

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СИВАК РОМАН ІВАНОВИЧ

УДК 621.73.011.001.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ МЕХАНІКИ НЕМОНОТОННОГО
ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ**

05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

_____ Р. І. Сивак

Науковий консультант Огородніков Віталій Антонович
заслужений діяч науки і техніки України
доктор технічних наук, професор

Вінниця - 2018

АНОТАЦІЯ

Сивак Р. І. Розвиток наукових основ механіки немонотонного пластичного деформування та удосконалення технологічних процесів обробки металів тиском. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 процеси та машини обробки тиском. – Вінницький національний технічний університет, Міністерство освіти і науки України, Вінниця, 2018.

Дисертація спрямована на розв'язок важливої науково-технічної проблеми підвищення ефективності процесів обробки металів тиском на базі розвитку наукових основ механіки немонотонного пластичного деформування.

В дисертаційній роботі розвинена модель анізотропно зміцнюваного тіла Деля-Бакхауза і розроблено на цій основі розрахунковий апарат, який дозволяє виконувати розрахунки компонент девіатора напружень з урахуванням ефекту Баушингера і спадкового впливу історії навантаження для процесів з поетапними комбінованими способами формозмінення заготовок, що супроводжуються немонотонною пластичною деформацією. Запропонований математичний апарат включає в себе експериментально-розрахунковий метод визначення компонент тензора швидкостей деформацій методом ділільних сіток з використанням поточних ейлерових і початкових лагранжевих координат, а також методику проведення експериментальних досліджень для визначення емпіричних функцій і параметрів, що входять в теоретичні співвідношення.

Отримав подальший розвиток метод оцінки використаного ресурсу пластичності, що дозволяє прогнозувати граничне формозмінення заготовок в процесах немонотонного пластичного деформування. Запропоновано тензорну модель процесу накопичення пошкоджень, яка включає в підінтегральну функцію компоненти направляючого тензора прирощень деформацій виражені

через параметр Надаї-Лоде і таким чином відображає вплив третього інваріанта тензора напружень на пластичність.

Розроблено метод для оцінки величини використаного ресурсу пластичності при немонотонному навантаженні, в якому для описання векторних властивостей процесу накопичення пошкоджень використана тензорна модель, а скалярні властивості пластичності описані поверхнею граничної пластичності і кривою течії металу.

Виконані експериментальні дослідження впливу кута злому траєкторії навантаження і ступеня деформації перед зломом на величину граничної деформації.

Досліджено вплив геометричних характеристик траєкторії навантаження на пластичність в умовах немонотонного навантаження, обумовленого зломом цієї траєкторії в просторі деформацій.

Отримав подальший розвиток підхід О. А. Іллюшина, який дозволяє враховувати вплив траєкторій деформацій великої кривизни в межах довжини сліду запізнення на величину компонент девіатора напружень в умовах складного навантаження. Феноменологічним шляхом отримані коефіцієнти функціоналів рівняння, що враховує вплив відхилення вектору напружень від вектору деформацій на модуль вектора напружень. В результаті одержана розрахункова формула для визначення компонент девіатора напружень у випадках складного навантаження по різним кривизнам траєкторій деформацій, які охоплюють практично всі задачі обробки металів тиском.

Для підвищення точності визначення величини використаного ресурсу пластичності в процесах холодного об'ємного штампування запропоновані деформаційні критерії для оцінки граничного формозмінення при пластичній деформації металів в умовах об'ємного напруженого стану.

Запропоновано методика оцінки впливу неоднорідності розподілу пластичних деформацій на пластичність металу з врахуванням комплексного впливу схеми напруженого стану і градієнта ступеню пластичної деформації. Оскільки прирощення ступеню пластичної деформації залежить як від

градієнта ступеню пластичної деформації, так і від схеми напруженого стану, то для кількісної оцінки впливу градієнта ступеню деформації на величину використаного ресурсу пластичності, запропоновано використовувати поверхню граничних деформацій в просторі безрозмірних показників напруженого стану і градієнту ступеню пластичної деформації.

Виконані експериментальні і теоретичні дослідження процесу холодного комбінованого радіального видавлювання з подальшою осадкою для отримання деталей з фланцем. Використовуючи запропонований розрахунковий апарат встановлені області з вичерпанням ресурсу пластичності. При розрахунку використаного ресурсу пластичності напружений стан визначено з урахуванням впливу ефекту Баушингера і спадкового впливу історії навантаження. Компоненти тензора швидкостей деформацій визначені по викривленню ділильної сітки з використанням змішаних лагранжевих і ейлерових координат. При розрахунках використаного ресурсу пластичності залежність пластичності від схеми напруженого стану задавали поверхнею граничних деформацій, а історію навантаження траєкторіями в координатах безрозмірних показників напруженого стану і накопиченої деформації, що дозволило врахувати вплив об'ємності схеми напруженого стану.

Виконані дослідження пластичності металу при немонотонному навантаженні, яке має місце при послідовних операціях пластичного формозмінення. При цьому для оцінки деформовності використана тензорна модель процесу накопичення пошкоджень, а при дослідженні напружено-деформованого стану були враховані особливості механіки немонотонної пластичної деформації.

Проведено дослідження процесу радіального видавлювання з протитиском. При оцінці деформовності заготовок при радіальному видавлюванні з протитиском використано простір безрозмірних показників напруженого стану η і χ та накопиченої деформації ϵ_u .

Розроблені технологічні рекомендації, що забезпечують величину використаного ресурсу пластичності поверхневого шару металу при

поверхневій пластичній деформації. Запропоновані схеми немонотонного навантаження, що дозволяють збільшити ступінь зміцнення поверхневого шару металу при прийнятних значеннях величини використаного ресурсу пластичності.

Досліджено процес вібраційної обробки поверхневого шару проволочи сталевими загартованими кульками, який дозволяє отримати необхідне зміцнення цього шару при мінімальному використанні запасу пластичності для випадку, коли радіуси кульок набагато менші радіуса проволочи. Виконана оцінка використаного ресурсу при реалізації пластичної деформації металу поверхневого шару з багатократними розвантаженнями. Для отримання прийняттого значення величини використаного ресурсу пластичності підібрані раціональні режими процесу вібраційно-відцентрової зміцнювальної обробки поверхневого шару проволочи.

Виконано аналіз напружено-деформованого стану в осередку деформації і вплив різних способів обкочування на використаний ресурс пластичності в поверхневому шарі металу з врахуванням немонотонності навантаження при обкочуванні циліндричної поверхні.

Проведено дослідження впливу низькочастотних акустичних полів на механічні характеристики проволочи із сталі 60X. Отримані експериментальні залежності міцності і пластичності сталі 60X від часу опромінення зразків акустичною хвилею.

Виконані дослідження пластичності деформованого металу. При визначенні величини використаного ресурсу пластичності використана тензорна модель процесу накопичення пошкоджень, яка полягає в залежності пластичності від схеми напруженого стану, що описується поверхнею граничних деформацій, історії деформування і направляючого тензора прирощень пластичних деформацій. Проведені експериментальні дослідження залишкової пластичності металу попередньо деформованих зразків.

