування для штампування обкочуванням

Для здійснення фізичного моделювання механіки формоутворення заготовок із складним профілем під час ШО була розроблена конструкція обкочувального інструментального блоку, зображеного на рис. 4.7 [54, 102, 144]. Блок складається з таких основних елементів: 1 - шток силового навантаження поздовжньої подачі заготовки; 2 - гідроциліндр; 3 - оправка обертального приводу матричного блоку; 4 - матриця; 5 - заготовка; 6 - блок валковий; 7 - валок конічний; 8, 10 - блок циліндричного валка радіального підпору матриці (заготовки); 9, 11 - блок циліндричного валка радіального підпору конічного валка, 12 – штовхач/

В працях А. Штуця [34, 55, 158] на основі спрощення цього блоку були розроблені дві приставки під універсальний вертикально-свердлильний верстат 2А-135 з механічною системою керування електромеханічного привода.

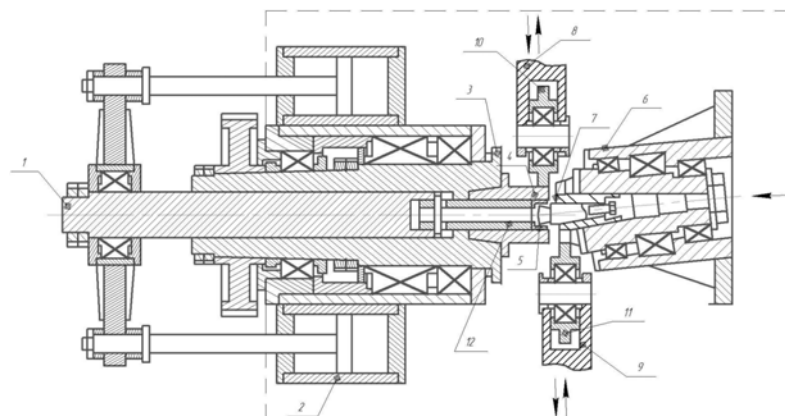


Рисунок 4.7 – Обкочувальний інструментальний блок для виготовлення складно профільних заготовок з використанням конічного валка

Джерело: [144]

Слід відзначити, що токарно-гвинторізні верстати є не менш поширеними в ремонтному та дрібносерійному виробництві, ніж вертикально-свердлильні верстати, і водночас вони краще адаптовані для реалізації операцій ШО.

Для здійснення фізичного моделювання процесу торцевого обкочування циліндричної деталі нами було обрано токарно-гвинторізний верстат моделі 1К62.

На рисунку 4.8 показано основні частини токарно-гвинторізного верстата моделі 1К62.

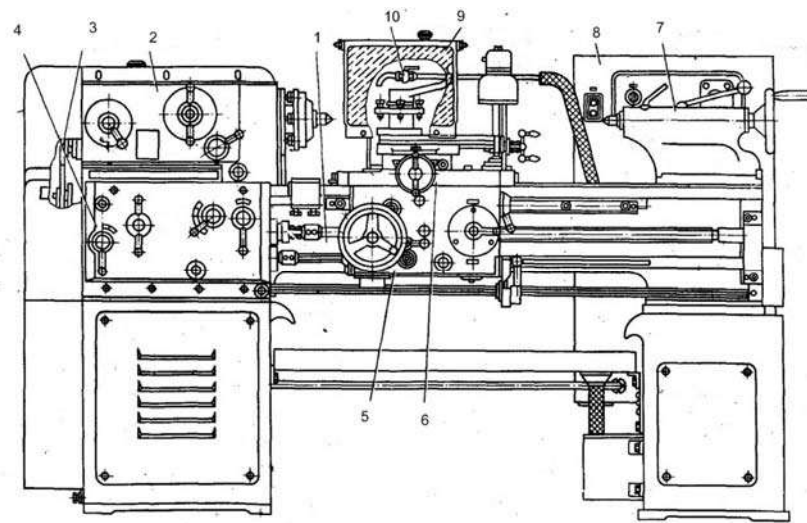


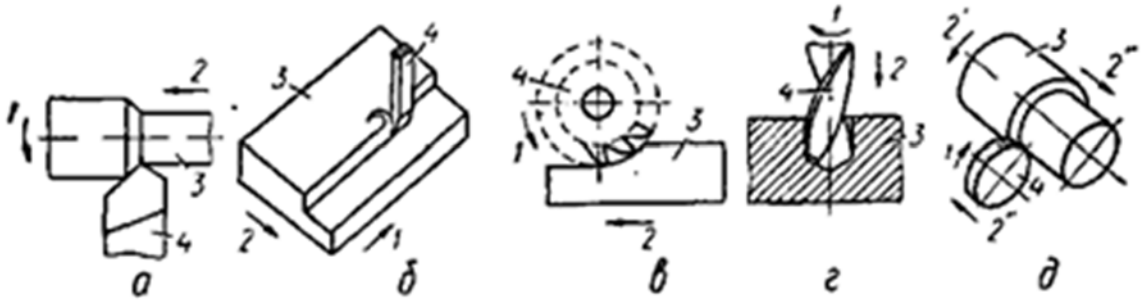
Рисунок 4.8 – Основні частини токарно-гвинторізного верстата моделі 1К62: 1 - станина; 2 – коробка швидкостей; 3 – коробка передач; 4 – коробка подач; 5 - фартух; 6 - супорт; 7 – задня бабка; 8 – електрообладнання; 9 – захисний екран; 10 – система охолодження.

Джерело: [55]

Для обробки виробів на металорізальних верстатах необхідно забезпечити пересування ріжучого інструменту відносно заготовки. У верстатах розрізняють головний рух – це рух, при якому відбувається різання металу інструментом, і рух подачі, що забезпечує переміщення інструменту вздовж заготовки, або заготовки для зрізання шару металу. Це так звані основні, або робочі рухи. Окрім них, у верстатах повинні бути забезпечені допоміжні рухи і передбачені пристрої, необхідні для установки, затиску і

переміщення інструменту, контролю операцій при обробці, закріплення і зняття заготовки, налагоджувальних операцій, охолодження, мастила, тощо.

На рисунку 4.9 показані різні способи обробки металів на металорізальних верстатах. При токарній обробці (рисунк 4.10, а) головний рух 1 здійснюється обертанням заготовки 3, а рух подачі 2 - поступальним переміщенням інструменту (різця) 4. При поздовжньому струганні (рисунк 5.4, б) головний рух 1 здійснюється заготовка 3, а рух подачі 2—різець 4.



Рисунк 4.9 – Типові способи обробки металів на металорізальних верстатах

Джерело: [55]

Усі повністю технічні характеристики розміщуються у паспорті, що йде в комплекті з виробом. Для загального ознайомлення з основними можливостями нашого зразка представляємо короткий огляд параметрів.



Рисунк 4.10 – Токарно-гвинторізний верстат моделі 1К62, оснащений оригінальною обкочувальною приставкою

Джерело: сформовано автором

- Найбільший діаметр заготовки: 400 мм над станиною, 220 мм над супортом.
- Гранична вага оброблюваних заготовок: найбільша вага деталі, що встановлюється в патроні, - 300 кг, на центрах - 1,3 тонни.
- Верстат випускався у трьох габаритних модифікаціях : між центрові відстані 710, 1000 та 1400 мм. Відповідно, максимальна відстань поздовжнього руху супорта (означає, і довжина оброблюваної деталі) – 640, 930 і 1330 мм.
- Найбільший діаметр заготовки, що рекомендується, проходить через внутрішньо шпиндельний отвір – 45 мм (сам отвір 47 мм).
- Розмір посадкового конуса в шпинделі – Морзе №6, а в пінолізадньої бабки – Морзе №5.
- Максимальна відстань, на яку можна висунути пінолізадньої бабки – 200 мм.
- Висота державки різців, що встановлюються в різцетримачі – 25 мм.
- Габаритні розміри верстата з міжцентровою відстанню 1000 мм: по довжині – 2812 мм, по ширині – 1166 мм та у висоту – 1324 мм.
- Вага верстата 1К62 з тією самою відстанню між центрами – 2140 кг.
- Нарізання метричних різьблень з кроком у межах від 1 до 192 мм.
- Нарізання дюймових різьблень з кроком різьблення від 2 до 24 ниток на 1 дюйм.
- Виконує модульні різьблення з кроком в межах від 0,5 до 40 модулів.
- Межі числа оборотів шпинделя – від 12,5 до 2000 об/хв.
- Межі поздовжніх подач супорта – від 0,07 до 4,16 мм/об., поперечних – від 0,035 до 2,08 мм/об.

1К62 за паспортом та технічними характеристиками оснащений чотирма електродвигунами:

- двигуном головного приводу потужністю 10 кВт;
- двигуном швидких переміщень потужністю 0,8 кВт;
- двигуном гідростанції з потужністю 1,1 кВт;
- двигуном насоса охолодження з 0,125 кВт потужності.

Деякі моделі обладнання для металообробки сконструйовані з

живленням силового ланцюга від 220 В. Але це не правило, а виняток щодо невеликих «домашніх» зразків. Розглядається нами агрегат і в базовій комплектації, і в модифікаціях потребує живлення 380 В.

На основі спрощення обкочувального інструментального блоку, що зображений на 4.7, нами була спроектована й виготовлена приставка з обкочувальним конічним валком (рис. 4.11), що є додатковим обладнанням до токарного верстата, необхідного для реалізації операції ШО.



Рисунок 4.11 – Обкочувальна приставка до токарно-гвинторізного верстата: 1- валок, 2 – фланець, 3 – підшипниковий вузол, 4 – тримач
Джерело: сформовано автором

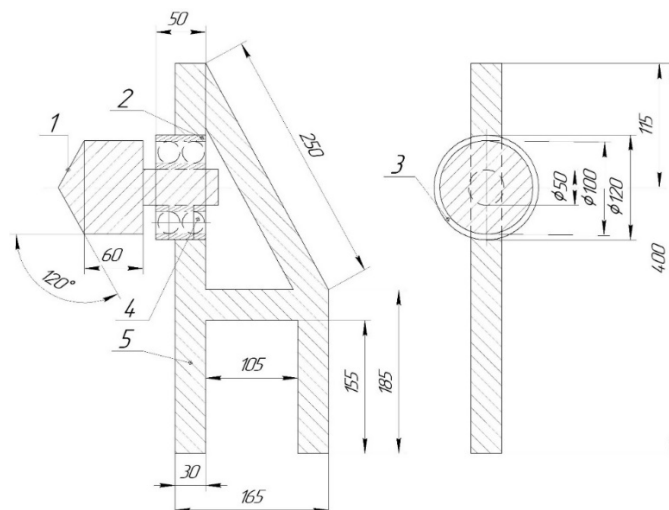


Рисунок 4.12 – Технічне креслення обкочувальної приставки до токарно-гвинторізного верстата: 1- валок, 2 – фланець, 3 – підшипниковий вузол, 4 – кідшипник кочення, 5 – тримач
Джерело: сформовано авторомна основі [144]

Вигляд обкочувальної приставки, встановленої разом із заготовкою на токарно-гвинторізний верстат, показано на рис. 4.10 та 4.13.



Рисунок 4.13 – Вигляд робочої зони під час ШО трубної заготовки на токарно-гвинторізному верстаті, оснащеному обкочувальною приставкою

Джерело: сформовано автором

Для обґрунтування проектування приставки з обкочувальним конічним валком були враховані такі міркування.

При штампуванні обкочуванням основним деформуючим інструментом є валки циліндричної або конічної форми. Циліндричний валок забезпечує формування внутрішніх і профільних зовнішніх буртів за схемою висадки. Його діаметр не залежить від розмірів деталі, а визначається конструктивними особливостями обладнання.

Конічні валки значно розширюють технологічні можливості, оскільки з'являється можливість вибору кута між віссю валка та віссю обертання заготовки. Вони дозволяють виконувати формування за схемами висадки, прямого та зворотного видавлювання, роздачі, осаджування, чеканки тощо. Використання конічного валка часто дає змогу відмовитися від оправки, що спрощує конструкцію оснастки. Однак його недоліками є складна геометрія та обмежена гнучкість у виборі розмірів щодо параметрів заготовки.

4.3. Технологічні можливості та технічні вимоги до процесу формування нижньої частини деталі типу «стакан» штампуванням обкочуванням

4.3.1. Вибір деталі для проведення фізичного моделювання

Для здійснення фізичного моделювання прототипом деталі, що має бути виготовленою, було обрано доїльний стакан (рис. 4.14, рис. 4.15).



Рисунок 4.14 – Зовнішній вигляд доїльного стакану

Джерело: сформовано автором

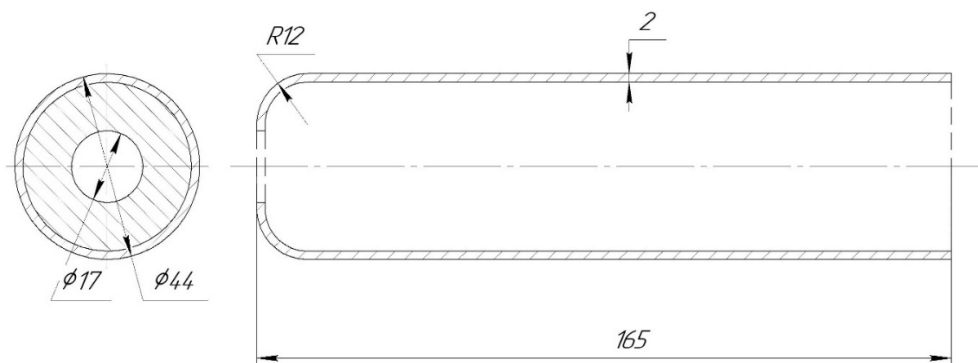


Рисунок 4.15 – Технічне креслення доїльного стакану

Джерело: сформовано автором

Доїльний стакан може бути віднесений до складнопрофільних деталей через технологічну складність виготовлення його нижньої частини, що має сфероподібну форму та може потребувати точного контролю за радіусами та

кривизною. Водночас область застосування деталей типу «стакан» значно ширша.

Деталі типу «стакан» (циліндричні порожнисті деталі з дном або без нього) широко застосовуються в різних галузях машинобудування, авіації, автомобілебудуванні, гідравлічних та пневматичних системах. Вони виконують роль корпусних, направляючих, з'єднувальних і захисних елементів у вузлах і механізмах.

У машинобудуванні та верстатобудуванні використовуються як корпуси підшипників, втулки, редуктори, елементи гідравлічних і пневматичних циліндрів. Служать для захисту рухомих частин механізмів від пилу, вологи та механічних пошкоджень.

У автомобільній та авіаційній промисловості використовуються у вузлах трансмісій, гальмівних системах, амортизаторах, можуть бути частинами паливних та гідравлічних систем.

У енергетичній галузі застосовуються в теплообмінниках, турбінах, насосах як елементи трубопроводів або корпусів.

Деталі типу «стакан» виготовляють різними методами: механічною обробкою, литтям, штампуванням, зварюванням або обкочуванням. Їхнє застосування обумовлене простотою конструкції, технологічністю виготовлення та здатністю витримувати значні статичні або динамічні навантаження.

Доїльні стакани – це основні елементи системи доїння, які безпосередньо контактують із вим'ям тварини. Вони забезпечують правильне створення вакууму, рівномірне стиснення сосків і безпечне видалення молока. Без цих деталей доїльний апарат не зможе виконувати свою основну функцію. Стаканоподібні елементи використовуються, також, в колекторах, пульсаторах і вакуумних системах, забезпечуючи стабільність процесу доїння, правильний розподіл тиску та молокопровідність. Доїльні стакани зазвичай виготовляють із нержавіючої сталі або алюмінію, щоб забезпечити гігієнічність, довговічність і стійкість до молочних кислот та миючих засобів.

4.3.2. Фізичне моделювання виготовлення ШО нижньої частини деталі типу «стакан»

На рис. 4.16 зображено трубні заготовки для фізичного моделювання, виготовлені з вуглецевої сталі, покритої нікелем, з зовнішнім діаметром 25 мм та товщиною стінки 0,7 мм, а також з нержавіючої сталі з зовнішнім діаметром 30 мм та товщиною стінки 2 мм. Для проведення пошукових експериментів були підготовлені по 5 заготовок кожного виду матеріалу довжиною 15 і 30 см.



Рисунок 4.16 – Трубні заготовки різної довжини для фізичного моделювання із тонкостінної вуглецевої сталі покритої нікелем та із нержавіючої сталі

Джерело: сформовано автором

Трубні заготовки з тонкостінної вуглецевої сталі з нікелевим покриттям виявилися непридатними для фізичного моделювання процесу ШО через недостатню жорсткість, зумовлену тонкими стінками та фізичними характеристиками матеріалу. Це спричиняло деформацію та втрату

циліндричної форми заготовки вже на етапі її закріплення в патроні токарно-гвинторізного верстата.

Отже, для подальшого фізичного моделювання процесу ШО використовували трубні заготовки з нержавіючої сталі.

На рис. 4.17 показані різні стадії процесу фізичного моделювання ШО під час формування нижньої частини деталі типу «стакан».



**Рисунок 4.17 – Початкова, проміжна та завершальні стадії
формування сфери стакан**

Джерело: сформовано автором

Одним із основних параметрів, за якими оцінюється придатність металів для обробки методом торцевого обкочування, є їх достатня пластичність.

Ключовими факторами, що обмежують технологічні можливості процесів холодного торцевого обкочування, є руйнування матеріалу, викривлення та утворення складок на заготовках.

Деформовність заготовок у реальному технологічному процесі залежить від схеми формозміни, пластичності матеріалу, параметрів процесу й заготовки.

Під час фізичного моделювання досліджувалися такі технологічні параметри процесу ШО:

1. Кут між віссю валка та віссю обертання заготовки.
2. Величини радіального зміщення вершини валка відносно осі симетрії трубної заготовки.
3. Швидкість обертання патрона з заготовкою та відповідна величина подачі супорта токарного верстата з обкочувальним валком, закріпленим на ньому.

У процесі пошуку оптимальних значень вказаних параметрів були отримані такі рекомендації.

Кут між віссю валка та віссю обертання заготовки повинен дорівнювати 0 градусів. Відхилення від цього значення може призвести до виникнення поперечних сил, що викликають згинання трубної заготовки. Приклад подібної ситуації зображено на рис. 4.18.



**Рисунок 4.18 – Приклад заготовки з дефектами, що виникли
внаслідок відхилення від параметрів процесу ШО**

Джерело: сформовано автором

За умов колінеарності осей заготовки і конічного валка, якщо радіус заготовки менший за радіус конічного валка, величина радіального зміщення вершини валка відносно осі симетрії трубної заготовки повинна бути більшою за зовнішній радіус заготовки, але меншою за радіус валка. В іншому випадку процес формозміни стає технологічно неможливим. Якщо ж радіус заготовки більший за радіус конічного валка, то процес ШО також можливий, але для забезпечення технологічної ефективності наведені рекомендації потребують уточнення.

При швидкості обертання шпінделя в межах $400 \div 800$ об/хв. процес формування сферо подібної поверхні стакана відбувається, в більшості випадків, за $430 \div 550$ обертів або протягом $20 \div 40$ сек.

4.4. Висновки до 4 розділу

1. Комп'ютерне моделювання процесу формоутворення складнопрофільної деталі та напружено-деформованого стану матеріалу заготовок при торцевому штампуванні обкочуванням показало, що програмні комплекси, засновані на скінчено-елементному моделюванні, здатні адекватно відтворювати процес формозмінення заготовки та зміни у розподілі накопичених пластичних деформацій. Водночас закладені в програмному комплексі моделі не забезпечують достатньої точності у відтворенні напруженого стану та накопичення пошкоджень у матеріалі заготовки.

2. Розроблено конструкцію обкочувального інструментального блоку, на основі спрощення якої створено та виготовлено додаткове оснащення – оригінальну обкочувальну приставку з конічним обкочувальним валком для вибраного токарно-гвинторізного верстата, що забезпечує можливість фізичного моделювання процесу штампування обкочуванням.

3. Обґрунтовано вибір деталі типу «Доїльний стакан» для проведення фізичного моделювання. Здійснення фізичного моделювання виготовлення нижньої частини деталі типу «стакан» торцевим обкочуванням конічним валком трубної заготовки надало можливість отримати технологічні рекомендації стосовно вибору кута між віссю валка та віссю обертання заготовки, величини радіального зміщення вершини валка відносно осі симетрії трубної заготовки та швидкості обертання шпінделя.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел показав, що у науковій літературі накопичено значний обсяг експериментальних даних щодо граничних деформацій матеріалів за умов стаціонарного пластичного деформування. Однак менше уваги приділено моделям підсумування пошкоджень та траєкторії деформування мікрочастинок матеріалу в небезпечних зонах заготовок. Показано, що більшість відомих моделей руйнування, представлених в літературі, є варіантами залежностей граничних деформацій від напружено-деформованого стану при стаціонарному деформуванні, що інтегровані в модель на основі лінійного принципу накопичення пошкоджень. Це зумовлює низку важливих наслідків, зокрема, висновок про великий клас загальних для всіх зазначених моделей закономірностей руйнування при нестаціонарному деформуванні.

Виявлено зв'язок між емпіричним критерієм руйнування бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні та теорією підсумовування пошкоджень. Показано, що гранична деформація при рівномірному стисненні суттєво впливає на форму граничної лінії у координатах «осьова – колова логарифмічні деформації», яка наближається до прямої з ростом граничної деформації.

Результати представлених досліджень базуються на аналізі наукових праць із високими наукометричними показниками, що підтверджує їхню наукову цінність. Значна кількість посилань на оригінальні роботи підкреслює їхній вплив на наукову спільноту і підтверджує відповідність нашого дослідження рівню поточного стану науки, досягнутого міжнародною науковою спільнотою.

Отже, обґрунтованість вибору теорії підсумовування пошкоджень як підходу до оцінки граничного стану матеріалу зумовлена її здатністю відображати реальні процеси деформування та накопичення пошкоджень у матеріалі заготовок під час штампування обкочуванням. Це робить її

ефективним інструментом для прогнозування граничних станів матеріалів і оптимізації технологічних процесів.

2. Напружено-деформований стан матеріалу заготовок є важливою характеристикою для оцінки деформованості й визначення силових параметрів. Пряме витискування методом штампування обкочуванням розглянуто на прикладі формування торцевих зубців зубчатої муфти. Визначено, що найжорсткіший напружений стан спостерігається у вершині витискуваних зубців, однак деформації в цій зоні є мінімальними. Найбільші деформації утворюються в основі зубця, де напружений стан наближається до всебічного стиску. Отримані результати стали основою для побудови траєкторії деформування часток металу в координатах «показник напруженого стану – накопичена деформація». Стосовно процесу прямого витискування розроблено параметричні рівняння траєкторії деформування з функціональними залежностями для показника напруженого стану та накопиченої деформації. Для зворотного витискування запропоновано оригінальну методику побудови траєкторій, що включає конструювання базисної сплайн-подібної функції, склеєної з елементарної функції синус та дотичної до неї в деякій точці з подальшим її поворотом на деякий кут навколо початку координат та зсувом вздовж однієї з осей координат. Числове дослідження підтвердило ефективність цієї методики для опису зміни напружено-деформованого стану матеріалу під час технологічних операцій прямого та зворотного витискування методом штампування обкочуванням.

3. Побудовані дві моделі деформованості заготовок з метою описання накопичення пошкоджень матеріалу небезпечних ділянок заготовки під час процесів прямого та зворотного витискування методом штампування обкочуванням. Кожна модель складається з трьох базисних елементів: аналітичного представлення траєкторії деформування в координатах «показник напруженого стану – накопичена пластична деформація»; апроксимації кривої граничних деформацій та моделі підсумовування пошкоджень.

В обох моделях використовуються відомі аналітичні представлення кривої граничних деформацій при стаціонарному деформуванні та степенева модель підсумовування пошкоджень разом з її окремими варіантами. Їх оригінальність полягає у спеціально розроблених у цій роботі аналітичних представленнях траєкторій деформування, що відображають специфіку вказаних технологій штампування обкочуванням.

З огляду на складність моделі підсумовування В. А. Огороднікова обґрунтовано доцільність застосування степеневої моделі підсумовування із фіксованим значенням показника нелінійності накопичення пошкоджень та проведено аналіз його можливих значень.

В результаті дослідження деформовності заготовок під час зворотнього витискування зовнішніх фланців методом штампування обкочуванням отримано графічні представлення особливостей перебігу накопичення пошкоджень аж до досягнення граничного стану для заготовок із сталі 10 та сталі І4ХІ7Н2.

Завдяки розробленим моделям можна аналізувати деформовність шляхом коригування параметрів, що відображають механічні характеристики матеріалів та умови технологічного процесу, що дає змогу оцінювати ресурс пластичності або граничні деформації до руйнування.

4. Комп'ютерне моделювання на основі методу скінченних елементів (МСЕ) процесу формоутворення складнопрофільної деталі типу «стакан» та напружено-деформованого стану матеріалу заготовок при торцевому штампуванні обкочуванням показало, що програмні комплекси, засновані на скінчено-елементному аналізі, здатні адекватно відтворювати процес формозмінення заготовки та розподіл накопичених пластичних деформацій. Водночас закладені в програмному комплексі моделі не забезпечують достатньої точності у відтворенні напруженого стану та накопичення пошкоджень у матеріалі заготовки.

5. Розроблено конструкцію обкочувального інструментального блоку, на основі якої створено та виготовлено обкочувальну приставку з конічним

валком для токарно-гвинторізних верстатів. Обґрунтовано вибір деталі типу «Доїльний стакан» для фізичного моделювання. Проведене моделювання виготовлення нижньої частини деталі методом торцевого обкочування конічним валком трубної заготовки дозволило отримати технологічні рекомендації щодо оптимальних параметрів процесу, зокрема кута між віссю валка та віссю обертання заготовки, величини радіального зміщення вершини валка відносно осі симетрії трубної заготовки та швидкості обертання шпинделя.

При швидкості обертання шпинделя в межах $400 \div 800$ об/хв. процес формування сферо подібної поверхні стакана відбувається, в більшості випадків, за $430 \div 550$ обертів або протягом $20 \div 40$ сек.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Andrii V. Titov, Volodymyr M. Mykhalevych, Peter Popiel, Kanat Mussabekov, “Statement and solution of new problems of deformability theory”, *Proc. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2018. 108085E (1 October 2018).
2. Bai Y., Wierzbicki T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. *International Journal of Plasticity*. № 24. 2007. P. 1071–1096.
3. Bao Y., Wierzbicki T. A comparative study on various ductile crack formation criteria. *J Eng Mater Technol*. 126. 2004. 314–324.
4. Bao Y., Wierzbicki T. On the cut-off value of negative triaxiality for fracture. *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 72. 2005. P. 1049–1069.
5. Bao Y., Wierzbicki T.: A comparative study on various ductile crack formation criteria. *J Eng Mater Technol*. 126. 2004. P. 314–324.
6. Bao Y., Wierzbicki T.: On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International Journal of Mechanical Sciences*. №1 (46). 2004. P. 81–98.
7. Cheremnykh S. Theoretical and experimental modeling of deformation of a cylindrical shell made of 45 steel under complex loading. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022. Vol. 18. p. 150. DOI: <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-2-150-160>
8. Ganser H.P., Atkins A.G., Kolednik O., Fischer F.D., Richard O. Upsetting of cylinders: A comparison of two different damage indicators. *J Eng Mater Technol*. Vol. 9(123). 2001. P. 4-9.
9. Gribkov E., Dobronosov Yu., Kukhar V., Malii K., Hrudkina N. Finite element simulation of pipe straightening in a 3-pair cross roll machine with symmetrical and asymmetrical profiling of the outer rolls. *Academic journal of manufacturing engineering*. Vol. 22. 2024. P. 50-58.
10. Grushko A.V., Kukhar V.V., Slobodyanyuk Yu.O., Phenomenological

Model of Low-Carbon Steels Hardening during Multistage Drawing. *Solid State Phenomena*. 265. 2017. P. 114-123.

11. Grushko O. V. Development of Usage of Brinell Hardness Test Method for Flow Stress Definition during Cold Deformation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2013. Vol. 5, № 1. p. 11-16.

12. Hooputra H., Gese H., Dell H., Werner H. A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminum extrusions. *International Journal of Crashworthiness*. 2004. 9(5). P. 49–63.

13. Hrudkina N.S., Markov O.E., Shapoval A.A., Titov V.A., Aliiev I.S., Abhari P., Malii K.V. Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion. *FME Transactions*, 50 (1). 2022. P. 90-98.

14. Kachan O., Pavlenko D., Ulanov S. Relaxation of the Technological Residual Stresses During the Thermal Exposure in Titanium Samples. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2023. P. 247-255.

15. Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V., Shapoval A. A. Classification of steels according to their sensitivity to fracture using a synergetic model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 119, no. 7-8. 2022. P. 5277–5287.

16. Karnaukh S.G., Markov O.E., Kukhar V.V., Shapoval A.A. Research of the rolled stock separating into workpieces using breaking by bending with dynamic and static-dynamic force. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 120, 3-4. 2022. P. 2763-2776.

17. Karnaukh S.G., Markov O.E., Shapoval A.A., Hrudkina N.S. Selecting a cutting method for workpieces before stamping using synergetic fracture criteria and a deformability limit determination technique for separating processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129 (11-12). 2023. P. 5447-5455

18. Kraievskiy V. O., Mykhalevych V. M., Sawicki D., Ostapenko O. Modeling of the materials superplasticity based on damage summation theory. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy*

Physics Experiments, 2018.

19. Kuhn H.A., Dieter G.E. Workability in bulk forming processes. In: Fracture ICF4. Waterloo, Canada, 1977.

20. Kukhar V. V., Artiukh V., Serduik O., Balalayeva E.,. Form of Gradient Curve of Temperature Distribution of Lengthwise the Billet at Differentiated Heating before Profiling by Buckling. *Procedia Engineering*. Vol. 165. 2016. P. 1693-1704.

21. Kukhar V., Artiukh V., Butyrin A., Prysiashnyi A. 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. Springer*. 692. 2018. P. 201-211.

22. Kukhar V.V., Sahirov Y.G., Hornostai V.M., Markov O.E., Nahnibeda M.M. FEM analysis of stress-strain state and material consumption of RHS with longitudinal gap and weld during the tests. *Materials Science and Engineering*. Vol. 1037. 2021. P. 1-8.

23. Kukhar V.V., Sahirov Y.G., Hornostai V.M., Markov O.E., Nahnibeda M.M. Simulation of bending and torsion tests of non-welded and welded direct-formed rectangular hollow sections. *Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 1001. P. 1-8.

24. Kupchuk I. Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M. Development of the technological process of forming rings from sheet samples by stamping rollers and rotary hood. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences*. 2021. Vol. 14 (63), №2. P. 1-13.

25. Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M., Didyk A. Experimental evaluation stress-strain state for billets during rolling stamping by rollers. *Colloquium-journal*. 2021. № 16 (103). P. 40-48. <https://doi.org/10.24412/2520-6990-2021-16103-40-48>

26. Kurpe O. H., Kukhar V. V., Klimov E. S. Finite-Element Simulation of Steckel Mill Rolling. *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 887. P. 564–574. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.887.564>.

27. Lebedev A. A., Mikhalevich V. M. On the Choice of Stress Invariants in Solving Problems of Mechanics. *Strength of Materials, Plenum Publishing Corporation*. №35 (3). 2003. P. 217-224.
28. Lepov V., Grigoriev A., Bisong M., Lepova K. Brittle Fracture Modeling for Steel Structures operated in the Extreme. *Procedia Structural Integrity*. 2017 Vol. 5, p. 777-784.
29. Malinov L.S., Malysheva I.E., Klimov E.S., Kukhar V.V., Balalayeva E.Yu. Effect of particular combinations of quenching, tempering and carburization on abrasive wear of low-carbon manganese steels with metastable austenite. *Trans Tech Publications*. Vol. 945. 2019. P. 574-578.
30. Markov O., Kosilov M., Panov V., Kukhar V., Karnaukh S., Ragulina N., Bochanov P., Rizak P. Modeling and improvement of saddling a stepped hollow workpiece with a profiled tool. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6/1. № 102. 2019. P. 19-25.
31. Markov O., Kukhar V., Zlygoriev V., Shapoval A., Khvashchynskyi A., Zhytnikov R. Improvement of upsetting process of four-beam workpieces based on computerized and physical modeling. *FME Transactions*. Vol. 48. 2020. P. 946-953.
32. Markov O., Panov V., Karnaukh S., Khvashchynskyi A., Zhytnikov R., Kukhar V., Kosilov M., Rizak P. Determining the deformed state in the process of rolling conical shells with a flange. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 6/1 (108). 2020. P. 34-41.
33. Matviichuk V., Bubnovska I., Mykhalevych V., Kovalchuk M., Wójcik W., Tuleshov A., Imanbek, B. Tensor models of accumulation of damage in material billets during roll forging process in several stages. *«Mehatronics» Vol. II. London : Taylor Francis Group, CRC Press, Balkema book*. 2021. P. 111-120.
34. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. № 66(1). P. 51–58.