Підібрані раціональні режими і параметри для реалізації процесу ротаційної витяжки на станку з ЧПК на основі оцінки впливу параметрів

формозмінюючих операцій листового штампування на пластичність і стійкість процесу витяжки листових заготовок при виготовленні осесиметричних деталей. При цьому для забезпечення якості готових виробів розроблені спеціальні керуючі програми, за допомогою яких деформуючий інструмент рухається по певним траєкторіям, що дозволяє запобігти руйнуванню і втраті стійкості заготовки в процесі пластичного деформування.

Виконано оцінку напружено-деформованого стану і оцінку деформовності заготовок в процесах об'ємного формоутворення. Для зниження нерівномірності деформації і забезпечення якості та експлуатаційної надійності виробу типу «стакан» пропонується використати можливості немонотонної пластичної деформації шляхом проведення видавлювання в два етапи. На першому етапі здійснити одночасно зворотне видавлювання стінки стакана та пряме видавлювання з утворенням технологічного відростку, а на другому етапі за допомогою протипуансона витіснити метал з технологічного відростку. На основі аналізу отриманих результатів розрахунку напружень при дослідженні процесу виготовлення пустотілих виробів типу «стакан» з використанням моделі анізотропно зміцнюваного тіла Деля-Бакхауза підтверджена достовірність запропонованого розрахункового апарату.

Проведено дослідження процесу виготовлення деталей з фланцем попередньо редукованої заготовки. На основі експериментальних і теоретичних досліджень обґрунтовано технологію виготовлення деталей з фланцем використовуючи попереднє редукування. За допомогою запропонованого розрахункового апарату здійснена оцінка деформовності заготовки в процесі послідовної безперервної пластичної обробки, яка полягає у попередньому редукуванні і подальшому радіальному видавлюванні заготовки.

Ключові слова: процеси холодного об'ємного штампування, деформовність, немонотонна пластична деформація, складне навантаження, анізотропія механічних властивостей, кривизна траєкторій деформацій, тензорна модель процесу накопичення пошкоджень, використаний ресурс пластичності, траєкторія навантаження, технологічна спадковість.

ABSTRACT

Sivak R. I. The development of scientific foundations of the mechanics of non-monotonic plastic deformation and the improvement of technological processes of metal forming. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technical Science in the Specialty 05.03.05 – Processes and Machines of Plastic Working. – Vinnitsa National Technical University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnitsa, 2018.

In the dissertation the developed model of anisotropically strengthened Delia-Bacchus body is developed and on this basis a calculating apparatus is developed that allows to make calculations of components of stress deviator taking into account the Bauschinger effect and hereditary influence of load history for processes with step-by-step combined methods of form-modification of blanks accompanied by nonmonotonic plastic deformation. The proposed mathematical apparatus includes the experimental calculation method for determining the components of the strain rate tensor by dividing grid using the current and initial Lagrangian coordinates, as well as the methodology for conducting experimental studies to determine the empirical functions and parameters included in the theoretical relations.

The method of evaluation of the used plasticity resource has been further developed, which allows to predict the limiting form-modification of blanks in the processes of nonmonotonic plastic deformation. The tensor model of the damage accumulation process is proposed, which includes the components of the directional tensor of deformation increments in the integral function, expressed in terms of the Nadai-Lode parameter, and thus reflects the influence of the third invariant of the stress tensor on plasticity.

A method was developed for estimating the value of the used plasticity resource under nonmonotonic loading, in which a tensor model was used to describe the vector properties of the accumulation process and the scalar properties of

plasticity were described by the surface of the boundary plasticity and the curve of the metal.

The experimental investigations of the influence of the angle of the breaking trajectory of the load and the degree of deformation before breaking on the magnitude of the limiting deformation have been carried out.

The influence of geometrical characteristics of the loading trajectory on plasticity under conditions of nonmonotonic loading due to breaking of this trajectory in the deformation space is investigated.

The further development of Illyushin's approach, which allows taking into account the influence of trajectories of deformations of large curvature within the length of the trace of delay on the magnitude of the components of the deviant stress in conditions of complex loading, has been developed. Phenomenologically, the coefficients of the functionals of the equation are obtained, which takes into account the effect of the deviation of the voltage vector from the deformation vector on the voltage vector module. As a result, a calculation formula was obtained for determining the components of the stress deviator in cases of complex loading under different curvatures of deformation trajectories, which cover almost all problems of metal processing by pressure.

To increase the accuracy of determining the value of the used plasticity resource in the processes of cold bulk stamping, deformation criteria are proposed for the evaluation of the boundary form change during plastic deformation of metals under conditions of a volumetric stressed state.

The method of estimating the influence of the heterogeneity of the distribution of plastic deformations on the plasticity of the metal with the consideration of the complex influence of the stress-state circuit and the gradient of the degree of plastic deformation is proposed. Since the increment of the degree of plastic deformation depends on the gradient of the degree of plastic deformation and on the stress state diagram, for the quantitative assessment of the gradient's impact on the degree of deformation on the value of the used plasticity resource, it is proposed to use the

surface of the boundary deformations in the space of dimensionless indices of the stress state and gradient of the degree of plastic deformation.

Experimental and theoretical studies of the process of cold combined radial extrusion with subsequent precipitation to obtain parts with a flange have been performed. Using the proposed calculating apparatus, installed areas with the expiration of the resource of plasticity. In calculating the used resource of plasticity, the stress state is determined taking into account the influence of the Bauschinger effect and the hereditary influence of the load history. The components of the strain rate tensor are determined by distorting the dividing grid using mixed Lagrang and Euler coordinates. In calculations of the used plasticity resource, the dependence of plasticity on the stress-state scheme was determined by the surface of the boundary deformations, and the history of loading by the trajectories in the coordinates of the dimensionless indicators of the stress state and accumulated deformation, which allowed taking into account the effect of the volume of the stress-state circuit.

Performed studies of metal ductility under nonmonotonic loading, which occurs during successive operations of plastic molding. In this case, for the evaluation of deformability, the tensor model of the accumulation of damage was used, and in the study of the stress-strain state, the features of the nonmonotonic plastic deformation mechanics were taken into account.

The research of the radial extrusion with the counterweight is carried out. When evaluating the deformability of the workpieces in the radial extrusion with the counterweight, the space of dimensionless indices of the stressed state η , χ and the accumulated deviation of e_u is used.

The technological recommendations, which provide the value of the used resource of plasticity of the surface layer of metal under the surface plastic deformation, are developed. The schemes of non-monotonic loading are proposed, which allow to increase the degree of strengthening of the surface layer of metal at acceptable values of the value of the used plasticity resource.

The process of vibration processing of the surface layer of the wire by steel tempered balls is investigated, which allows obtaining the necessary strengthening of

this layer with minimal use of the plasticity stock for the case when the radii of the balls are much smaller than the radius of the wire. The estimation of the used resource is realized at realization of plastic deformation of a metal of a surface layer with repeated discharges. To obtain an acceptable value of the value of the used plasticity resource, rational modes of the vibration-centrifugal hardening process of the surface layer of the wire are selected.