35. Matviychuk V. A., Aliyeva L. I. Development of technological process of flanges upsetting on tubular billets by face rolling. *Produkcja i Zarzadzanie w Hutnictwie. XIV Miedzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Politechnika Czestochowska. Szczyrk 28 June - 1 July 2006*. P. 132-136.

36. Matviychuk V., Kolisnyk M. Development of the combined technological process of blank stacks flanges formation by the method of stamping by rolling and rotary drawing. *Vibrations in engineering and technology*. 2021. № 1 (100). C. 111-121. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-11

37. McClintock F.A. A criterion of ductile fracture by the growth of holes. *Journal of Applied Mechanics*. Vol. 3(35). 1968. P. 63–71.

38. Mikhalevich V. M., Abramchuk I. V. Maximum Accumulated Strain for Linear Two-Link Triangle-Like Deformation Trajectories. *International Applied Mechanics*. 2021. №. 57(6). p. 720–736.

39. Mikhalevich V. M., Dobranuk Y. V., Kraevsky V. A, Mikhalevich O. V. Dependence of plastic ultimate strain from a friction at end faces at axisymmetric compression. *Bulet. Inst. Politehnic Din Iasi*. Tomul LIV(LVIII), Fasc. 3 - 4. 2008. p. 49 - 53.

40. Mikhalevich, V.M., Lebedev, A.A. & Dobranyuk, Y.V. Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression. *Strength Mater* 43, 591–603 (2011). <https://doi.org/10.1007/s11223-011-9332-7>.

41. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue. *J Appl Mech Trans* 1945; 12: A159–65.

42. Monno A., Yuzawa H., Kimura T., Kanayama T. Tube Wall Thickness Guage for Hot Stretch Reducer. *FAPIG*. 2006. № 173. P. 3-8.

43. Mykhalevych V., Dobraniuk Y., Matviichuk V., Kraievskyi V., Tiutiunnyk O., Smailova S., Kozbakova A. A comparative study of various models of equivalent plastic strain to fracture. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. № 13. 2023. P. 64-70.

44. Mykhalevych V., Kraievskyi V., Mykhalevych O., Hrushko O., Kotyra A., Drożdziel P., Mamyrbayev O., Orazalieva S. Modeling of the exhaustion

and regeneration of the resource regularities of objects with different natures. *Mechatronic Systems 2: Applications in Material Handling Processes and Robotics*. Vol. II. 2021. P. 27-38.

45. Mykhalevych V.M., Kolisnyk M.A., Shtuts A.A. Study of the Stress–Strain State of the Material of the Blanks during Plastic Stamping by Rolling. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2025. vol. 47, No. 1.

46. Ogorodnikov V., Derevenko I., Sivak R. On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading, *Materials Science*, Volume 54, Issue 3, P. 326–332, November. 2018.

47. Palmgren A. Endurance of ball bearing. *Z Ver Deutsch Ing* 1924; 68:339.

48. Pokras, V., Rvachev, M.: Application of the R-functions method to viscoplastic analysis in metal forming. *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 60 (1–4). 1996. P. 493–500.

49. Polishchuk, L., Bilyy, O., Kharchenko, Y. Prediction of the propagation of crack-like defects in profile elements of the boom of stack discharge conveyor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. 6(1). P. 44–52.

50. Puzur R., Kukhar V., Maslov A., Shchipkovski Y. The development of the method for the calculation of the shaping force in the production of vehicle wheel rims. *International Journal of Engineering Technology*. 7, 4.3, 2018. P. 30-34.

51. Puzyr R., Shvets L. Development of methods of experimental and analytical research of metal flow in the center of deformation of aluminum alloys during combine parts rolling. *Norwegian Journal of development of the International Science*. №83. 2022. P. 63-74.

52. Rice J.R., Tracey D.M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. Volume 17. Issue 3. 1969. P. 201-217.

53. Shtuts A., Babyn I., Luts P., Study of stamping and rolling processes in the formation of pipeline flanges. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024.

№ 4 (127). C. 38-45.

54. Shtuts A., Kolisnyk M. Study of the influence of technological parameters on the mechanics of shaping of billets using roll stamping processes. *Agricultural engineering*. 2022. Vol. 54, P. 62-72. <https://doi.org/10.15544/ageng.2022.54.7>

55. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 844. P. 168-181.

56. Shtuts A., Kolisnyk M., Yavdyk V. Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces' formation. *Motrol*. 2018. Vol. 20. №1. 19-25.

57. Shvets L. Expansion during rolling of preparations in different calibers. *Slovak international scientific journal*. №62. 2022. P. 17-31.

58. Shvets L. Methods of experimental and analytical research of metal in the center of deformation during hot compression heating. *The scientific heritage (Budapest, Hungary)*. Vol. 1. № 48. 2020. P. 54-75.

59. Shvets L. The essence and possibility of the method of isothermal deformation. *Slovak international scientific journal*. Vol.1 № 42. 2020. P. 16-24.

60. Shvets L., Pulupec M. Characteristics and thermomechanical modes of aluminum alloys hot deformation. ICCPT 2019: *Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference, May 28-29, 2019*. 2019. P. 195-203.

61. Sivak R. Evaluation of metal plasticity and research on the mechanics of pressure treatment processes under complex loading. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. №6-7. P. 34-41.

62. Tetiana Haikova, Volodymyr Dragobetsky, Ruslan Puzyr, Roman Argat, Dmytro Savelov, Roman Sivak. The Research of the Morphology and Mechanical Characteristics of Electric Bimetallic Contacts. *Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice*. P. 579-582.

63. Thomason P.F. Tensile plastic instability and ductile fracture criteria in uniaxial compression tests. *Int J Mech Sci*. Vol. 11. 1968. P. 187-202.

64. Thomason P.F. The use of pure aluminum as an analogue for the history of plastic flow. Studies of ductile fracture criteria in steel compression specimens. *Int J Mech Sci.* Vol. 5 (10). 1968. P. 1-18.
65. Titov A. V., Mykhalevych V. M., Popiel P., Mussabekov K. Statement and solution of new problems of deformability theory. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments.* 2018, 108085E (1 October 2018)
66. Urban J. Crushing and Fracture of Lightweight Structures. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark. 2003. p. 218
67. Wierzbicki, T., Bao, Y., Lee, Y.-W., Bai, Y. Calibration and evaluation of seven fracture models. *International Journal of Mechanical Sciences* 47 (4-5). 2005. 719–743.
68. Yanovych V., Duda D., Uruba V., Tomášková T. Hot-Wire Investigation of Turbulence Topology behind Blades at Different Shape Qualities. *Processes.* 2022; 10(3). 522. <https://doi.org/10.3390/pr10030522>
69. Абхари П. Б., Сивак Р. І., Таган Л. В., Малій К. В. Моделювання процесу закритого радіального видавлювання фланця з редукуванням» *Обробка матеріалів тиском.* 2017. № 2. С. 17-21.
70. Божидарник В. В., Сулим Г. Т. Елементи теорії пружності. Навч. посібник : Львів : Світ, 1994. 560 с.
71. Болтон У. Конструкційні матеріали: метали, сплави, полімери, кераміка, композити. *Кишеньковий довідник.* Видавничий дім «Додека-XXI». 2004. 320 с.
72. Гожій С. П., Кліско О. В., Носенко А. І., Лавріненков О. Д. Впровадження технологічних процесів штампування обкочуванням у сучасному ресурсозберігаючому виробництві. *Обробка матеріалів тиском.* 2012. № 3. С. 65-71.
73. Гожій С.П., Кривда Л.Т. Штампування обкочуванням як засіб ресурсозбереження. *Наукові вісті.* Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2006. № 2(46). С. 55-60.

74. Грибков Е.П., Доброносів Ю.К., Кухар В.В., Малій Х.В. Тривимірний аналіз напружено-деформованого стану металу при правці труб на правильних косовалкових машинах зі спеціальним профілюванням валків. *Метал та лиття України*. № 3 (334), 2023. С. 64-71.

75. Грушко О. В. Діагностування граничного формозмінювання листових матеріалів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2008. № 1. С. 111-115.

76. Грушко О. В., Молодецька Т. І. Технологічний паспорт матеріалу для процесів поверхневого зміцнення заготовок. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ" : Харків : НТУ "ХПІ"*. 2010. № 42. С. 113-118.

77. Грушко О. В., Огородніков В. А., Побережний М. І., Єленич М. П. Побудова кривої течії матеріалу за границями міцності і текучості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2009. № 6. С. 90-93.

78. Грушко О.В., Гуцалюк О.В. Моделювання процесу редукування циліндричних заготовок з визначенням основних параметрів деформованого стану. *Обробка Матеріалів тиском*. Краматорск. ДДМА. 2016. № 1(42). С. 57–62.

79. Гунько І. В. Оцінка деформівності матеріалу заготовок при холодному вальцюванні. *Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія машинобудування. К. : НТУУ "КПІ"*. 2012. 7 с.

80. Гунько І. В., Бубновська І. А. Штампування поковок із алюмінієвих сплавів з подовженою віссю. *Міжнародна науково-технічна конференція Вінниця : ВНТУ*. 2011. С. 178-180.

81. Деменко В. Ф., Куреннов С. С. Основи теорії напружено-деформованого стану : навчальний. Посібник. *Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т"*. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т", 2018. 255 с.

82. Добранюк Ю. В., Алієва Л. І., Михалевич В. М. Моделювання за допомогою програмного комплексу DEFORM-3D напружено-деформованого

стану на бічній поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення. *Обробка металів тиском : збірник наукових праць : Краматорськ : ДДМА. 2010. № 4. С. 3-10.*

83. Добранюк Ю. В., Михалевич В. М., Коломієць А. А., Козак О. М. Застосування СКМ Maple для побудови 3D графіків в задачах обчислення об'єму фігур. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2022. № 2. С. 115-123.*

84. Добранюк Ю. В., Михалевич В. М., Коломієць А. А., Козак О. М. Застосування СКМ Maple для побудови 3D графіків в задачах обчислення об'єму фігур. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2022. № 2. с. 115-123.*

85. Дороговцев А. Я. Математичний аналіз: Підручник: Частина 1. Либідь. 1993. 320 с.

86. Калюжний В. Л., Калюжний А. В., Піманов С. Т, Лаврінченко А. Д. Моделювання процесу витяжки з потоненням ступінчастим пуансоном заготовок із високовуглецевої сталі. *Технологічні системи. 2008. № 4 (44). С. 75-79.*

87. Колісник М.А., Служалюк М.О. Дослідження методики розрахунку і вибору технологічних параметрів штампування обкочуванням складнопрофільних виробів з використання комп'ютерного моделювання. *Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020. № 2 (108) С. 123-133. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-1-14*

88. Краєвський В. О., Михалевич В. М. Взаємозв'язок теорії підсумовування пошкоджень із задачею про таутохрону. *Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2016. № 5. С. 85–92.*

89. Краєвський В. О., Михалевич В. М. Оптимізація параметрів ступеневої схеми зміни швидкості деформацій при гарячому деформуванні *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. : Вінниця, 2014. № . 2. С. 12-16.*

90. Краєвський В. О., Михалевич В. М. Оптимізація швидкісного

режиму багатоступеневого гарячого деформування при однаковій тривалості ступенів. Вісник ДонНУ. Серія А: *Природничі науки*. 2015. № 1-2. с. 46-52.

91. Кухар В. В., Аніщенко О. С., Нагнібеда М. М. Методика розрахунку напружено-деформованого стану листової заготовки при гнутті з урахуванням зміцнення матеріалу. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. Вип. 37 (1259). 2017. С. 36–40.

92. Кухар В. В., Нагнібеда М. М. Напружено-деформований стан листової заготовки із врахуванням впливу властивостей матеріалів при гнутті з послідовним зменшенням внутрішнього радіусу. *Наука та виробництво*. Вип. 23. 2020. С. 41-49.

93. Лисогор В. М., Рубаненко О. О., Шулле Ю. А., Колісник М. А. Моделі оптимального функціонування сільськогосподарських електротехнічних комплексів в умовах наявності ризиків. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2015. № 2 (90). С. 128-132.

94. Лисогор В.М., Штуць А.А., Бородянець Я.Г., Колісник М.А., Задача оптимізації багатостадійних технологічних процесів з людинно-машинним управлінням в АПК. *Збірник наукових праць. Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2014. №1(84). С. 125-130.

95. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Бубновська І. А. Оцінка деформованості матеріалу заготовок при вальцюванні за схемами в два і більше переходів. *Міжнародна науково-методична. Інтернет-конференції*. 2018. С. 246-249.

96. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Трач Є. А. Узагальнення експериментально-аналітичної методики аналізу процесу осадження *Обробка матеріалів тиском. Краматорск : ДДМА*, 2014. № 1. С. 41–47.

97. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Краєвський В. О. Розробка процесів холодного торцевого розкочування із врахуванням впливу технологічних параметрів на напрям плинину металу. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2015. № 2. С. 92-96.

98. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Краєвський В.О. Пристрій для давальних робіт. Патент України №20031213282. Заявлено 31.12.2003. Опубл. 15.10.2004. Бюл. №10. 2 с.

99. Матвійчук В.А., Гайдамак О.Л., Колісник М.А. Підвищення службових характеристик поверхневого шару деталей шляхом застосування поверхневого пластичного деформування і холодного газодинамічного наплення. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 2 (97). С. 90-100. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-2-10

100. Матвійчук В.А., Колісник М.А. Розробка технологічного процесу формування широких фланців на листових заготовках методом штампування обкочуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 1 (112). С. 38-45. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-5

101. Матвійчук В.А., Колісник М.А. Формування якісних показників виробів процесами штампування обкочуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 4 (115). С. 75-83. DOI:10.37128/2520-6168-2021-4-8

102. Матвійчук В.А., Колісник М.А., Любін М.В. Розробка і дослідження процесів штампування обкочуванням складно профільних заготовок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. № 4 (103). С. 56-63.

103. Матвійчук В.А., Колісник М.А., Штуць А.А. Дослідження напружено-деформовного стану матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. №3(102). С. 77-84.

104. Матвійчук В.А., Колісник М.А., Штуць А.А. Побудова кривих граничних деформацій матеріалів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2 (105). С. 84-90. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-9

105. Матвійчук В.А., Михалевич В.М., Колісник М.А. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом штампування обкочуванням. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 1 (104). С. 81-91. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-10

106. Михалевич В. М. Аналітичний опис динаміки формозміни

циліндричних заготовок під час торцевого стиснення [Текст] / В. М. Михалевич, Ю. В. Добранюк // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ" : збірник наукових праць. Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. Харків : НТУ "ХПІ", 2015. № 47. С. 53–56.*

107. Михалевич В. М. Історія та сучасний стан тензорної теорії накопичення пошкоджень. *Надійність і довговічність машин і споруд : Київ : ІПМіцн. ім. Г.С. Писаренка НАНУ. 2013. С. 132-140.*

108. Михалевич В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. 1998. 195 с.

109. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Михалевич О. В. Необхідні та достатні умови опуклості функції пошкоджень під час нестационарних процесів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2010. №5. С. 113-117.*

110. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Аналітичне представлення максимального радіуса циліндричних заготовок під час вісесиметричного осадження із бочкоутворенням. *Вісник машинобудування та транспорту. 2015. № 1. С. 59-66.*

111. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Аналітичний опис динаміки формозміни циліндричних заготовок під час торцевого стиснення. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". 2015. № 47. С. 53-56.*

112. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Апроксимація залежностей між компонентами деформацій на бічній поверхні циліндричного зразка під час торцевого стиснення. *Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 38309 від 11 травня 2011 р.*

113. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Залежність максимального діаметру заготовки від ступеня деформування під час вісесиметричного осадження. *Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта : матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 22-25 червня 2015 р. НТУУ «КПІ», 2015. С. 83–84.*

114. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Модель пластичного

деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. *Частина 1. Апроксимація деформацій. Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2010. №2. С. 97-102.

115. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. *Частина 2. Визначення накопиченої деформації та інтенсивності логарифмічних деформацій на основі різних апроксимацій. Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2010. № 3. С. 99-102.

116. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. Визначення накопиченої деформації та інтенсивності логарифмічних деформацій на основі різних апроксимацій. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2010. № 3. С. 99-102.

117. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні : монографія. *Вінниця : ВНТУ*. 2013. 180 с.

118. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Напружений стан товстостінної труби під рівномірним тиском. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2016. № 1. С. 67-72.

119. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Краєвський В. О. Порівняльне дослідження моделей граничних пластичних деформацій. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. № 2. С. 56-64.

120. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Краєвський В. О. Порівняльне дослідження моделей граничних пластичних деформацій. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. № 2. С. 56-64.

121. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Матвійчук В. А., Трач Є. А. Моделі підсумовування розсіяних пошкоджень в процесах пластичного деформування. *Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії : Харків : НТУ «ХП»*. 2014. № 43. С. 98-103.

122. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Михалевич О. В. Побудова ефективних обчислювальних схем у Maple під час розв'язання задачі визначення граничних деформацій за умов складного деформування. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2009. № 2. 7 с.

123. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Ткач Є. А. Формозміна бічної поверхні циліндричних заготовок під час вісесиметричного осадження. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : Харків : НТУ "ХПІ"*. 2013. № 42. С. 126-131.

124. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Трач Є. А. Визначення граничних деформацій бічної поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження за допомогою імітаційного моделювання. *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. Харків : НТУ "ХПІ"*. 2011. № 45. С. 104-107.

125. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Трач Є. А. Удосконалення експериментальної частини експериментально-аналітичної методики дослідження напружено-деформованого стану бічної поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричної осадки. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2011. № 4. Режим доступу. <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/304>.

126. Михалевич В. М., Краєвський В. А., Добранюк Ю. В. Моделювання граничних деформацій на вільній поверхні при осесиметричній осідання. *Прогресивні методи та технологічне оснащення процесів обробки металів тиском : мат. міжнарод. наук.-техн. конф.* 2009. С. 108-112.

127. Михалевич В. М., Краєвський В. О., Добранюк Ю. В. Вісесиметрична осадка циліндричних заготовок. *Наукові нотатки : міжвузівський збірник за напрямом інженерна механіка. Луцьк* : 2009. № 5 С. 241-249.

128. Михалевич В. М., Краєвський В. О., Добранюк Ю. В. Моделювання граничних пластичних деформацій при нестационарних процесах та задачі оптимізації. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник*

наукових праць. Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. Харків : НТУ "ХПІ". 2009. № 31. С. 64-70.

129. Михалевич В. М., Краєвський В. О., Добранюк Ю. В. Моделювання граничних пластичних деформацій при нестационарних процесах та задачі оптимізації. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях. Харків : НТУ "ХПІ". 2009. № 31. С. 64-70.*

130. Михалевич В. М., Краєвський В. О., Добранюк Ю. В. Моделювання граничних деформацій на вільній бічній поверхні під час високотемпературного торцевого осадження. *Вісник машинобудування та транспорту. Вінниця : ВНТУ, 2015. № 2. С. 54–60.*

131. Михалевич В. М., Краєвський В. О., Добранюк Ю. В. Моделювання циклічної осесиметричної осідання циліндричних зразків. *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки: Вінниця: 2009. № 2. С. 26-31.*

132. Михалевич В. М., Краєвський В. О., Добранюк Ю. В. Удосконалення методу розв'язування двовимірної задачі пресування штаби. *Вісник НТУУ «КПІ». 2016. № 2. С. 79-88.*

133. Михалевич В. М., Матвійчук В. А., Бубновська І. А. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при вальцюванні. *Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2021. № 2(113). с. 56-64.*

134. Михалевич В.М. Матвійчук В.А. Колісник М.А. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому видавлюванні методом штампування обкочуванням. *Обробка матеріалів тиском. 2022. № 1 (51). С. 87-97. DOI: 10.37142/2076-2151/2022-1(51)87*

135. Михалевич В.М. Математичне моделювання механіки формоутворення при холодному торцевому розкочуванні та ротаційній витяжці: монографія / В. М Михалевич., В. О. Краєвський. Вінниця: "УНІВЕРСУМ- Вінниця", 2008. - 188 с. ISBN 978-966-641-238-9

136. Михалевич В.М., Добранюк Ю.В. Моделювання напружено-

деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні. Монографія. Вінниця: ВНТУ. 2013. 180 с.

137. Михалевич В.М., Добранюк Ю.В., Тютюнник О.І., Колісник М.А. Лінійні та нелінійні моделі в теорії підсумовування пошкоджень. *Обробка матеріалів тиском*. 2024. № 1 (53). С. 100-108

138. Михалевич В.М., Матвійчук В.А., Колісник М.А. Оцінка деформовності матеріалу при висаджуванні елементів заготовок методом штампування обкочуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 2(117). С. 104-114. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-2-11

139. Михалевич В.М., Штуць А.А., Колісник М.А. Дослідження процесів штампування обкочуванням за рахунок аналізу моделювання деформовності матеріалу заготовок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 3 (122). С. 22-34. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-3.

140. Михалевич В.М., Штуць А.А., Колісник М.А. Дослідження технологічних процесів штампування деталей типу фланець на основі застосування способів комбінованого видавлювання. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 46-57. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-6

141. Огородніков В. А., Грушко А. В., Гуцалюк А. В. Історія деформування, що визначає застосування феноменологічних критеріїв руйнування у процесах обробки тиском. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 1. с. 67-77.

142. Огородніков В. А., Деревенько І. А., Сивак Р. І. Про вплив кривизни траєкторій деформування обсягу матеріалу при обробці тиском на його пластичність в умовах складного навантаження. *Фізикохімічна механіка матеріалів*. 2018. № 3. С. 37-42.

143. Огородніков В. А., Нахайчук О. В., Любін М. В., Бабак М. В. Використаний ресурс пластичності металу при вдавлюванні внутрішньої метричної різі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 1998. №1 (18). С. 68-72.

144. Полєвода Ю.А., Колісник М.А., Штуць А.А., Михалевич В.М.

Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Конструктивна схема обкочувального інструментального блоку з конічним валком для виготовлення заготовок методом штампування обкочуванням». № 127208. від 10.06.2024; заяв. № cr0677100624. Від 31.07.2024р.

145. Сагіров Ю.Г., Суглобов В.В., Кухар В.В. Моделювання навантаженості та аналіз напружено-деформованого стану елементів траверси ливарного крана. *Вісник ХНАДУ*, Вип. 84, 2019. С. 2-12.

146. Сердюк О. В., Сивак І. О., Сухоруков С. І., Сивак Р. І. Оцінка пластичності поверхневого шару металу при немонотонному навантаженні, *Наукові нотатки: міжвузівський збірник*. 2016. № 54. С. 277-281.

147. Сивак Р. І. Визначення кінематики деформування на основі сплайн апроксимацій. *Вібрації в техніці та технологіях*. № 2. 2020. С. 101-107.

148. Сивак Р. І. Накопичення пошкоджень при імпульсному пластичному деформуванні поверхневого шару, *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 2. С. 47-50.

149. Сивак Р. І., Рекечинський В. І. Особливості пластичної деформації при немонотонному деформуванні. *Вібрації в техніці та технологіях*, № 2. 2019. С. 34-41.

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

151. Спічак О.Ю., Шестопапов О.В., Кухар В.В., Малій Х.В. Удосконалення системи очищення прокатної емульсії у процесі холодної прокатки з технологічними мастилами. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. № 2. 2024. С. 20-27.

152. Столбовий В.О., Сребрянський Г.О., Кривчик Л.С., Хохлова Т.С., Пінчук В.Л. Зміцнення інструменту для холодної роликової прокатки корозійностійких труб. *Науково-технічний журнал металознавство та обробка металів*. 2022. № 28(104). с. 40-47.

153. Сухоруков С. І., Коцюбівська К. І., Сивак І. О. Оцінка

деформуємості заготовок при поперечно-клиновій прокатці. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»)*. Випуск 25, частина II (червень, 2009). Луцьк. 2009. С. 272-275.

154. Тітов А. В., Тітов О. В., Шмельова Л. В., Лавріненко А. Д. Математична модель взаємодії сферичного індентора з поверхнею деталі. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2011. № 62. С. 95-99.

155. Тітов В. А., Злочевська Н. К., Лавріненков О. Д., Гараненко Т. Р. Дослідження параметрів процесу ізотермічного пресування заготовок з титанових сплавів. *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2011. № 46. С. 67-73.

156. Швець Л.В., Чмих К.В. Аналітичні дослідження методів гарячого деформування металів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. № 3 (118). 2022. С. 95-100.

157. Шевчук Е. І., Сивак Р. І., Сухоруков С. І. Оцінка використаного ресурсу пластичності металу під час ротаційної витяжки конічних заготовок. *Обробка матеріалів тиском*. 2016. № 2. С. 93-97.

158. Штуць А.А. Комп'ютерне моделювання процесу штампування обкочуванням циліндричних та трубних заготовок з використанням програмного комплексу Deform – 3D. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 4. (99). С. 101-113.

159. Ярошенко Л.В., Колісник М.А., Штуць А.А., Присяжнюк Ю.С. Оцінка деформаційної стійкості матеріалу заготовок під час прямого витискування за допомогою методу штампування. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 4 (111). С. 54-67.

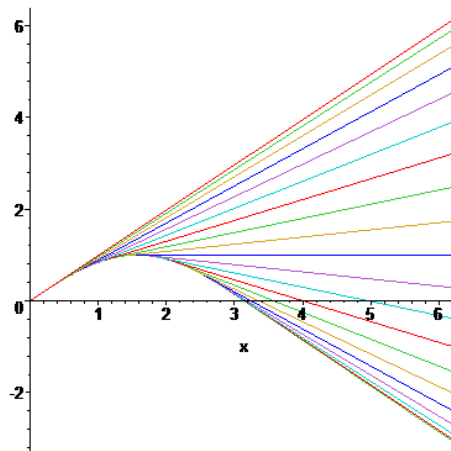
ДОДАТКИ

Траєкторії деформування матеріалу заготовок при висаджуванні методом штампування обкочуванням

```

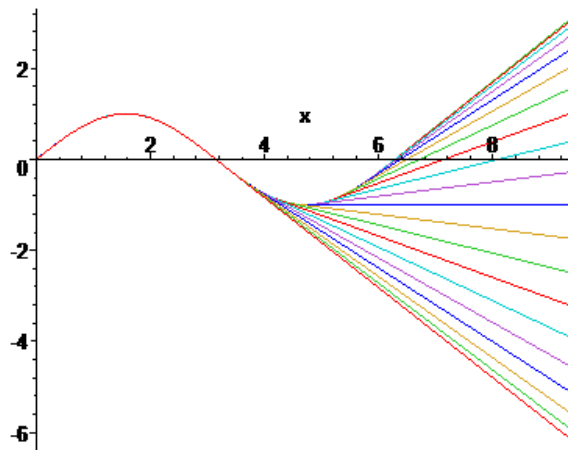
>restart:
SinL:=proc(x,x1)
  #Дотична до графіку функції  $y=\sin(x)$  в точці  $x1$ :
  y=sin(x1)+cos(x1)*(x-x1)
  if type(evalf(x*x1),extended_numeric) then
    piecewise(x>=0 and x<=x1,sin(x),sin(x1)+cos(x1)*(x-x1))
  else
    'procname( args )'
  end if
end proc;
SinL := proc(x, x1)                                     end proc
  if type(evalf(x*x1), extended_numeric) then piecewise(
    0 ≤ x and x ≤ x1, sin(x), sin(x1) + cos(x1)*(x - x1))
  else 'procname( args )'
  end if
>nn:=30:
[seq(SinL(x,k*3*Pi/nn/2),k=1..20)];
plot(%,x=0..2*Pi);g10:=%:
  [ SinL(x,  $\frac{\pi}{20}$ ), SinL(x,  $\frac{\pi}{10}$ ), SinL(x,  $\frac{3\pi}{20}$ ), SinL(x,  $\frac{\pi}{5}$ ), SinL(x,  $\frac{\pi}{4}$ ),
    SinL(x,  $\frac{3\pi}{10}$ ), SinL(x,  $\frac{7\pi}{20}$ ), SinL(x,  $\frac{2\pi}{5}$ ), SinL(x,  $\frac{9\pi}{20}$ ), SinL(x,  $\frac{\pi}{2}$ ),
    SinL(x,  $\frac{11\pi}{20}$ ), SinL(x,  $\frac{3\pi}{5}$ ), SinL(x,  $\frac{13\pi}{20}$ ), SinL(x,  $\frac{7\pi}{10}$ ),
    SinL(x,  $\frac{3\pi}{4}$ ), SinL(x,  $\frac{4\pi}{5}$ ), SinL(x,  $\frac{17\pi}{20}$ ), SinL(x,  $\frac{9\pi}{10}$ ),
    SinL(x,  $\frac{19\pi}{20}$ ), SinL(x,  $\pi$ ) ]
>nn:=30:
[seq(SinL(x,k*3*Pi/nn/2),k=21..40)];