The analysis of the stress-strain state in the deformation cell and the influence of different methods of peeling on the used plasticity resource in the surface layer of the metal are taken into account, taking into account the nonmonotonicity of the load during the application of the cylindrical surface.

The research of influence of low-frequency acoustic fields on the mechanical characteristics of wire from 60X steel is carried out. Experimental dependences of strength and plasticity of steel 60X from time of irradiation of samples by an acoustic wave are obtained.

The researches of plasticity of deformed metal are executed. In determining the value of the used plasticity resource, the tensor model of the accumulation of damage is used, which consists in the dependence of the plasticity on the stress state scheme, which is described by the surface of the limiting deformations, the deformation history, and the directional tensor of the increments of plastic deformations. Experimental studies of residual plasticity of metal of pre-deformed samples have been carried out.

Selected rational regimes and parameters for the implementation of the rotational drawing on a CNC machine on the basis of evaluation of the influence of the parameters of molding operations of sheet stamping on the plasticity and stability of the process of extracting sheet blanks in the production of axisymmetric parts. At the same time to ensure the quality of finished products developed special control programs, with which the deforming tool moves on certain trajectories, which prevents the destruction and loss of stability of the workpiece during the process of plastic deformation.

The evaluation of the stress-strain state and the evaluation of the deformability of the workpieces in the processes of volumetric formation are performed. In order to reduce the unevenness of the deformation and ensure the quality and operational reliability of the product of the "glass" type, it is proposed to use the possibilities of nonmonotonic plastic deformation by means of extruding in two stages. At the first stage, simultaneously, the reciprocal extrusion of the glass wall and direct extrusion with the formation of a technological process, and at the second stage with the help of a proppants to push out the metal from the technological process, should be carried out simultaneously. On the basis of the analysis of the obtained results of stress calculations in the process of manufacturing hollow products of the "glass" type using the model of anisotropically strengthened Delay-Bacchus body, the reliability of the proposed calculation apparatus was confirmed.

The study of the process of manufacturing parts with the flange of pre-reduced workpiece has been carried out. On the basis of experimental and theoretical studies, the technology of manufacturing parts with a flange is substantiated by using the previous reduction. With the help of the proposed calculating apparatus, an estimation of the preform deformity in the process of continuous continuous plastic processing, which consists in preliminary reduction and subsequent radial extrusion of the workpiece.

Keywords: cold forming processes, deformability, non-monotonous plastic deformation, complex loading, anisotropy of mechanical properties, curvature of deformation trajectories, tensor model of damage accumulation process, used plasticity resource, loading trajectory, technological heredity.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. И. С. Афтаназив, П. С. Берник, Р. И. Сивак, и А. Д. Клименко, *Вибрационно-центробежная упрочняющая обработка деталей машин*. Винница, Украина: ВГАУ, 2002.
2. В. Г. Писаренко, П. С. Берник, та Р. І. Сивак, *Технологічні методи підвищення надійності деталей машин*. Вінниця, Україна: Едельвейс і К, 2008.
3. Р. І. Сивак, та В. А. Огородніков, *Холодне комбіноване видавлювання*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011.
4. В. А. Огородников, А. В. Грушко, Н. В. Бабак, и Р. И. Сивак, «Прогнозирование технологического наследия в современных технологиях обработки давлением», *Проблемы создания новых машин и технологий*, Выпуск 1 (10), с. 370-375, 2001.
5. І. О. Сивак, М. В. Бабак, Р. І. Сивак, та Г. О. Лебедева, «Визначення компонент тензора напружень з урахуванням ефектів запізнення», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії*, с. 151-154, 2001.
6. І. О. Сивак, І. А. Гоцуляк, Р. И. Сивак, и А. Л. Мазуренко, «Применение промежуточных отжигов для повышения несущей способности деталей, получаемых обработкой давлением», *Захист металургійних машин від поломок*, Випуск №6, с. 194-197, 2002.
7. Р. И. Сивак, «Поверхность предельных деформаций материала основы для пористого спеченного материала на основе меди», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 205-208, 2002.
8. R. I. Sivak, "Evaluation of porous material plasticity when direct extruded", *Stiinta si ingineria materialelor*, Tomul XLVIII (LII), Fasc. 3-4, p. 165-171, 2002
9. П. С. Берник, и Р. И. Сивак, «Улучшение механических характеристик проволоки путем виброобработки», *Вопросы вибрационной технологии*, с. 81-84, 2003.
10. П. С. Берник, и Р. И. Сивак, «Упрочнение проволоки поверхностным пластическим деформированием», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 435-439, 2003.
11. Р. И. Сивак, и Е. И. Сивак, «Поперечное выдавливание с последующей осадкой пористой заготовки», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 276-280, 2003.

12. И. С. Алиев, и Р. И. Сивак, «Оценка пластичности при поверхностной пластической деформации», *Известия Тульского государственного университета. Серия «Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением»*, Выпуск 2, с. 150-156, 2004.

13. Р. И. Сивак, «Схема напряженного состояния в поверхностном пластически деформированном слое», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 224-227, 2004.

14. П. С. Берник, и Р. И. Сивак, «Вибрационно-центробежная установка для упрочнения проволоки», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 590-593, 2005.

15. С. А. Сорока, П. С. Берник, и Р. И. Сивак, «Влияние акустических колебаний на механические характеристики стали», *Вібрації в техніці та технологіях*, №4 (42), с. 72-75, 2005.

16. Р. И. Сивак, та О. В. Карватко, «Дослідження процесу прямого выдавливания пористой заготовки», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 82-85, 2005.

17. Р. И. Сивак, О. В. Карватко, и В. Т. Ивацко, «Накопление повреждений при поверхностной пластической деформации», *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць*, №1 (3), с. 18-20, 2006.

18. Р. И. Сивак, и О. В. Карватко, «Особенности оценки пластичности металлов при поверхностной пластической деформации», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 93-95, 2007.

19. О. В. Нахайчук, и Р. И. Сивак, «Оценка пластичности металлов при объемном напряженном состоянии», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, №5 (96), с. 149-151, 2007.

20. О. В. Нахайчук, В. А. Огородников, В. И. Музычук, Р. И. Сивак, и Е. В. Солая, «Деформируемость заготовок в процессе закатки пары поршень-шатун аксиально-роторного поршневого насоса», *Вібрації в техніці та технологіях*, №1 (50), с. 41-44, 2008.

21. R. I. Sivak, O. V. Serdiuk, and S. Z. Yablonska, "Evaluation of the metal surface layer plasticity in the process of surface plastic deformation", *Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi. Sectia: Stiinta si ingineria materialelor*, Tomul LV (LIX), Fasc. 3, p. 201-204, 2009.