```



```
plot(%,x=0..3*Pi);g20:=%:
```

$$\left[\text{SinL}\left(x, \frac{21\pi}{20}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{11\pi}{10}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{23\pi}{20}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{6\pi}{5}\right), \right. \\ \text{SinL}\left(x, \frac{5\pi}{4}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{13\pi}{10}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{27\pi}{20}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{7\pi}{5}\right), \\ \text{SinL}\left(x, \frac{29\pi}{20}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{3\pi}{2}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{31\pi}{20}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{8\pi}{5}\right), \\ \text{SinL}\left(x, \frac{33\pi}{20}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{17\pi}{10}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{7\pi}{4}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{9\pi}{5}\right), \\ \left. \text{SinL}\left(x, \frac{37\pi}{20}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{19\pi}{10}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{39\pi}{20}\right), \text{SinL}(x, 2\pi) \right]$$



```
>5500*7.7;
```

```
42350.0
```

```
>3100*7.66;
```

```
23746.00
```

```
>restart:
```

```
Ett:=proc(alpha,etal,eta)
```

```
if type(evalf(alpha*etal*eta),extended_numeric) then
```

```
  piecewise(eta>=0 and eta<=etal,eta*cos(alpha)-
```

```
  sin(eta)*sin(alpha)-1,eta*cos(alpha)-(sin(etal)+cos(etal))*(eta-
```

```
  etal))*sin(alpha)-1)
```

```
else
```

```
  'procname( args )'
```

```
end if
```

```
end proc:
```

```
Eit:=proc(A,alpha,etal,eta)
```

```
if type(evalf(alpha*etal*eta*A),extended_numeric) then
```

```
  A*piecewise(eta>=0 and
```

```
  eta<=etal,eta*sin(alpha)+sin(eta)*cos(alpha),eta*sin(alpha)+(sin
```

```
  (etal)+cos(etal)*(eta-etal))*cos(alpha))
```

```
else
```

```
  'procname( args )'
```

```

end if
end proc:
>nn:=30:
[seq(SinL(x,k*3*Pi/nn/2),k=1..20)]:
[seq([k*3*Pi/nn/2,evalf(k*3*Pi/nn/2)],k=1..20)];
#plot(%,x=0..2*Pi);g10:=%:

$$\left[ \left[ \frac{\pi}{20}, 0.1570796327 \right], \left[ \frac{\pi}{10}, 0.3141592654 \right], \left[ \frac{3\pi}{20}, 0.4712388981 \right], \right.$$


$$\left[ \frac{\pi}{5}, 0.6283185308 \right], \left[ \frac{\pi}{4}, 0.7853981635 \right], \left[ \frac{3\pi}{10}, 0.9424777962 \right], \right.$$


$$\left[ \frac{7\pi}{20}, 1.099557429 \right], \left[ \frac{2\pi}{5}, 1.256637062 \right], \left[ \frac{9\pi}{20}, 1.413716694 \right], \right.$$


$$\left[ \frac{\pi}{2}, 1.570796327 \right], \left[ \frac{11\pi}{20}, 1.727875960 \right], \left[ \frac{3\pi}{5}, 1.884955592 \right], \right.$$


$$\left[ \frac{13\pi}{20}, 2.042035225 \right], \left[ \frac{7\pi}{10}, 2.199114858 \right], \left[ \frac{3\pi}{4}, 2.356194490 \right], \right.$$


$$\left[ \frac{4\pi}{5}, 2.513274123 \right], \left[ \frac{17\pi}{20}, 2.670353756 \right], \left[ \frac{9\pi}{10}, 2.827433389 \right], \right.$$


$$\left[ \frac{19\pi}{20}, 2.984513021 \right], [\pi, 3.141592654]$$

>#Ec,Ek,Ep:=2.6,0.68,0.35;
Alf:=0.01*Pi/4-0:Alf:=1*Pi/4-0:
A1:=0.24:#A1:=0.1:
nn:=30:
[seq(SinL(x,k*3*Pi/nn/2),k=20..nn)];
[seq([Ett(Alf,k*3*Pi/nn/2,eta),Eit(A1,Alf,k*3*Pi/nn/2,eta),eta=0..3*Pi/2+3*Pi/4],k=0..20)]:print([Ett(Alf,Pi/2,eta),Eit(A1,Alf,Pi/2,eta),eta=0..3*Pi/2]);
print(seq(k*3*Pi/nn/2,k=0..20));
#plot(%,x=0..2*Pi);g250:=%:
#plot([ [Ett(Alf,Pi/2,eta),Eit(A1,Alf,Pi/2,eta),eta=0..3*Pi/2],1]
2..1.05,0..2.6,color=[green,blue,black,red,brown],thickness=[3,1,1,2,1],style=[line]);
plot([%[],1],x=-
2..6.05,0..1.6,color=[blue],thickness=[1],style=[line]);

$$\left[ \text{SinL}\left(x, \pi\right), \text{SinL}\left(x, \frac{21 \pi}{20}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{11 \pi}{10}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{23 \pi}{20}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{6 \pi}{5}\right), \right.$$


$$\text{SinL}\left(x, \frac{5 \pi}{4}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{13 \pi}{10}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{27 \pi}{20}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{7 \pi}{5}\right),$$

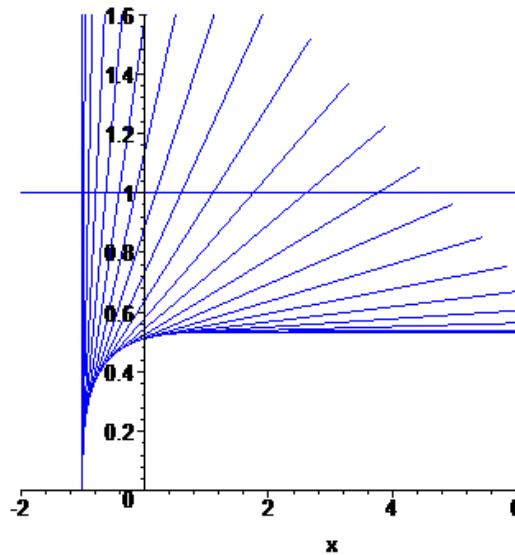

$$\left. \text{SinL}\left(x, \frac{29 \pi}{20}\right), \text{SinL}\left(x, \frac{3 \pi}{2}\right) \right]$$


$$\left[ \text{Ett}\left(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \eta\right), \text{Eit}\left(0.24, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \eta\right), \eta=0 \ldots \frac{3 \pi}{2} \right]$$


```

Продовження додатку А

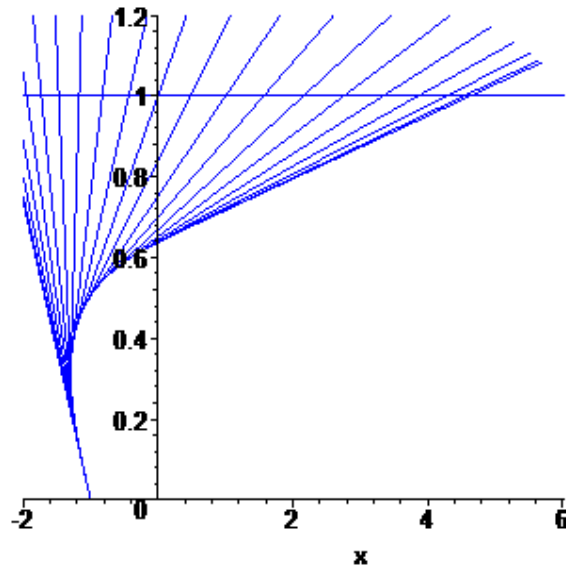
$$0, \frac{\pi}{20}, \frac{\pi}{10}, \frac{3\pi}{20}, \frac{\pi}{5}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{10}, \frac{7\pi}{20}, \frac{2\pi}{5}, \frac{9\pi}{20}, \frac{\pi}{2}, \frac{11\pi}{20}, \frac{3\pi}{5}, \frac{13\pi}{20}, \frac{7\pi}{10}, \frac{3\pi}{4}, \\ \frac{4\pi}{5}, \frac{17\pi}{20}, \frac{9\pi}{10}, \frac{19\pi}{20}, \pi$$



```
> Alf:=0.01*Pi/4-0:Alf:=1*Pi/4+Pi/10;#Alf:=11*Pi/20:#+Pi/10:
A1:=0.24:#A1:=0.1:
nn:=30:
[seq(SinL(x,k*3*Pi/nn/2),k=20..nn)]:
[seq([Ett(Alf,k*3*Pi/nn/2,eta),Eit(A1,Alf,k*3*Pi/nn/2,eta),eta=0
..3*Pi/2+3*Pi/4],k=0..20)]:print([Ett(Alf,Pi/2,eta),Eit(A1,Alf,Pi/2,eta),eta=0..3*Pi/2]):
#plot(% ,x=0..2*Pi);g250:=%:
#plot([Ett(Alf,Pi/2,eta),Eit(A1,Alf,Pi/2,eta),eta=0..3*Pi/2],1]
2..1.05,0..2.6,color=[green,blue,black,red,brown],thickness=[3,1,1,2,1],style=[line]);
plot([%[]],1,x=-2..6.05,0..1.2,color=[blue],thickness=[1],style=[line]);
```

$$Alf := \frac{7\pi}{20}$$

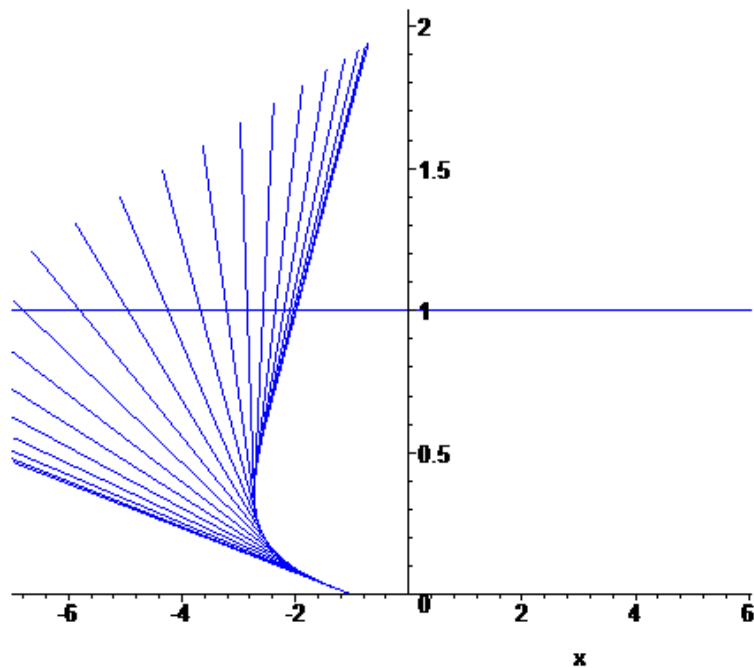
$$\left[\text{Ett}\left(\frac{7\pi}{20}, \frac{\pi}{2}, \eta\right), \text{Eit}\left(0.24, \frac{7\pi}{20}, \frac{\pi}{2}, \eta\right), \eta = 0 \dots \frac{3\pi}{2} \right]$$



```
> Alf:=0.01*Pi/4-0:Alf:=1*Pi/4+2*Pi/5;#Alf:=Pi/4+Pi/2-Pi/40:
A1:=0.24:#A1:=0.1:
[seq(SinL(x,k*3*Pi/nn/2),k=20..nn)]:
[seq([Ett(Alf,k*3*Pi/nn/2,eta),Eit(A1,Alf,k*3*Pi/nn/2,eta),eta=0
..3*Pi/2+3*Pi/4],k=0..20)]:print([Ett(Alf,Pi/2,eta),Eit(A1,Alf,P
i/2,eta),eta=0..3*Pi/2]):
#plot(%,x=0..2*Pi);g250:=%:
#plot([ [Ett(Alf,Pi/2,eta),Eit(A1,Alf,Pi/2,eta),eta=0..3*Pi/2],1]
2..1.05,0..2.6,color=[green,blue,black,red,brown],thickness=[3,1
,1,2,1],style=[line]);
plot([%[],1],x=-
7..6.05,0..2.06,color=[blue],thickness=[1],style=[line]);
```

$$Alf := \frac{13\pi}{20}$$

$$\left[\text{Ett}\left(\frac{13\pi}{20}, \frac{\pi}{2}, \eta\right), \text{Eit}\left(0.24, \frac{13\pi}{20}, \frac{\pi}{2}, \eta\right), \eta = 0 \dots \frac{3\pi}{2} \right]$$



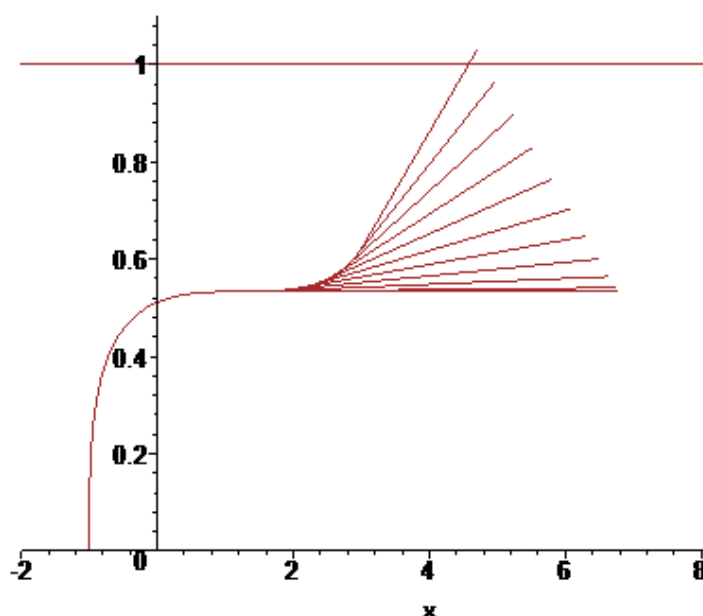
```

>#Ec,Ek,Ep:=2.6,0.68,0.35;
Alf:=0.01*Pi/4-0:Alf:=1*Pi/4-0;
A1:=0.24:#A1:=0.1:
nn:=30:
[seq(SinL(x,k*3*Pi/nn/2),k=20..nn)]:
[seq([Ett(Alf,k*3*Pi/nn/2,eta),Eit(A1,Alf,k*3*Pi/nn/2,eta),eta=0
..3*Pi/2+3*Pi/4],k=20..nn)]:print([Ett(Alf,Pi/2,eta),Eit(A1,Alf,
Pi/2,eta),eta=0..3*Pi/2]);
#plot(%,x=0..2*Pi);g250:=%;
#plot([Ett(Alf,Pi/2,eta),Eit(A1,Alf,Pi/2,eta),eta=0..3*Pi/2],1]
,x=-
2..1.05,0..2.6,color=[green,blue,black,red,brown],thickness=[3,1
,1,2,1],style=[line]);
plot([%[],1],x=-
2..8.05,0..1.1,color=[brown],thickness=[1],style=[line]);g200:=%

```

$$Alf := \frac{\pi}{4}$$

$$\left[Ett\left(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \eta\right), Eit\left(0.24, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \eta\right), \eta = 0 \dots \frac{3\pi}{2} \right]$$



```

>Alf:=0.01*Pi/4-0:Alf:=1*Pi/4-Pi/10:
A1:=0.44:#A1:=0.1:
nn:=30:
[seq(SinL(x,k*3*Pi/nn/2),k=20..nn)]:
[seq([Ett(Alf,k*3*Pi/nn/2,eta),Eit(A1,Alf,k*3*Pi/nn/2,eta),eta=0
..3*Pi/2+3*Pi/4],k=20..nn)]:print([Ett(Alf,Pi/2,eta),Eit(A1,Alf,
Pi/2,eta),eta=0..3*Pi/2]);
#plot(%,x=0..2*Pi);g250:=%;
#plot([Ett(Alf,Pi/2,eta),Eit(A1,Alf,Pi/2,eta),eta=0..3*Pi/2],1]
2..1.05,0..2.6,color=[green,blue,black,red,brown],thickness=[3,1
,1,2,1],style=[line]);
plot([%[],1],x=-
2..6.05,0..1.1,color=[blue],thickness=[1],style=[line]);

```

Оцінка деформовності заготовок при прямому витискуванні методом
штампування обкочуванням

[Ett,Eit]

```
>#restart:
Ett:=proc(alpha,etal,eta)
if type(evalf(alpha*etal*eta),extended_numeric) then
  piecewise(eta>=0 and eta<=etal,eta*cos(alpha)-
sin(eta)*sin(alpha)-1,eta*cos(alpha)-(sin(etal)+cos(etal)*(eta-
etal))*sin(alpha)-1)
else
  'procname( args )'
end if
end proc:
Eit:=proc(A,alpha,etal,eta)
if type(evalf(alpha*etal*eta*A),extended_numeric) then
  A*piecewise(eta>=0 and
eta<=etal,eta*sin(alpha)+sin(eta)*cos(alpha),eta*sin(alpha)+(sin
(etal)+cos(etal)*(eta-etal))*cos(alpha))
else
  'procname( args )'
end if
end proc:
 $\eta \cos(\alpha) - \sin(\eta) \sin(\alpha) - 1,$ 
 $\eta \cos(\alpha) - (\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1)(\eta - \eta_1)) \sin(\alpha) - 1$ 
 $\eta \cos(\alpha) - \sin(\eta) \sin(\alpha) - 1,$ 
 $\eta \cos(\alpha) - (\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1)(\eta - \eta_1)) \sin(\alpha) - 1$ 
#Epr2:=(Ec,Ek,Ep,eta)-
>Ek*(Ep/Ec)^(eta/2)*(Ep*Ec/Ek^2)^(eta^2/2):Epr2(Ec,Ek,Ep,eta);
>Ett(alpha,Pi/2,eta);evalf(%);
```

$$Ett\left(\alpha, \frac{\pi}{2}, \eta\right)$$

$$Ett\left(\alpha, \frac{\pi}{2}, \eta\right)$$

```
eta=eval(subs(alpha=Pi/4,eta=t,eta*cos(alpha)-
(sin(etal)+cos(etal)*(eta-etal))*sin(alpha)-1));
isolate(%,t);
ei=eval(subs(alpha=Pi/4,eta=t,%,eta*sin(alpha)+(sin(etal)+cos(et
al)*(eta-etal))*cos(alpha)));
```

$$\eta = \frac{t\sqrt{2}}{2} - \frac{1}{2}(\sin(\eta_1) + \cos(\eta_1)(t - \eta_1))\sqrt{2} - 1$$

$$t = \frac{-\eta - 1 - \frac{1}{2}\sqrt{2}\sin(\eta_1) + \frac{1}{2}\sqrt{2}\cos(\eta_1)\eta_1}{-\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{2}\cos(\eta_1)}$$

$$ei = \frac{1}{2} \frac{\left(-\eta - 1 - \frac{1}{2}\sqrt{2} \sin(\eta 1) + \frac{1}{2}\sqrt{2} \cos(\eta 1) \eta 1 \right) \sqrt{2}}{-\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{2} \cos(\eta 1)} + \frac{1}{2} \left(\sin(\eta 1) + \cos(\eta 1) \left(\frac{-\eta - 1 - \frac{1}{2}\sqrt{2} \sin(\eta 1) + \frac{1}{2}\sqrt{2} \cos(\eta 1) \eta 1}{-\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{2} \cos(\eta 1)} - \eta 1 \right) \right) \sqrt{2}$$