22. Р. И. Сивак, О. В. Нахайчук, та В. А. Огородніков, «Залежність пластичності металів від історії навантаження при об'ємному напруженому

стані», *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки*, Випуск 2, с. 79-83, 2009.

23. Р. И. Сивак, О. В. Сердюк, и И. О. Сивак, «Влияние немонотонности пластической деформации на напряжённое состояние», *Обработка материалов давлением*, №2 (23), с. 3-7, 2010.

24. Р. И. Сивак, и И. О. Сивак, «Пластичность металлов при сложном нагружении», *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування»*, №60, с. 129-132, 2010.

25. А. Г. Токарев, И. Г. Савчинский, и Р. И. Сивак, «Деформационное упрочнение заготовок бандажированных колец турбогенераторов мощностью 500 МВт», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №4 (25), с. 94-98, 2010.

26. Р. И. Сивак, «Условие разрушения металлов при немонотонном деформировании», *Металлургическая и горнорудная промышленность*, №7, с. 49-52, 2011.

27. R. Syvak, K. Kotsubivska, Y. Burennikov, and I. Syvak, "Evaluation of ultimate strain during the process of lateral extrusion with further upsetting", *Stiinta si ingineria materialelor: Buletinul institutului politehnic din Iasi*, Tomul LVII (LXI), Fasc. 4, p. 291-298, 2011.

28. Р. И. Сивак, И. Г. Савчинский, и И. О. Сивак, «Оценка предельных деформаций при немонотонном нагружении», *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування»*, №62, с. 247-250, 2011.

29. Р. И. Сивак, О. В. Нахайчук, и И. О. Сивак, «Влияние геометрии траектории нагружения на пластичность», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №1 (26), с. 22-25, 2011.

30. Р. И. Сивак, и Е. И. Коцюбивская, «Пластичность металлов при немонотонном нагружении», *Наукові праці ВНТУ*, №1, с. 1-6, 2011. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/4627/247.pdf?Sequence=3&isAllowed=y>

31. Р. И. Сивак, «Влияние неравномерности пластической деформации на использованный ресурс пластичности», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №3 (32), с. 40-43, 2012.

32. Л. И. Алиева, И. А. Деревенько, и Р. И. Сивак, «Ресурс пластичности в процессах комбинированного выдавливания», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №1 (34), с. 11-17, 2013.

33. Р. И. Сивак, и И. А. Деревенько, «Оценка пластичности металла при поперечном выдавливании с последующей осадкой», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №3 (36), с. 32-35, 2013.

34. Я. Г. Жбанков, О. Е. Марков, и Р. И. Сивак, «Влияние формы и размеров заготовки на напряженно-деформированное состояние в процессе осадки», *Технология производства металлов и вторичных материалов*, №1 (23), с. 109-117, 2013.

35. Р. І. Сивак, В. А. Огородніков, та І. О. Сивак, «Визначення компонент тензора напружень при немонотонній пластичній деформації», *Вісник машинобудування та транспорту*, №1, с. 111-119, 2015.

36. Е. И. Шевчук, Р. И. Сивак, и С. И. Сухоруков, «Оценка использованного ресурса пластичности металла при ротационной вытяжке конических заготовок», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №2 (43), с. 93-97, 2016.

37. Р. І. Сивак, В. А. Огородников, и І. О. Сивак, «Оценка пластичности металла при холодном двухэтапном деформировании», *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудування»*, №3 (78), с. 96-100, 2016.

38. О. В. Сердюк, І. О. Сивак, С. І. Сухоруков, та Р. І. Сивак, «Оцінка пластичності поверхневого шару металу при немонотонному навантаженні», *Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»)*, Випуск 54, с. 277-281, 2016.

39. Р. І. Сивак, К. І. Коцюбівська, та С. І. Сухоруков, «Вплив протитиску, що створюється твердим середовищем, на деформівність заготовок при радіальному видавлюванні», *Вісник машинобудування та транспорту*, №2 (4), с. 101-108, 2016.

40. Р. І. Сивак, «Накопичення пошкоджень при імпульсному пластичному деформуванні поверхневого шару», *Вібрації в техніці та технологіях*, №2 (85), с. 47-50, 2017.

41. П. Б. Абхари, Р. И. Сивак, Л. В. Таган, и К. В. Малий, «Моделирование процесса закрытого радиального выдавливания фланца с редуцированием», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №2 (45), с. 17-21, 2017.

42. R. Sivak, "Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7 (90), p. 34-41, 2017. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.115040.

43. В. А. Огородников, И. А. Деревенько, и Р. И. Сивак, «О влиянии кривизны траекторий деформирования объема материала при обработке давлением на его пластичность в условиях сложного нагружения», *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, Том 54, №3, с. 37-42, 2018.

44. І. С. Алієв, Я. Г. Жбанков, О. А. Швець, Ю. М. Станков, В. В. Панов, та Р. І. Сивак, «Спосіб осадження заготовок», Пат. 86620 Україна, МПК В 21 J 1/04, № u 2013 06942, Бюл. №1, заявл. 03.06.2013, опубл. 10.01.2014.

45. Л. І. Алієва, Х. В. Гончарук, О. В. Шкіра, та Р. І. Сивак, «Спосіб виготовлення порожнистих виробів типу стакана», Пат. 107950 Україна, МПК В 21 J 5/12, № u 2015 13100, Бюл. №12, заявл. 30.12.2015, опубл. 24.06.2016.

46. П. Абхарі, Л. І. Алієва, Р. І. Сивак, та А. А. Єрьоміна, «Спосіб виготовлення деталей з фланцем», Пат. 116545 Україна, МПК В 21 J 5/00, № u 2016 12411, Бюл. №10, заявл. 06.12.2016, опубл. 25.05.2017.

47. Р. И. Сивак, Е. И. Коцюбивская, и И. О. Сивак, «Тензорная модель процесса накопления повреждений при немонотонном нагружении», *Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2012»*, Выпуск 4, Том 6, с. 14-19, 2012.

48. И. Г. Савчинский, Р. И. Сивак, и Е. И. Коцюбивская, «Тенденции развития методов пластического деформирования труднодеформируемых сталей и сплавов», *Перспективы инновационного и конкурентноспособного развития кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств: сборник докладов и научных статей XI Конгресса «Кузнец-2012»*, с. 345-352, 2012.

49. Р. И. Сивак, «Пластичность металлов при немонотонном нагружении», на *VII международной научно-технической конференции «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии»*, г. Харьков, 18-20 ноября 2015, с. 39-41.

50. И. Г. Савчинский, А. А. Костава, и Р. И. Сивак, «Классификация металлических материалов по показателям памяти», на *IV міжнародній науково-практичній конференції «Структурна релаксація у твердих тілах»*, Вінниця, 29-31 травня 2012 р, с. 66-69.

51. Л. И. Алиева, Р. И. Сивак, Е. И. Коцюбивская, и С. И. Сухоруков, «Оценка технологической деформируемости при поперечном выдавливании», на *МНТК. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта*, Київ, НТУУ «КПІ», 29 червня – 1 липня 2017, с. 108-110.

52. Р. І. Сивак, В. А. Огородников, та І. О. Сивак, «Вплив злому траєкторії деформації на пластичність», на *МНТК. Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти*, Київ, НТУУ «КПІ», 30 травня – 3 червня 2016 р, с. 19-21.

53. Р. І. Сивак, и І. О. Сивак, «Оценка релаксаций остаточных напряжений в поверхностном пластически деформированном слое», на *МНПК. Структурна релаксація у твердих тілах*, Вінниця, ВДПУ, 26 – 28 травня 2015, с. 5-7.

54. В. А. Огородніков, та Р. І. Сивак, «Особенности оценки пластичности металлов и механики немонотонного пластического деформирования», на *X МНТК. Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії*, Харків, НТУ «ХПІ», 21-23 листопада 2018, с. 76-77.

55. Р. И. Сивак, «Поверхностная пластическая деформация проволоки при вибрационно упрочняющей обработке», на *49-ой МНТК. Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров*, Москва, МГТУ «МАМИ», 23 – 24 марта 2005, с. 13-15.

56. Р. І. Сивак, та І. Г. Савчинский, «Оцінка граничних деформацій при немонотонному навантаженні», на *VI МНПК. Структурна релаксація в твердих тілах*, Вінниця, ВДПУ, 22 – 24 травня 2018, с. 47-49.

57. Р. І. Сивак, «Розвиток наукових основ розробки технологічних процесів холодного немонотонного пластического деформирования», на *VIII МНТК. Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти*, Київ-Херсон, 2017, с. 168-169.

58. Р. И. Сивак, «Оценка напряженного состояния с учетом анизотропии свойств деформированного металла в условиях сложного нагружения», на *IX МНТК. Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії*, Харків, НТУ «ХПІ», 22-24 листопада 2017, с. 62-63.

59. Р. И. Сивак, «Оценка пластичности металлов при немонотонном деформировании», на *IX МНТК. Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти*, Київ-Херсон, 2018, с. 105-106.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	23
ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	33
1.1. Оцінка пластичності металів при складному навантаженні.....	33
1.2. Вплив немонотонності пластичної деформації на механічні властивості металів.....	53
1.3. Деформаційна анізотропія металів при немонотонному пластичному деформуванні.....	57
1.4. Технологічні задачі оцінки пластичності металів при немонотонному навантаженні.....	62
1.5. Вплив пластичної деформації при складному навантаженні на технологічну спадковість.....	69
1.6. Висновки до розділу та постановка задач дослідження.....	76
РОЗДІЛ 2 ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ МЕТАЛІВ В УМОВАХ НЕМОНОТОННОГО НАВАНТАЖЕННЯ.....	79
2.1. Визначення напружено-деформованого стану при немонотонній пластичній деформації.....	79
2.1.1. Визначення компонент девіатора напружень.....	79
2.1.2. Визначення характеристик матеріалу $\sigma_p(e_u)$, $\beta(e_u)$ і $\varphi(e_u - e_u^0)$	83
2.1.3. Визначення компонент тензора швидкостей деформацій.....	88
2.2. Тензорні моделі процесів накопичення пошкоджень.....	90
2.3. Умова руйнування металів при немонотонному навантаженні.....	95

2.4. Фізико-механічні моделі матеріалу необхідні для використання розроблених методів оцінки пластичності металів при немонотонному навантаженні.....	99
2.5. Підвищення якості деформованого металу шляхом вибору раціональних режимів немонотонного пластичного формозмінення заготовок.....	103
2.6. Висновки до розділу	106

РОЗДІЛ 3 ПЛАСТИЧНІСТЬ МЕТАЛІВ ПРИ СКЛАДНОМУ НАВАНТАЖЕННІ.....	108
---	-----

3.1. Вплив на пластичність геометрії траєкторії навантаження, заданої в просторі безрозмірних інваріантних характеристик напружено-деформованого стану.....	108
3.2. Вплив ефектів запізнення на точність визначення компонент тензора напружень.....	112
3.3. Методика побудови поверхні граничних деформацій пористих матеріалів.....	127
3.4. Оцінка граничних деформацій металів при складному навантаженні в умовах об'ємного напруженого стану.....	133
3.5. Висновки до розділу	147

РОЗДІЛ 4 ПІДВИЩЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ МЕТАЛІВ ПРИ СКЛАДНОМУ ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ.....	149
--	-----

4.1. Вплив нерівномірності пластичної деформації на використаний ресурс пластичності.....	149
4.2. Залежність пластичності металів від кута злому траєкторії в просторі деформацій.....	155
4.3. Вплив кривизни траєкторій деформування часток матеріалу на пластичність в умовах складного навантаження.....	164

4.4. Деформовність заготовок при радіальному видавлюванні з подальшою осадкою.....	171
4.5. Ресурс пластичності заготовок при послідовних операціях пластичного формозмінення.....	181
4.6. Контактні напруження при холодному деформуванні пористих заготовок.....	186
4.7. Оцінка пластичності при прямому видавлюванні пористої заготовки.....	192
4.8. Оцінка пластичності пористої заготовки при радіальному видавлюванні з подальшою осадкою і при використанні гідростатичного тиску.....	201
4.9. Деформовність заготовок при радіальному видавлюванні з протитиском.....	211
4.10. Висновки до розділу	228
РОЗДІЛ 5 ДЕФОРМАЦІЙНЕ ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛІВ.....	232
5.1. Зміцнення металів при немонотонному пластичному деформуванні.....	232
5.2. Накопичення пошкоджень при поверхневому пластичному деформуванні.....	234
5.3. Напружено-деформований стан в осередку деформації при поверхневому пластичному деформуванні.....	250
5.4. Зміцнення проволочки поверхневим пластичним деформуванням.....	257
5.5. Пластичність матеріалу поверхневого шару при поверхневому пластичному деформуванні.....	263
5.6. Оцінка пластичності поверхневого шару металу при немонотонному навантаженні.....	268
5.7. Висновки до розділу	275

РОЗДІЛ 6 ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ОБРОБКИ ТИСКОМ.....	278
6.1. Вплив акустичних коливань на механічні характеристики сталі.....	280
6.2. Покращання механічних характеристик проволочи шляхом віброобробки. Вібраційно-відцентрова установка для зміцнення проволочи.....	285
6.3. Вплив геометрії матриць на використаний ресурс пластичності при видавлюванні осесиметричних заготовок.....	292
6.4. Деформовність заготовок в процесі закатування пари поршень-шатун.....	301
6.5. Оцінка впливу немонотонності навантаження на пластичність деформованого металу.....	308
6.6. Застосування проміжних відпалів для підвищення несучої здатності деталей одержуваних обробкою тиском.....	315
6.7. Оцінка використаного ресурсу пластичності металу при ротаційній витяжці конічних заготовок.....	324
6.8. Висновки до розділу	331
 РОЗДІЛ 7 РОЗРОБКА ПРОЦЕСІВ НЕМОНОТОННОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ.....	 334
7.1. Дослідження напружено-деформованого стану при виготовленні порожнистих виробів типу стакан.....	334
7.2. Оцінка деформовності металу при виготовленні деталей з фланцем.....	340
7.3. Деформаційне зміцнення заготовок бандажних кілець турбогенератора.....	347
7.4. Висновки до розділу	355