1/2*(-eta-1-1/2*2^(1/2)*sin(eta1)+1/2*2^(1/2)*cos(eta1)*eta1)/(-1/2*2^(1/2)+1/2*2^(1/2)*cos(eta1))*2^(1/2)+1/2*(sin(eta1)+cos(eta1))*((-eta-1-1/2*2^(1/2)*sin(eta1)+1/2*2^(1/2)*cos(eta1)*eta1)/(-1/2*2^(1/2)+1/2*2^(1/2)*cos(eta1))-eta1))*2^(1/2);

$$\frac{1}{2} \frac{\left(-\eta - 1 - \frac{1}{2}\sqrt{2} \sin(\eta 1) + \frac{1}{2}\sqrt{2} \cos(\eta 1) \eta 1 \right) \sqrt{2}}{-\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{2} \cos(\eta 1)} + \frac{1}{2} \left(\sin(\eta 1) + \cos(\eta 1) \left(\frac{-\eta - 1 - \frac{1}{2}\sqrt{2} \sin(\eta 1) + \frac{1}{2}\sqrt{2} \cos(\eta 1) \eta 1}{-\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{2} \cos(\eta 1)} - \eta 1 \right) \right) \sqrt{2}$$

```
>R := simplify( 1/2*(-eta-1-
1/2*2^(1/2)*sin(eta1)+1/2*2^(1/2)*cos(eta1)*eta1)/(-
1/2*2^(1/2)+1/2*2^(1/2)*cos(eta1))*2^(1/2)+1/2*(sin(eta1)+cos(eta1))*((-eta-1-
1/2*2^(1/2)*sin(eta1)+1/2*2^(1/2)*cos(eta1)*eta1)/(-
1/2*2^(1/2)+1/2*2^(1/2)*cos(eta1))-eta1))*2^(1/2), 'symbolic' );
collect(%,eta);
subs(eta1=Pi/2,%);
eval(%);
evalf(subs(eta=1,0.54*%));
```

$$R := \frac{-\eta - 1 - \sqrt{2} \sin(\eta 1) + \sqrt{2} \cos(\eta 1) \eta 1 - \cos(\eta 1) \eta - \cos(\eta 1)}{-1 + \cos(\eta 1)}$$

$$\frac{(-1 - \cos(\eta 1)) \eta}{-1 + \cos(\eta 1)} + \frac{-1 - \sqrt{2} \sin(\eta 1) + \sqrt{2} \cos(\eta 1) \eta 1 - \cos(\eta 1)}{-1 + \cos(\eta 1)}$$

$$\frac{\left(-1 - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \right) \eta}{-1 + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)} + \frac{-1 - \sqrt{2} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{2}\sqrt{2} \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \pi - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)}{-1 + \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)}$$

$$\eta + 1 + \sqrt{2}$$

$$1.843675324$$

```
>evalf(sqrt(2)*0.54);
```

$$0.7636753235$$

```

>DS:=proc(Ec,Ek,Ep,etal,b,Teta)
local t,Epr,y1,y2,z1,z2,k1;
if type(evalf(Ec*Ek*Ep*etal*Teta),numeric) then
Epr:=(Ec_,Ek_,Ep_,eta)-
>Ek_*(Ep_/Ec_)^(eta/2)*(Ep_*Ec_/Ek_^2)^(eta^2/2);
y1:=t->sqrt(2)/2*(t-sin(t))-1;
y2:=t->sqrt(2)/2*(t-sin(etal)-cos(etal)*(t-etal))-1;
z1:=Teta_-
>evalf(Int((1+cos(t))/Epr(Ec,Ek,Ep,y1(t)),t=0..Teta_));
#k1:=evalf(1+sin(etal)+cos(etal)*(1-etal));
k1:=evalf(1+cos(etal));
z2:=Teta_->evalf(k1*Int(1/Epr(Ec,Ek,Ep,y2(t)),t=etal..Teta_));
#z1(Teta);z2(Teta);[%%,%,%%+%];
if evalf(Teta>=0) and evalf(Teta<=etal) then
evalf(sqrt(2)/2*b*z1(Teta))
else
evalf(sqrt(2)/2*b*(z1(etal)+z2(Teta)))
end if;
#evalf(Ek*(Ep/Ec)^(%/2)*(Ep*Ec/Ek^2)^(%^2/2))
else
'procname( args )'
end if;
end proc;
DS:=proc(Ec,Ek,Ep,η1,b,Teta)
local t,Epr,y1,y2,z1,z2,k1;
if type(evalf(Ec*Ek*Ep*η1*Teta),numeric) then
Epr:=(Ec_,Ek_,Ep_,η)→Ek_*(Ep_/Ec_)^(1/2*η)*
(Ep_*Ec_/Ek_^2)^(1/2*η^2);
y1:=t→1/2*sqrt(2)*(t-sin(t))-1;
y2:=
t→1/2*sqrt(2)*(t-sin(η1)-cos(η1)*(t-η1))-1
;
z1:=Teta_→evalf(
Int((1+cos(t))/Epr(Ec,Ek,Ep,y1(t)),t=0..Teta_))
;
k1:=evalf(1+cos(η1));
z2:=Teta_→
evalf(k1*Int(1/Epr(Ec,Ek,Ep,y2(t)),t=η1..Teta_))
;
else 'procname( args )'
if evalf(0≤Teta) and evalf(Teta≤η1) then
evalf(1/2*sqrt(2)*b*z1(Teta))
end if
else evalf(1/2*sqrt(2)*b*(z1(η1)+z2(Teta)))
end if
end proc
end if

>Ec,Ek,Ep:=2.6,0.68,0.35;Etal:=Pi/2;
Alf:=Pi/4;
DS(Ec,Ek,Ep,Pi/2,0.54,2.3);

```

Продовження додатку Б

```
evalf([Ett(Alf,Pi/2,2.3),Eit(0.54,Alf,Pi/2,2.3)]);
Ec,Ek,Ep:=2.6,0.68,0.35
```

$$H1 := \frac{\pi}{2}$$

0.7213928411

[-0.0807611847, 1.260064284]

```
>DS(Ec,Ek,Ep,Pi/2,0.54,Pi/2);
evalf([Ett(Alf,Pi/2,Pi/2),Eit(0.54,Alf,Pi/2,Pi/2)]);
0.4383060844
```

[-0.5963860470, 0.9816268583]

```
>evalf([Ett(Alf,Pi/2,Pi/2),Eit(0.54,Alf,Pi/2,Pi/2)]);
[-0.5963860470, 0.9816268583]
```

```
Epr:=(Ec_,Ek_,Ep_,eta)-
>Ek_*(Ep_/Ec_)^(eta/2)*(Ep_*Ec_/Ek_^2)^(eta^2/2);
y1:=t->sqrt(2)/2*(t-sin(t))-1;
z1:=Teta_-
>evalf(Int((1+cos(t))/Epr(Ec,Ek,Ep,y1(t)),t=0..Teta_));z1(Pi/2);
```

$$Epr := (Ec_, Ek_, Ep_, \eta) \rightarrow Ek_- \left(\frac{Ep_-}{Ec_-} \right)^{(1/2) \eta} \left(\frac{Ep_- Ec_-}{Ek_-^2} \right)^{(1/2) \eta^2}$$

$$y1 := t \rightarrow \frac{1}{2} \sqrt{2} (t - \sin(t)) - 1$$

$$z1 := Teta_- \rightarrow \text{evalf} \left(\int_0^{Teta_-} \frac{1 + \cos(t)}{Epr(Ec, Ek, Ep, y1(t))} dt \right)$$

1.147885943

```
>A1:=0.54:
[Ett(Alf,Pi/2,Pi/2),Eit(A1,Alf,Pi/2,Pi/2),Pi/2];
evalf(%);.9816268583/A1;
```

$$\left[\frac{\pi \sqrt{2}}{4} - \frac{\sqrt{2}}{2} - 1, 0.1350000000 \pi \sqrt{2} + 0.2700000000 \sqrt{2}, \frac{\pi}{2} \right]$$

[-0.5963860470, 0.9816268583, 1.570796327]

1.817827516

```
>Epr2:=(Ec,Ek,Ep,etal,t)->if type(evalf(Ec*Ek*Ep*etal*t),numeric)
then
  #y1:=x->sqrt(2)/2*(x+sin(x))-1;
  if t>=0 and evalf(t<=etal) then
    sqrt(2)/2*(t-sin(t))-1
  else
    sqrt(2)/2*(t-sin(etal)-cos(etal)*(t-etal))-1
  end if;
```

```

evalf(Ek*(Ep/Ec)^(%/2)*(Ep*Ec/Ek^2)^(%^2/2))
else
  'procname( args )'
end if;
Ek*(Ep/Ec)^(eta/2)*(Ep*Ec/Ek^2)^(eta^2/2):Epr2(Ec,Ek,Ep,Pi/2,2.2
2);
Epr2 := (Ec, Ek, Ep, η1, t) →
if type(evalf(Ec Ek Ep η1 t), numeric) then
  if 0 ≤ t and evalf(t ≤ η1) then  $\frac{1}{2}\sqrt{2}(t - \sin(t)) - 1$ 
  else  $\frac{1}{2}\sqrt{2}(t - \sin(\eta_1) - \cos(\eta_1)(t - \eta_1)) - 1$ 
  end if;
  evalf $\left(Ek\left(\frac{Ep}{Ec}\right)^{(\%1/2)}\left(\frac{Ep Ec}{Ek^2}\right)^{(\%^21/2)}\right)$ 
else 'procname( args)'
end if

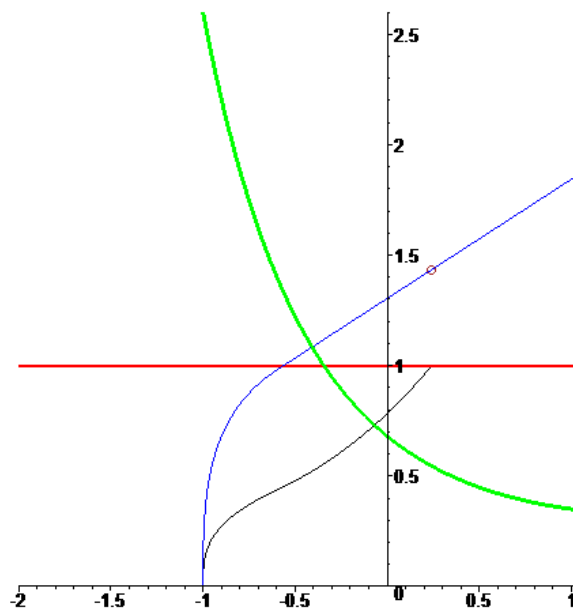
```

0.7853840343

```

>Ec,Ek,Ep:=2.6,0.68,0.35;
#Ec,Ek,Ep:=2.67,0.67,0.35;
Alf:=Pi/4-0:
/2,eta),Eit(A1,Alf,Pi/2,eta),eta=0..3*Pi/2],[Ett(Alf,Pi/2,t),DS(
,1,2,1],style=[line$4,point],symbol=circle,symbolsize=12);
evalf([Ett(Alf,Pi/2,Tk),Eit(A1,Alf,Pi/2,Tk)]);
Ec,Ek,Ep:=2.6,0.68,0.35

```



[0.237436867, 1.431891232]

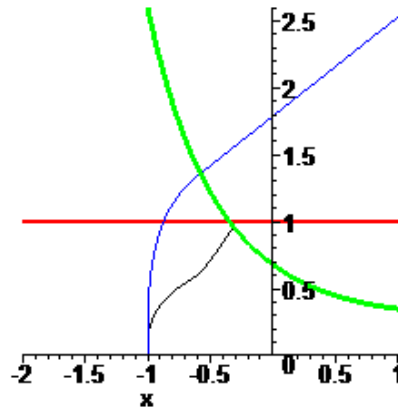
```

>Ec,Ek,Ep:=1.6,0.44,0.25;
Alf:=Pi/4-0:

```

$A1:=0.54: Tk:=2.09:$

```
plot([ [Ett(Alf, Pi/2, t), Epr2(Ec, Ek, Ep, Pi/2, t), t=0..4], [Ett(Alf, Pi/2, eta), Eit(A1, Alf, Pi/2, eta), eta=0..3*Pi/4], [Ett(Alf, Pi/2, t), DS(1.2..1.05, 0..1.7, color=[green, blue, black, red, brown], thickness=[3, 1, 1, 2, 1], style=[line$4, point], symbol=circle, symbolsize=12)], evalf([Ett(Alf, Pi/2, Tk), Eit(A1, Alf, Pi/2, Tk)])];
```



$>Ec, Ek, Ep:=2.4, 0.65, 0.35;$

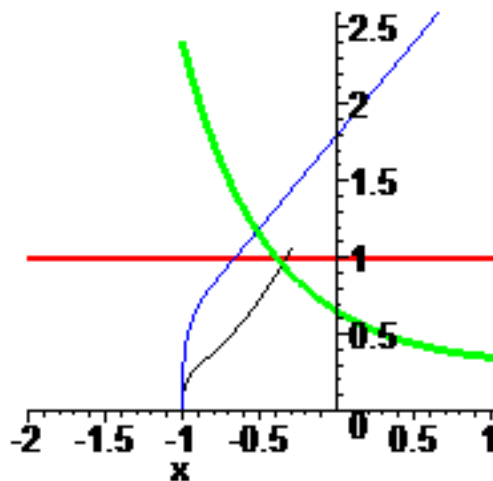
$Alf:=Pi/4-0:$

$A1:=0.54:$

$Eta1:=Pi/2-Pi/8:$

```
plot([ [Ett(Alf, Eta1, t), Epr2(Ec, Ek, Ep, Eta1, t), t=0..10], [Ett(Alf, Eta1, eta), Eit(A1, Alf, Eta1, eta), eta=0..3*Pi/2], [Ett(Alf, Eta1, t), DS(Ec, Ek, Ep, Eta1, A1, t), t=0..2.4], 1], x=-2..1.05, 0..2.6, color=[green, blue, black, red, brown], thickness=[3, 1, 1, 2, 1], style=[line]);
```

$Ec, Ek, Ep := 2.4, 0.65, 0.35$



$>Ec, Ek, Ep:=2.4, 0.65, 0.35;$

$Alf:=Pi/4-0:$

$A1:=0.54:$

$Eta1:=Pi/2+Pi/8:$

```
plot([ [Ett(Alf, Eta1, t), Epr2(Ec, Ek, Ep, Eta1, t), t=0..10], [Ett(Alf, Eta1, eta), Eit(A1, Alf, Eta1, eta), eta=0..3*Pi/2], [Ett(Alf, Eta1, t), DS(Ec, Ek, Ep, Eta1, A1, t), t=0..2.3], 1], x=-2..1.05, 0..2.6, color=[green, blue, black, red, brown], thickness=[3, 1, 1, 2, 1], style=[line]);
```

$Ec, Ek, Ep := 2.4, 0.65, 0.35$

Оцінка деформовності заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням

Апроксимація траєкторії деформування

```
>restart:
eta:=(t,a,b,c3)->`if`(type(t,extended_numeric) and
type(a,extended_numeric),evalf((b*(tan(t)-
t)+a*sqrt(1+c3)*t)/sqrt(tan(t)^2+c3*t^2)), 'procname'(args));
```

$$\eta := (t, a, b, c3) \rightarrow \text{if} \left(\begin{array}{l} \text{type}(t, \text{extended_numeric}) \text{ and } \text{type}(a, \text{extended_numeric}), \\ \text{evalf} \left(\frac{b(\tan(t) - t) + a\sqrt{1+c3}t}{\sqrt{\tan(t)^2 + c3t^2}} \right), \text{'procname'}(args) \end{array} \right)$$

Перевірки граничних умов

```
Limit((b*(tan(t)-
t)+a*sqrt(1+c3)*t)/sqrt(tan(t)^2+c3*t^2), t=0, right)=limit((b*(tan(t)-
t)+a*sqrt(1+c3)*t)/sqrt(tan(t)^2+c3*t^2), t=0, right);
Limit((b*(tan(t)-
t)+a*sqrt(1+c3)*t)/sqrt(tan(t)^2+c3*t^2), t=Pi/2, left)=limit((b*(tan(t)-
t)+a*sqrt(1+c3)*t)/sqrt(tan(t)^2+c3*t^2), t=Pi/2, left);
```