ВИСНОВКИ.....	357
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	361
ДОДАТКИ.....	396
Додаток А Список опублікованих робіт за темою дисертації.....	397
Додаток Б Апробація результатів дисертаційної роботи на міжнародних і всеукраїнських конференціях.....	403
Додаток В Акт впровадження результатів досліджень на ТОВ «Укртехконтакт».....	405
Додаток Г Акт впровадження результатів досліджень на ДП «АНТОНОВ».....	408

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасний розвиток економіки в Україні та за кордоном потребує удосконалення існуючих, розробки та впровадження нових технологій, які забезпечують збереження матеріальних, трудових, енергетичних та екологічних ресурсів. В металообробній промисловості ресурсозбереження забезпечується впровадженням методів холодного об'ємного штампування, які дозволяють підвищувати механічні властивості деформованого металу, отримувати вироби з високою точністю та необхідною технологічною спадковістю. Можливість формування сприятливої для роботи виробів макроструктури, деформаційного зміцнення та допустимого рівня пошкодженості деформованого металу дозволяє в багатьох випадках замінити дорогі марки сталей на більш дешеві без погіршення службових властивостей виробів. Такі можливості мають нові способи деформування, які передбачають складне комбіноване навантаження з додатковими кінематичними і силовими впливами, з високим рівнем гідростатичного тиску, з наявністю знакозмінного деформування.

Однак методи теоретичного розв'язку задач обробки металів тиском, при яких метал перебуває в умовах об'ємного напруженого стану, особливо при наявності немонотонності навантаження, розвинуті недостатньо для їх практичного використання при розробці та удосконаленні технологій. Істотним фактором також є тенденція переходу до більш жорстких вимог до точності визначення напружено-деформованого стану, оскільки прогнозування механічних властивостей деформованого металу і рівень його пошкодженості можуть бути достовірно визначені тільки при відомій історії розвитку процесу пластичної деформації в будь-якій точці осередку деформації. Наявність немонотонного навантаження значно ускладнює розрахунки напружень та граничних деформацій.

В існуючих роботах недостатньо обґрунтовані фізичні рівняння, які використовують для розрахунку компонент тензора пошкоджень та напружень

при немонотонному навантаженні. Крім того, для використання відомих рівнянь необхідна незалежно отримана інформація про кінематику пластичної течії металу. Невирішена низка питань, пов'язаних з визначенням відповідних механічних властивостей та структури функцій матеріалу, які необхідні для розрахунків напружено-деформованого стану та величини використаного ресурсу пластичності при немонотонному деформуванні в умовах об'ємного напруженого стану.

Розробка нових, більш досконалих методів розрахунків напружено-деформованого стану та оцінки деформовності заготовок при холодному об'ємному штампуванні в умовах немонотонного навантаження має важливе значення для створення конкурентоспроможного виробництва та відродження промислового потенціалу України. Тому тема дисертації, спрямована на розв'язок важливої науково-технічної проблеми створення наукових основ, розробки та удосконалення нових методів оцінки деформовності в процесах обробки металів тиском, що супроводжуються немонотонним пластичним деформуванням, є **актуальною**.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках задач поставлених в Державній програмі розвитку і реформування гірничо-металургійного комплексу України на період до 2020 року і відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки «Фундаментальні проблеми сучасного матеріалознавства» і «Створення і застосування технологій отримання, зварювання, з'єднання і обробки конструкційних, функціональних і композиційних матеріалів». Тема дисертаційної роботи відповідає напрямку наукової школи кафедри опору матеріалів та прикладної механіки (ОМППМ) Вінницького національного технічного університету (ВНТУ) «Феноменологічні критерії руйнування суцільних, пористих і композиційних матеріалів в межах великих пластичних деформацій і їх застосування для розв'язання технологічних задач механіки». Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР) ВНТУ, передбачених планами Міністерства освіти і науки України (№№

державної реєстрації 0102U002269, 0108U003289, 0112U001366), у виконанні яких автор брав участь як виконавець, а також НДР Вінницького національного аграрного університету «Вдосконалення технологічних процесів холодного об'ємного штампування на основі формування моделі штампованих матеріалів з використанням вібротехнологій» (державний реєстраційний номер 0112U006703) в якості керівника. Автор також брав участь у виконанні теми 15-Д-380 «Розвиток теорії деформовності, моделювання і удосконалення процесів холодного пластичного формозмінення», яка виконувалась на кафедрі ОМПМ наукової школи ВНТУ.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка фізичних основ та розрахункових методів визначення комплексного впливу основних параметрів процесів холодного об'ємного штампування та законів їх зміни на фізико-механічні властивості матеріалу заготовок та їх технологічну спадковість.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати існуючі проблеми і досягнення в механіці немонотонного пластичного деформування, а також тенденції розвитку технологічних процесів обробки металів тиском;
- запропонувати нові більш точні фізичні рівняння і підвищити, на цій основі, достовірність розрахунків напружено-деформованого стану для процесів немонотонного навантаження в умовах об'ємного напруженого стану;
- розробити модель процесу накопичення пошкоджень і методи оцінки ресурсу пластичності при складному та немонотонному навантаженні в умовах об'ємного напруженого стану;
- встановити вплив геометричних характеристик траєкторії навантаження на пластичність в умовах немонотонного навантаження обумовленого зломом цієї траєкторії в просторі деформацій;

- підтвердити ефективність запропонованого підходу шляхом розв'язку задач оцінки деформовності заготовок при немонотонному навантаженні в процесах об'ємного та локального пластичного деформування;
- на основі розв'язку приведених вище задач розробити методи проектування нових і удосконалення існуючих технологічних процесів холодного об'ємного штампування з метою отримання виробів з необхідною технологічною спадковістю;
- підготувати результати теоретичних і експериментальних досліджень до практичного застосування і впровадити у практику промислового виробництва.

Об'єкт дослідження. Процеси холодного об'ємного штампування.

Предмет дослідження. Закономірності формування напружено-деформованого стану, особливості пластичної течії і процесів накопичення пошкоджень при немонотонному пластичному деформуванні в умовах об'ємного напруженого стану та удосконалення на цій основі технологічних процесів обробки металів тиском.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження пластичності металів ґрунтовані на законах і методах механіки суцільного середовища, математичної та прикладної теорії пластичності. Для дослідження процесів пластичної деформації використані аналітичні, числові, експериментально-розрахункові методи. Експериментальні дослідження проводились в лабораторних та заводських умовах із застосуванням сучасних приладів, спеціально розроблених пристроїв і оснастки та стандартного обладнання. Обробка експериментальних даних проводилась методами математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукову новизну дисертації становлять наступні результати:

1. *Вперше* на основі моделі анізотропно зміцнюваного тіла показана можливість вивчення механіки процесів пластичного деформування в умовах складного навантаження при прояві ефекту Баушинґера. В результаті отримано

розрахунковий апарат, який *дозволяє* достовірно оцінити напружений стан в процесах немонотонного холодного об'ємного деформування.