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{b(\tan(t) - t) + a\sqrt{1+c3}t}{\sqrt{\tan(t)^2 + c3t^2}} = a$$

$$\lim_{t \rightarrow \left(\frac{\pi}{2}\right)^-} \frac{b(\tan(t) - t) + a\sqrt{1+c3}t}{\sqrt{\tan(t)^2 + c3t^2}} = b$$

```
>(b*(tan(t)-t)+a*sqrt(1+c3)*t)=0;
solve(%,t);
b(tan(t)-t)+a*sqrt(1+c3)t=0
```

$$\text{RootOf}(\tan(_Z)b - _Zb + _Za\sqrt{1+c3})$$

```
>eta(0.01,1.7,-1,3);
eta(Pi/2-0.01,1.7,-1,3);
```

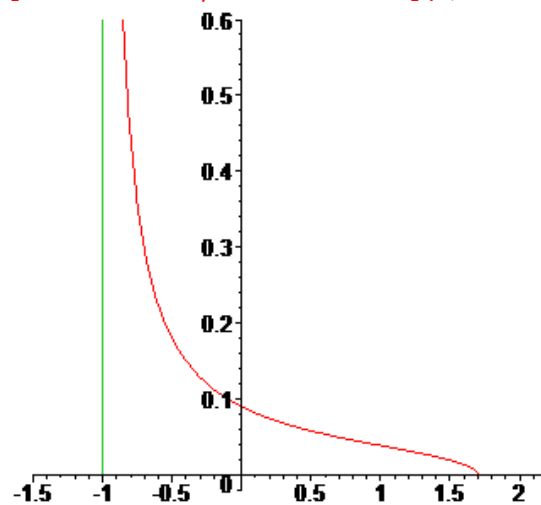
1.699969165

$$\eta\left(\frac{\pi}{2} - 0.01, 1.7, -1, 3\right)$$

```
>Eu:=(t,m)->`if`(type(t,extended_numeric) and
type(m,extended_numeric),eval(m*Int(sqrt(3+1/cos(x)^4),x=0..t)),
'procname'(args));
Eu(t,m);
```

$$Eu := (t, m) \rightarrow \text{if} \left(\begin{array}{l} \text{type}(t, \text{extended_numeric}) \text{ and } \text{type}(m, \text{extended_numeric}), \\ \text{eval} \left(m \int_0^t \sqrt{3 + \frac{1}{\cos(x)^4}} dx, \text{procname}(\text{args}) \right) \\ Eu(t, m) \end{array} \right)$$

```
plot([eta(t,1.7,-1,0.1),Eu(t,0.02),t=0..Pi/2-0.01],[-1,t,t=0..1],view=[-1.5..2.2,-0.02..0.6]);
```



Модель В. А. Огороднікова

Діаграма пластичності та шлях деформування

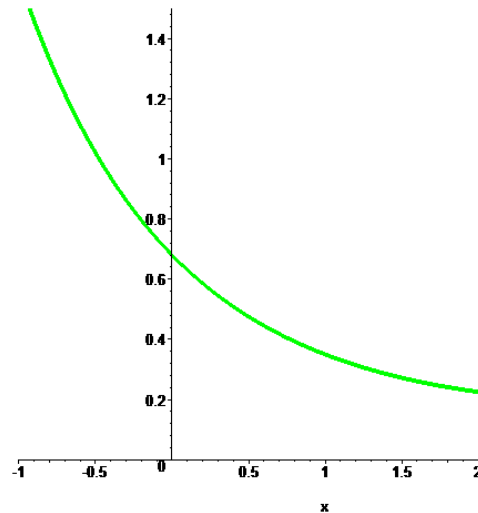
```
>restart:
#Використовуватимемо криву граничних деформацій
eta)*Ec/Ek/2+(1+eta)*Ek/Ep/2)):
E[*c]=EprZ(E[*st],E[*kp],E[*p],eta);
printf('Граничні деформації при стиску, крученні та розтязі:');
#Ec,Ek,Ep:=2.6,0.68,0.35;
Ec,Ek,Ep:=1.6,0.68,0.35;
plot([EprZ(Ec,Ek,Ep,x)],x=-1..2,0..1.5,color=[green,blue,red],thickness=[4,1],style=[line]);
EtEi1:=(Et0,Et1,E1,s,a,Om,et)-
>piecewise(et<=E1,Et0+(et/E1)^(1/s)*(Et1-Et0),Et1+a*sin(Pi*(et-E1)*Om));
```

Крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні:

$$E_{*c} = E_{\dot{\epsilon}\dot{\sigma}} \mathbf{e}^{\left(-\eta \ln \left(\frac{1}{2} \frac{(1-\eta) E_{\dot{\sigma}}}{E_{\dot{\epsilon}\dot{\sigma}}} + \frac{1}{2} \frac{(1+\eta) E_{\dot{\epsilon}\dot{\sigma}}}{E_{\dot{\sigma}}} \right) \right)}$$

Граничні деформації при стиску, крученні та розтязі:

$$Ec, Ek, Ep := 1.6, 0.68, 0.35$$



$$EtEi1 := (Et0, Et1, El, s, a, Om, et) \rightarrow \text{piecewise} \left(et \leq El, \right.$$

$$\left. Et0 + \left(\frac{et}{El} \right)^{\left(\frac{1}{s} \right)} (Et1 - Et0), Et1 + a \sin(\pi (et - El) Om) \right)$$

```
> eta := (t, a, b, c3) -> `if` (type(t, extended_numeric) and
type(a, extended_numeric), evalf( (b*(tan(t) -
t) + a*sqrt(1+c3)*t) / sqrt(tan(t)^2+c3*t^2)), 'procname'(args));
Eu := (t, m) -> `if` (type(t, extended_numeric) and
type(m, extended_numeric), eval(m*Int(sqrt(3+1/cos(x)^4), x=0..t)),
'procname'(args));
Eu(t, m);
```

$$\eta := (t, a, b, c3) \rightarrow \text{`if`} \left(\right.$$

$$\left. \text{type}(t, \text{extended_numeric}) \text{ and } \text{type}(a, \text{extended_numeric}), \right.$$

$$\left. \text{evalf} \left(\frac{b(\tan(t) - t) + a\sqrt{1+c3}t}{\sqrt{\tan(t)^2 + c3t^2}} \right), \text{'procname'}(args) \right)$$

$$Eu := (t, m) \rightarrow \text{`if`} \left(\right.$$

$$\left. \text{type}(t, \text{extended_numeric}) \text{ and } \text{type}(m, \text{extended_numeric}), \right.$$

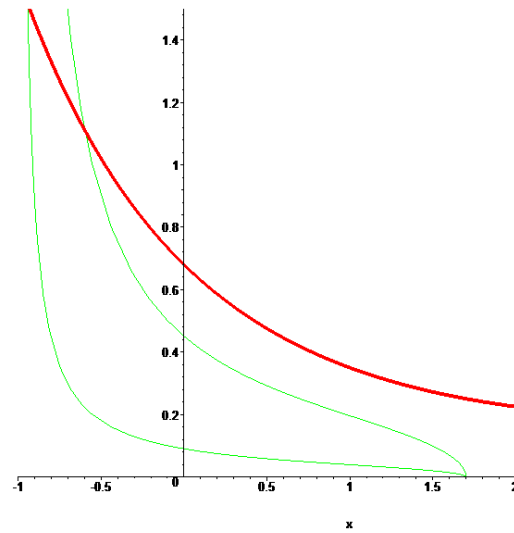
$$\left. \text{eval} \left(m \int_0^t \sqrt{3 + \frac{1}{\cos(x)^4}} dx \right), \text{'procname'}(args) \right)$$

$$Eu(t, m)$$

```
#plot([eta(t,1.7,-1,0.1),Eu(t,0.02),t=0..Pi/2-0.01],[-
1,t,t=0..1]],view=[-1.5..2.2,-0.02..0.6]);
plot([EprZ(Ec,Ek,Ep,x),[eta(t,1.7,-1,0.1),Eu(t,0.02),t=0..Pi/2-
```

Продовження додатку В

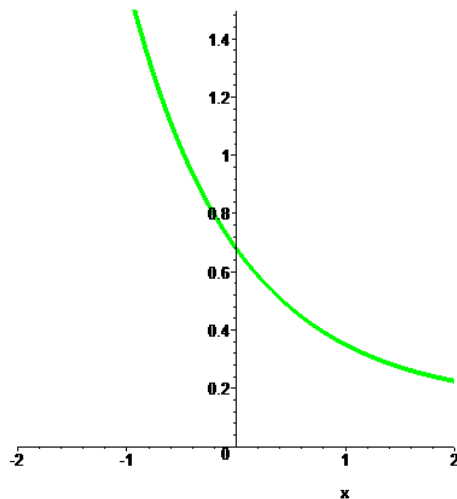
```
0.01],[eta(t,1.7,-1,0.1),Eu(t,0.1),t=0..Pi/2-0.01]],x=-
1..2,0..1.5,color=[red,green$2,blue],thickness=[4,1$2],style=[li
ne]);
```



```
>EprZ2:=(Ec,Ek,Ep,eta)-
>Ek*(Ep/Ec)^(eta/2)*(Ep*Ec/Ek^2)^(eta^2/2):
E[*c`]=EprZ2(E[`ct`],E[`kp`],E[`p`],eta);
```

$$E_{*c} = E_{\dot{e}\dot{o}} \left(\frac{E_{\dot{o}}}{E_{\dot{n}\dot{o}}} \right)^{\left(\frac{\eta}{2}\right)} \left(\frac{E_{\dot{o}} E_{\dot{n}\dot{o}}}{E_{\dot{e}\dot{o}}^2} \right)^{\left(\frac{\eta^2}{2}\right)}$$

```
plot([EprZ(Ec,Ek,Ep,x),EprZ2(Ec,Ek,Ep,x)],x=-
2..2,0..1.5,color=[green,blue,red],thickness=[4,1],style=[line])
;
```



```
>EprZ2(Ec,Ek,Ep,-2);
```

4.559332378



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
вул.Сонячна, 3, м.Вінниця, 21008, тел. (0432) 46-00-03
email: office@vsau.org, rector@vsau.org, код ЄДРПОУ 00497236

2 жовтня 2020р. № 01.1-60-1558
на № _____ від _____

ДОВІДКА

**про впровадження результатів наукових досліджень
дисертаційної роботи Колісника Миколи Анатолійовича
на тему: «Розвиток процесу штампування обкочуванням на основі
аналізу механіки формоутворення складно профільних виробів»**

Повідомляємо, що наукові розробки Колісника Миколи Анатолійовича за вказаною темою дисертації мають практичну цінність, що зумовило їх впровадження у навчально-методичний процес та наукову роботу кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки.

Положення дисертаційної роботи використовуються при викладанні окремих частин навчальних дисциплін «Теоретичні основи автоматики», «Електроніка та цифрова схемотехніка».

Довідка видана Коліснику М.А. для представлення у спеціалізовану вчену раду за місцем захисту його дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Розглянуто та затверджено на засіданні науково-методичної комісії Вінницького національного аграрного університету від 02.10.2020 р., протокол № 3.

В.о. ректора



В.А. Мазур

Вик.: Ромигайло І.Ю.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Вінницького
національного аграрного
університету



Віктор МАЗУР

«_____» 2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор
ТОВ «Агромаш-Калина»



Юрій БЕЗУГЛИЙ

«_____» 2024 р.

АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового
ступеня доктора філософії**

Колісника М.А. на тему: «Розвиток процесів штампування обкочуванням на основі аналізу механіки формоутворення складнопрофільних виробів» на ТОВ «Агромаш-Калина» (Україна, 22401, Вінницька обл., Хмельницький р-н, м. Калинівка, вулиця Незалежності 46).

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ «Агромаш-Калина» директор Безуглий Ю.М. та головний інженер Васьківнюк М.Ю., а також представники Вінницького національного аграрного університету (ВНАУ) д.т.н., проф. Михалевич В.М., к.т.н., доц. Гайдамак О.Л., к.т.н., доц. Возняк О.М., і к.т.н., асистент Штуць А.А. склали цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Колісника М.А.

Метою дисертаційної роботи Колісника М.А. є удосконалення розрахункового апарату механіки формоутворення кільцевих заготовок за комбінованими схемами, що включають операції висаджування, прямого і зворотного витискування, який дозволить на основні встановлених закономірностей і особливостей процесу штампування обкочуванням (ШО) розширити його технологічні можливості й забезпечити високу якість деталей.

Дослідження роботи довели, що ефективним процесом виробництва зазначених виробів може бути штампування обкочуванням, при якому виникають відносно невеликі сили деформування, а умови течії матеріалу в зоні контакту інструмента із заготовкою сприяють формуванню тонкостінних елементів заготовок складної форми.

У дисертаційній роботі Колісника М.А. одержано результати досліджень, теоретичних узагальнень та розробок у вирішенні проблем, які мають важливе прикладне значення, а саме: розробка комбінованих схем процесів ШО для отримання якісних складнопрофільних виробів з розвинутими тонкостінними елементами на підприємстві ТОВ «Агромаш-Калина».

Технічна документація з розвитку процесів штампування обкочуванням на основі аналізу механіки формоутворення складнопрофільних виробів прийнята на ТОВ «Агромаш-Калина» для використання в проектуванні технологічного обладнання для виготовлення складнопрофільних виробів.

Дисертаційна робота Колісника М.А. спрямована на вирішення актуальної науково-технічної проблеми розробки та впровадження нових ресурсозберігаючих технологічних процесів металообробки та підвищення на їх основі ефективності виробництва, й тому є одним із найважливіших завдань сучасного машинобудування.

Представники ВНАУ:

Науковий керівник, д.т.н., проф.

Володимир МИХАЛЕВИЧ

Доцент кафедри ЕЕЕ, к.т.н.

Олег ГАЙДАМАК

Доцент кафедри ЕЕЕ, к.т.н.

Олександр ВОЗНЯК

Асистент кафедри ЕЕЕ, к.т.н.

Андрій ШТУЦЬ

Аспірант кафедри ЕЕЕ

Микола КОЛІСНИК

Генеральний директор

Директор ТОВ «Агромаш-Калина»

Юрій БЕЗУГЛИЙ

Головний інженер ТОВ «Агромаш-Калина»

Юрій ВАСКІВНЮК



АКТ

щодо впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії Колісника Миколи Анатолійовича на тему: «Розвиток процесів штампування обкочуванням на основі аналізу механіки формоутворення складнопрофільних виробів» на ТОВ «Краснянське СП «Агромаш» (Україна, 23342, Вінницька обл., Вінницький р-н, с. Красне, вул. Данила Нечая, 2)

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ «Краснянське СП «Агромаш» генеральний директор Пономар Юрій Васильович і заступник генерального директора Пономар Микола Юрійович, а також представники Вінницького національного аграрного університету (ВНАУ) д.т.н., професор Михалевич Володимир Маркусович, к.т.н., доцент Гайдамак Олег Леонідович і асистент Штуць Андрій Анатолійович склали цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Колісника Миколи Анатолійовича.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення розрахункового апарату механіки формоутворення кільцевих заготовок за комбінованими схемами, що включають операції висаджування, прямого і зворотного витискування, який дозволить на основні встановлених закономірностей і особливостей процесу штампування обкочуванням (ШО) розширити його технологічні можливості й забезпечити високу якість деталей.

У дисертаційній роботі представлено результати досліджень, теоретичних узагальнень та розробок у вирішенні проблем, які мають важливе прикладне значення, а саме: розробка комбінованих схем процесів ШО для отримання

якісних складнопрофільних виробів з розвинутими тонкостінними елементами на підприємстві ТОВ «Краснянське СП «Агромаш».

Технічна документація з розвитку процесів штампування обкочуванням на основі аналізу механіки формоутворення складнопрофільних виробів прийнята на ТОВ «Краснянське СП «Агромаш» для використання при проектуванні технологічного обладнання для виготовлення складнопрофільних виробів.

Результати дисертаційної роботи Колісника Миколи Анатолійовича спрямовані на вирішення актуальної науково-технічної проблеми з розробки та впровадження нових ресурсозберігаючих технологічних процесів металообробки і підвищення на їх основі ефективності виробництва.

Представники ВНАУ:

Науковий керівник, д.т.н., професор кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Володимир МИХАЛЕВИЧ

К.т.н., доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Олег ГАЙДАМАК

Асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Андрій ШТУЦЬ

Аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Микола КОЛІСНИК

Представники ТОВ «Краснянське СП «Агромаш»:

Генеральний директор

Юрій ПОНОМАР

Заступник генерального директора
Микола ПОНОМАР

**АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ
НА НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ КОНФЕРЕНЦІЯХ**

за спеціальністю 132 Матеріалознавство

Колісника Миколи Анатолійовича

№ п/п	Тема доповіді	Назва конференції, місце проведення, дата.
Апробація результатів дисертації на науково-практичних конференціях		
1.	Дослідження напружено-деформованого стану складно профільних заготовок після штампування обкочуванням	Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК». м. Вінниця. 28-30 листопада 2017 р
2.	Дослідження енергозберігаючих технологій обробки металів тиском за допомогою індукційного нагріву	IV Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва». м. Тернопіль. 30 листопада 2017 р.
3.	Дослідження стану матеріалу при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням	Міжнародна науково-практична конференція «Молодь і технічний прогрес в АПК». м. Харків. 4 квітня 2019 р.
4.	Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом штампування обкочуванням	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інженерно-технологічне забезпечення аграрного сектору економіки: сучасний стан, проблеми та перспективи». м. Вінниця. 21-22 жовтня 2020 р.
5.	Експериментальна оцінка деформовності матеріалу заготовок, виготовлених методом штампування обкочуванням в умовах реалізації промислової стратегії ЄС	Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи інноваційної діяльності в агропромисловій інженерії». м. Вінниця. 19-20 листопада 2020 р.
6.	Підвищення характеристик поверхневого шару деталей шляхом застосування пластичного деформування і холодного газодинамічного напилення	Всеукраїнська науково-практична конференція «Реалізація європейського зеленого курсу в Україні: погляд молодих учених». м. Вінниця. 14-15 травня 2021 р.
7.	Розробка процесу формування широких фланців на листових заготовках методом штампування обкочуванням	II Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту-2021». м. Вінниця. 13 – 15 травня 2021 р.
8.	Спосіб моделювання траєкторії деформацій при штампуванні обкочуванням	Міжнародна науково-методична інтернет - конференція «Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності». м. Вінниця. 11-12 жовтня 2022 р.

Продовження додатку Є

9.	Розвиток процесу штампування обкочуванням на основі аналізу механіки формоутворення складнопрофільних виробів формуючим електроприводом	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії у контексті євроінтеграції». м. Вінниця. 19-20 жовтня 2023 р.
10.	Співставлення емпіричного критерія руйнування з теорією підсумовування пошкоджень	IV Міжнародна науково-методична інтернет - конференція «Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності». м. Вінниця. 20-22 червня 2024 р.
11.	Дослідження моделей еквівалентної пластичної деформації з позицій теорії підсумовування пошкоджень	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті глобальних викликів». м. Вінниця. 17-18 жовтня 2024 р.

Аспірант



Микола КОЛІСНИК

Вчений секретар



Тетяна КОРΠΑНЮК

М.П.

« 17 » березня

2025 р.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
за спеціальністю 132 Матеріалознавство
Колісника Миколи Анатолійовича

№ З/п	Назва праці	Назва видання та його Вихідні відомості, що дозволяють ідентифікувати та відрізнити це видання від усіх інших	Кількість друкованих сторінок/др . Арк.	Прізвища Співавторів
1	2	3	4	5
Статті у виданнях що цитуються у міжнародній наукометричній базі Scopus				
1	Improvement of stamping by rolling processes of pipe and cylindrical blades on experimental research	<i>Key Engineering Materials</i> . 2020. Vol. 844. URL: https://www.scientific.net/KEYM.844.168 DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEYM.844.168	P. 168-181 <i>1,023</i> (0,17)	Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P.
2	Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation.	<i>Periodica Polytechnica Mechanical Engineering</i> . 2022. № 66(1). URL: https://pp.bme.hu/me/article/view/18659 DOI: https://doi.org/10.3311/PPme.18659	P. 51–58. <i>1,1</i> (0,22)	Matvijchuk V. Shtuts A. Kolisnyk M. Kupchuk I. Derevenko I.
3	Study of the Stress-Strain State of the Material of the Blanks during Plastic Stamping by Rolling.	<i>Metallophysics and Advanced Technologies</i> . 2025. vol. 47, No. 1. URL: https://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v47/i01/0057.html DOI: https://doi.org/10.15407/mfint.47.01.0057	P. 57-81 <i>1,35</i> (0,45)	Mykhalevych V.M., Kolisnyk M.A. Shtuts A.A.
Статті у фахових виданнях України				
4	Дослідження напружено-деформовного стану матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням.	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК</i> . 2018. № 3 (102). URL: http://tetapk.vsau.org/uk/particles/doslidzhennya-napruzhenodeformovnogo-stanu-materialuzagotovok-pri-pryamomu-vitiskuvanni-metodom-shtampuvannya-obkochuvannyam	C. 77-84 <i>0,81</i> (0,26)	Матвійчук В.А Колісник М.А Штуць А.А.

Продовження додатку Ж

1	2	3	4	5
5	Розробка і дослідження процесів штампування обкочуванням складно профільних заготовок	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2018. № 4(103). URL: http://tetapk.vsau.org/uk/articles/rozrobka-i-doslidzhennya-procesiv-shtampuvannya-obkochuvannyam-skladno-profil-nih-zagotovok	С. 56-63 0,93 (0,31)	Матвійчук В.А., Колісник М.А Любін М.В.
6	Дослідження методики розрахунку і вибору технологічних параметрів штампування обкочуванням складнопрофільних виробів з використання комп'ютерного моделювання	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2020. № 2 (108). URL: http://tetapk.vsau.org/uk/articles/doslidzhennya-metodiki-rozrahunku-i-viboru-tehnologichnih-parametriv-shtampuannya-obkochuvannyam-skladnoprofil-nih-virobiv-z-vikoristannya-komp-yuternogo-modelyuvannya DOI: 10.37128/2520-6168-2020-1-14	С. 123-133 0,8 (0,78)	Колісник М.А Служалюк М.О
7	Підвищення службових характеристик поверхневого шару деталей шляхом застосування поверхневого пластичного деформування і газодинамічного наплення	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> 2020. № 2(97) URL: http://vibrojournal.vsau.org/uk/particles/pidvishennya-sluzhbovih-harakteristik-poverhnevogo-sharu-detalej-shlyahom-zastosuvannya-poverhnevogo-plastichnogo-deformuvannya-i-holodnogo-gazodinamichnogo-napilennya DOI: 10.37128/2306-8744-2020-2-10	С. 90-100 0,85 (0,28)	Матвійчук В.А Гайдамак О.Л Колісник М.А

Продовження додатку Ж

1	2	3	4	5
8	Development of the combined technological process of blank stacks flanges formation by the method of stamping by rolling and rotary drawing.	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> 2021. № 1(100) URL: http://vibrojournal.vsau.org/uk/particles/rozrobka-kombinovanogo-tehnologichnogo-procesu-formuvannya-flanciv-na-listovih-zagotovkah-metodom-shtampuvannya-obkochuvannyam-i-rotacijnoyu-vityazhkoyu DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-11	P. 111-121 <i>0,66</i> <i>(0,33)</i>	Matviychuk V Kolisnyk M.
9	Розробка технологічного процесу формування широких фланців на листових заготовках методом штампування обкочуванням	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2021. № 1(112) URL: http://tetapk.vsau.org/uk/particles/rozrobka-tehnologichnogo-procesu-formuvannya-shirokih-flanciv-na-listovih-zagotovkah-metodom-shtampuvannya-obkochuvannyam DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-5	C. 38-45 <i>0,49</i> <i>(0,245)</i>	Матвійчук В.А Колісник М.А
10	Формування якісних показників виробів процесами штампування обкочуванням	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2021. № 4 (115). URL: http://tetapk.vsau.org/en/particles/formation-of-qualitative-indicators-of-products-by-rolling-stamping-processes DOI: 10.37128/2520-6168-2021-4-8	C. 75-83 <i>0,72</i> <i>(0,36)</i>	Матвійчук В.А Колісник М.А
11	Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом штампування обкочуванням.	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> 2022. № 1 (104). URL: http://vibrojournal.vsau.org/en/particles/evaluation-of-deformability-of-material-of-preparations-in-direct-and-reverse-extraction-by-rolling-stamping-method DOI: 10.37128/2306-8744-2022-1-10	C. 81-91 <i>0,71</i> <i>(0,24)</i>	Матвійчук В.А Михалевич В.М Колісник М.А

Продовження додатку Ж

1	2	3	4	5
12	Оцінка деформовності матеріалу при висаджуванні елементів заготовок методом штампування обкочуванням.	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2022. № 2(117). URL: http://tetapk.vsau.org/en/particles/evaluation-of-deformability-of-material-during-planting-of-elements-of-preparations-by-rolling-stamping-method DOI: 10.37128/2520-6168-2022-2-11	С. 104-114 1,24 (0,41)	Михалевич В.М Матвійчук В.А. Колісник М.А
13	Побудова кривих граничних деформацій матеріалів.	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> 2022. № 2 (105). URL: http://vibrojournal.vsau.org/en/particles/construction-of-curved-limit-deformations-of-materials DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-9	С. 84-90 0,9 (0,3)	Матвійчук В.А. Колісник М.А Штуць А.А.
14	Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому видавлюванні методом штампування обкочуванням	<i>Обробка матеріалів тиском.</i> 2022. № 1 (51). URL: http://omd.dgma.donetsk.ua/index.php/main/issue/view/8 DOI: https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)87	С. 87-97 1,21 (0,41)	Михалевич В.М. Матвійчук В.А. Колісник М.А
15	Дослідження процесів штампування обкочуванням за рахунок аналізу моделювання деформовності матеріалу заготовок	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2023. № 3 (122). URL: http://tetapk.vsau.org/en/particles/investigation-of-stamping-by-wrapping-processes-through-material-deformation-modeling-analysis DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-3	С. 22-34. 1,47 (0,5)	Михалевич В.М Штуць А.А., Колісник М.А

Продовження додатку Ж

1	2	3	4	5
16	Оцінка деформаційної стійкості матеріалу заготовок під час прямого витискування за допомогою методу штампування	<i>Вібрації в техніці та технологіях</i> . 2023. № 4 (111). URL: http://vibrojournal.vsau.org/uk/particles/ocinka-deformacijnoyi-stijkosti-materialu-zagotovok-pid-chas-pryamogo-vitiskuvannya-za-dopomogoyu-metodu-shtampuvannya-obkochuvannyam DOI: 10.37128/2306-8744-2023-4-8	С. 54-67. <i>1,21</i> (0,4)	Ярошенко Л.В. Колісник М.А. Штуць А.А. Присяжнюк Ю.С.
17	Дослідження технологічних процесів штампування деталей типу фланець на основі застосування способів комбінованого видавлювання	<i>Вібрації в техніці та технологіях</i> . 2024. № 3 (114). URL: http://vibrojournal.vsau.org/en/particles/study-of-technological-processes-of-stamping-of-flange-type-parts-based-on-the-application-of-combined-expression-methods DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-6	С. 46-57. <i>1,13</i> (0,38)	Михалевич В.М Штуць А.А., Колісник М.А
18	Лінійні та нелінійні моделі в теорії підсумовування пошкоджень	<i>Обробка матеріалів тиском</i> . 2024. № 1 (53). URL: http://omd.dgma.donetsk.ua/index.php/main/issue/view/10 DOI: https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)100	С. 100-108 <i>0,86</i> (0,215)	Михалевич В.М., Добранюк Ю.В., Тютюнник О.І., Колісник М.А.
Статті у фахових виданнях інших держав				
19	Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation	<i>MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture</i> . 2018. Vol. 20. № 1. URL: http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/16504.pdf	Р. 19-25 <i>1,07</i> (0,364)	Shtuts A., Kolisnyk M., Yavdyk V.

Продовження додатку Ж

1	2	3	4	5
20	Development of the technological process of forming rings from sheet samples by stamping rollers and rotary hood.	<i>Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences.</i> 2021. Vol. 14 (63), №2. URL: https://webbut.unitbv.ro/index.php/Series_I/article/view/1059/95 DOI: https://doi.org/10.31926/but.ens.2021.14.63.2.1	P. 1-13 1,17 (0,29)	Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M.
21	Experimental evaluation stress-strain state for billets during rolling stamping by rollers	<i>Colloquium-journal.</i> 2021. № 16 (103). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/experimental-evaluation-stress-strain-state-for-billets-during-rolling-stamping-by-rollers/viewer DOI:10.24412/2520-6990-2021-16103-40-48	P. 40-48 0,75 (0,15)	Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M., Didyk A.
22	Study of the influence of technological parameters on the mechanics of shaping of billets using roll stamping processes	<i>Agricultural engineering.</i> 2022. Vol. 54 URL: https://www.vdu.lt/cris/entities/publication/b60e7cff-7f2e-494d-8984-08031773aae4/details DOI: 10.15544/ageng.2022.54.7	P. 62-72. 1,1 (0,55)	Shtuts A., Kolisnyk M.
Свідectво про реєстрацію авторського права на твір				
23	Конструктивна схема обкочувального інструментального блоку з конічним валком для виготовлення заготовок методом штампування обкочуванням	Свідectво про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Конструктивна схема обкочувального інструментального блоку з конічним валком для виготовлення заготовок методом штампування обкочуванням». № 127208. від 10.06.2024; заяв. № cr0677100624. Від 31.07.2024 р. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1811564/		Полевода Ю.А., Колісник М.А., Штуць А.А., Михалевич В.М.

Продовження додатку Ж

1	2	3	4	5
Інші видання (тези доповідей)				
24	Дослідження напружено-деформованого стану складно профільних заготовок після штампування обкочуванням	Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК: Всеукраїнська науково-технічна конференція, 28-30 листопада 2017 року. Вінниця, 2017. URL: https://fex.net/ru/s/f47k0vb	С. 218-219 0,11 (0,11)	Колісник М. А.
25	Дослідження енергозберігаючих технологій обробки металів тиском за допомогою індукційного нагріву	Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва: IV Міжнародна науково-практична конференція, 30 листопада 2017 року. Тернопіль, 2017. URL: https://chmnu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/03/Lazarveva-Rozvitok-innovatsijnih-orientiriv-u-zemlekoristuvanni.pdf	С. 321-323 0,17 (0,085)	Колісник М. А.
26	Дослідження стану матеріалу при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням	Молодь і технічний прогрес в АПК: Міжнародна науково-практична конференція, 4 квітня 2019 року. Харків, 2019. URL: http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/20998.pdf	С. 17-18 0,2325 (0,2)	Колісник М. А.
27	Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому і зворотному витискуванні методом штампування обкочуванням	Теоретичні та прикладні задачі обробки металів тиском і автотехнічних експертиз: II Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту-2021», 13 – 15 травня 2021. Вінниця, ВНТУ, 2021. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/34273	С. 102-105 0,15 (0,05)	Колісник М. А.

Продовження додатку Ж

1	2	3	4	5
28	Розробка процесу формування широких фланців на листових заготовках методом штампування обкочуванням	Теоретичні та прикладні задачі обробки металів тиском і автотехнічних експертиз: II Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту-2021», 13 – 15 травня 2021. Вінниця, ВНТУ, 2021. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/36753	С. 213-214 0,1 (0,05)	Колісник М. А.
29	Спосіб моделювання траєкторії деформацій при штампуванні обкочуванням	Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності. Міжнародна науково-методичної Інтернет-конференція. 11-12 жовтня 2022 р. Вінниця, ВНТУ, 2022. URL: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/pmovc/pmovc-2022_netpub.pdf	С. 82-86 0,1 (0,1)	Колісник М. А.
30	Співставлення емпіричного критерія руйнування з теорією підсумовування пошкоджень	Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності. IV Міжнародна науково-методична інтернет-конференція, 20-22 червня 2024 р. URL: https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/837/1460/2734-1	С. 73-75. 0,14 (0,14)	Колісник М. А.

За темою дисертаційної роботи опубліковано 30 наукових праць. Основні положення дисертації пройшли апробацію на 7 науково-практичних Міжнародних конференціях та опубліковані в 23 наукових працях з яких: 4 у фахових виданнях інших держав та 3 у наукових журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science Core Collection; 15 - у наукових фахових виданнях України; 1 - свідоцтво про авторське право на твір загальним обсягом 22.55 умовн. др. арк. (власний доробок автора 8,349 умовн. др. арк.).

Аспірант

Микола КОЛІСНИК



Тетяна КОРПАНЮК

2025 р.