2. *Вперше* розроблені моделі оцінки граничного формозмінення в процесах немонотонного пластичного деформування, які базуються на введенні у визначальне співвідношення для девіатора пошкоджень компонент направляючого тензора напружень, що *дозволило* врахувати особливості залежності між компонентами тензорів прирощень пластичних деформацій і напружень та підвищити на цій основі точність розрахунків величини використаного ресурсу пластичності.

3. *Вперше* на основі інформації про напружено-деформований стан в процесах немонотонного пластичного деформування розроблений розрахунковий апарат із застосуванням тензорної моделі накопичення пошкоджень, який *дозволяє* оцінити граничне формоутворення деталей в задачах обробки металів тиском в умовах об'ємного напруженого стану.

4. *Отримав подальший розвиток* підхід О. А. Ільюшина щодо визначення компонент тензора напружень в умовах складного навантаження. *Суть новизни* у тому, що феноменологічним шляхом *отримані* коефіцієнти рівняння, що дозволяє враховувати вплив відхилення вектору напружень і вектору деформацій на компоненти тензора напружень при складному навантаженні, яке характерне для багатоперехідних процесів холодного об'ємного штампування.

5. *Вперше* встановлено, що характер залежності величини використаного ресурсу пластичності від кута злому траєкторії навантаження і величини використаного ресурсу пластичності перед зломом визначається історією навантаження, що передує злому траєкторії навантаження. Встановлені закономірності *дозволять* розробляти раціональні режими пластичного деформування і прогнозувати технологічну спадковість виробів.

Практичне значення отриманих результатів. Практичну цінність дисертаційної роботи представляють наступні її основні результати:

- на основі розробленого розрахункового апарату для визначення

напружено-деформованого стану і величини використаного ресурсу пластичності заготовок в процесах, що супроводжуються немонотонним деформуванням, вдосконалені технології обробки металів тиском; запропоновані науковообґрунтовані технологічні параметри процесів, що забезпечують необхідний рівень фізико-механічних властивостей матеріалів виробів та запобігають технологічним відмовам;

- запропоновані практичні рекомендації, які дозволяють запобігти браку від руйнування металу і підвищити якість виробів в процесах радіального видавлювання з подальшою осадкою на основі розробленого розрахункового апарату оцінки напружено-деформованого стану і використаного ресурсу пластичності заготовок;
- розроблені схеми і параметри немонотонного навантаження в процесах зміцнення поверхневого шару проволочки, що дозволило отримати вироби з необхідними механічними характеристиками;
- розроблені режими і параметри процесу ротаційної витяжки листових заготовок при виготовленні осесиметричних деталей, які забезпечують пластичність і стійкість металу заготовок; практична реалізація вказаних параметрів здійснюється розробленими спеціальними програмами.

Рекомендації з проектування і методи розрахунку технологічних параметрів процесів об'ємного штампування впроваджено на ДП «АНТОНОВ» і в ТОВ «Укртехконтакт».

Окремі результати роботи використовуються на кафедрі опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ в розділах курсу «Опір матеріалів» і «Прикладна механіка».

Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні мети роботи, розробці основних ідей і методів досліджень, постановці і розв'язанні задач дисертації, аналізі сучасної феноменологічної теорії деформовності металів і її практичне застосування для оцінки ресурсу пластичності стосовно процесів радіального видавлювання з подальшою осадкою, зміцнення проволочки поверхневим пластичним деформуванням, ротаційної витяжки конічних

заготовок. Автор на основі теоретичного аналізу механіки вказаних процесів розробляв технологічні рекомендації, які дозволяють керувати параметрами процесу, що забезпечують деформування без руйнування і якість готових виробів. Автор приймав участь в плануванні і проведенні експериментальних досліджень, обробці і аналізі отриманих результатів, а також у впровадженні результатів роботи у виробництво. Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві, відображено в анотації до списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати роботи доповідались на наукових конференціях, семінарах, симпозіумах серед них:

VII, VIII, IX міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (Київ-Херсон, 2016, 2017, 2018); II міжнародна науково-технічна конференція «Машини і пластична деформація металів» (Запоріжжя, 2012); IX, X, VII международной научно-технической конференции «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии» (Харьков, 2015, 2017, 2018); XIII международная научно-техническая конференция «Прогрессивная техника и технология – 2012» (Киев-Севастополь, 2012); II международная научно-техническая конференция «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением» (Тула, 2004); 4-та міжнародна науково-технічна конференція «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (Львів, 2014); 49-я международная научно-техническая конференция ААИ «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров» (Москва, 2005); IV, V, VI міжнародна науково-практична конференція «Структурна релаксація у твердих тілах» (Вінниця, 2012, 2015, 2018); XV, XVI міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (Краматорськ, 2012, 2013); міжнародна науково-

технічна конференція «Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз» (Вінниця, 2011); міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (Київ, 2017); науковий семінар ВНТУ з проблем ОМТ (Вінниця, 2018).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 59 роботах, з яких 42 статті опубліковані в журналах і збірниках наукових праць, з них 1 стаття в міжнародному науковому журналі, який входить до бази даних Scopus, 6 статей у зарубіжних виданнях, 25 статей у наукових фахових виданнях України, в тому числі 2 статті у збірниках і журналах, включених у міжнародні наукометричні бази даних, 11 тез доповідей на конференціях. Матеріали досліджень і розробок опубліковані також в 3 монографіях. На нові технічні рішення отримано 3 патенти України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, семи розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 409 сторінок машинописного тексту, з них 306 сторінок основного тексту, 111 рисунків і 10 таблиць на 51 сторінці, список використаних джерел з 340 найменувань на 35 сторінках, анотації і 4 додатків, що включають список опублікованих праць за темою дисертації і перелік науково-технічних конференцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А. А. Богатов, В. Л. Колмогоров, и Г. А. Матвеев, «Экспериментальная проверка условия разрушения металла при различных схемах нагружения», *Изв. вузов. Чёрная металлургия*, №8, с. 76 – 80, 1970.
2. А. А. Мовчан, «Микромеханический подход к проблеме описания накопления анизотропных рассеяных повреждений», *Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела*, №3, с. 115-123, 1990.
3. Б. А. Мигачёв, Ф. М. Журавлёв, и П. А. Марков, «Пластичность аустенитно-ферритной стали при знакопеременном кручении», *Обработка металлов давлением*, Вып. 15, с. 27-33, 1988.
4. Г. Д. Дель, «Пластичность деформированного металла», *Физика и техника высоких давлений*, №11, с. 28 – 32, 1982.
5. А. А. Мишулин, и В. М. Михалевич, «Совершенствованиековки на основе описания деформационной анизотропии пластичности», *Оптимизацияковки на автоматизированных ковочных комплексах*, №173, с. 144 – 161, 1982.
6. В. М. Михалевич, «Модель накопления повреждений для тел с начальной и деформационной анизотропией», *Металлы*, №5, с. 144 – 151, 1993.
7. В. М. Михалевич, «Пластичность при горячем циклическом деформировании», *Проблемы прочности*, №6, с. 10 – 17, 1994.
8. Л. Е. Басовский, «Влияние вида напряжённого состояния и немонотонности деформирования на использование запаса пластичности при обработке давлением», *Известия вузов. Машиностроение*, №5, с. 101 – 104, 1989.
9. Л. Е. Басовский, «Прогнозирование повреждаемости деформируемых материалов при немонотонном нагружении», *Известия вузов. Машиностроение*, №2, с. 3-7, 1990.
10. А. А. Богатов, О. И. Мижирецкий, и С. В. Смирнов, *Ресурс пластичности металлов при обработке давлением*. Москва: Металлургия, 1984.
11. *Пластичность и разрушение* / под ред. В.Л. Колмогорова. Москва:

Металлургия, 1977.

12. А. А. Богатов, «Теория разрушения металлов при обработке давлением», *Обработка металлов давлением*, с. 15 – 23, 1982.

13. В. А. Огородников, *Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении*. Киев: УМК ВО, 1989.

14. А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, В. Ф. Шишминцев, и Ю. А. Аксенов, «Исследования пластичности металлов под гидростатическим давлением», *Физика металлов и металловедение*, т. 45, вып. 5, с. 1089-1094, 1978.

15. Ю. Г. Важенцев, *Прочность и пластичность материалов под гидростатическим давлением*. Томск: ТПИ, 1978.

16. А. А. Ильюшин, Б. Э. Победря, *Основы математической теории термовязкоупругости*. Москва: Наука, 1970.

17. *Теорияковки и штамповки: Учебное пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов*. Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров, В. А. Огородников и др.; Под общей редакцией Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1992.

18. Ю. Г. Калпин, Ю. К. Филиппов, и Н. Н. Беззубов, «Оценка деформационной способности металлов в процессах холодной объёмной штамповки», *Технология, организация и экономика машиностроительного производства*, Вып. 10, с. 1-16, 1988.

19. И. А. Кийко, «Теория разрушения в процессах пластического течения», *Обработка металлов давлением*, с. 27 – 40, 1982.

20. Н. С. Можаровский, и Н. С. Шукаев, «Долговечность конструкционных материалов при непропорциональных путях малоциклового нагружения», *Проблемы прочности*, №10, с. 47-54, 1988.

21. Н. А. Шестаков, «Оценка залечиваемости дефектов при немонотонном деформировании некомпактных материалов», *Известия вузов. Машиностроение*, №8, с. 92-98, 1989.

22. В. А. Огородников, *Оценка деформируемости металлов при обработке давлением*. Киев: Выща школа, 1983.
23. Г. Д. Дель, *Технологическая механика*. Москва: Машиностроение, 1978.
24. Г. Д. Дель, и Н. А. Новиков *Метод делительных сеток*. Москва: Машиностроение, 1979.
25. Г. Л. Петросян, *Пластическое деформирование порошковых материалов*. Москва: Металлургия, 1988.
26. Г. Л. Петросян, «Применение метода конечных элементов к задачам обработки давлением порошковых пористых тел», *Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов*, С. 76-85, 1985.
27. Г. А. Смирнов-Алянев, *Механические основы пластической обработки металлов*. Ленинград: Машиностроение, 1968.
28. В. А. Тітов, Ю. Є. Шамарін, А. І. Долматов, В. К. Борисевич, В. О. Маковей, та В. М. Алексеєнко, *Високошвидкісні методи обробки металів тиском*. Київ: КВІЦ, 2010.
29. В. А. Тітов, та Р. С. Борис, *Витягування з потоншенням біметалевих трубчастих елементів з різнорідних металів і сплавів*. Київ: Центр учбової літератури, 2014.
30. М. Б. Штерн, Г. Г. Сердюк, Л. А. Максименко, Ю. В. Трухан, и Ю. М. Шуляков, *Феноменологические теории прессования порошков*. Киев: Наукова думка, 1982.
31. М. Б. Штерн, «Особенности плоской деформации уплотняемых материалов», *Порошковая металлургия*, №3, с. 14-21, 1982.
32. М. Б. Штерн, «Определяющие уравнения для уплотнения пластических пористых тел», *Порошковая металлургия*, №4, с. 17-23- 1981.
33. М. Б. Штерн, «К теории пластичности пористых тел и уплотняемых порошков», *Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов*, с. 12-23, 1985.

34. В. В. Скороход, *Реологические основы теории спекания*. Киев: Наук. Думка, 1972.
35. А. А. Ильюшин, *Пластичность. Основы общей математической теории*. Москва: АН СССР, 1963.
36. Н. Н. Малинин, *Прикладная теория пластичности и ползучести*. Москва: Машиностроение, 1975.
37. Г. С. Писаренко, и А. А. Лебедев, *Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряжённом состоянии*. Киев: Наук. думка, 1969.
38. Е. П. Унжсов, *Инженерная теория пластичности*. Москва: Машгиз, 1959.
39. И. М. Качанов, *Основы теории пластичности*. Москва: Наука, 1969.
40. В. О. Ключников, *Математическая теория пластичности*. Москва: Из-во МГУ, 1979.
41. В. М. Сегал, *Технологические задачи теории пластичности*. Минск: Наука и техника, 1977.
42. Г. Я. Гунн, *Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением*. Москва: Metallургия, 1983.
43. Г. Я. Гунн, «К феноменологической теории процессов пластической деформации пористых материалов», *Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов*, с. 33-43, 1985.
44. В. А. Евстратов, *Теория обработки металлов давлением*. Харьков: Вища школа, 1981.
45. А. А. Поздеев, Ю. И. Няшин, и П. В. Трусков, *Остаточные напряжения: теория и приложения*. Москва: Наука, 1982.
46. А. А. Поздеев, П. В. Трусков, и Ю. И. Няшин, *Большие упругопластические деформации*. Москва: Наука, 1986.

47. И. П. Рене, *Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки*. Тула, 1970.

48. А. М. Лаптев, «Построение деформационной теории пластичности пористых материалов», *Изв. Вузов: Машиностроение*, №4, с. 153-156, 1980.

49. В. В. Соколовский, *Теория пластичности*. Москва: Высшая школа, 1969.

50. Р. Хилл, *Математическая теория пластичности*. Москва: Гостехиздат, 1958.

51. В. Джонсон, и Х. Кудо, *Механика процессов выдавливания*. Москва: Машиностроение, 1979.

52. А. М. Лаптев, «Двухсторонняя оценка мощности пластического деформирования пористого материала», *Изв. Вузов: Машиностроение*, №8, с. 12-16, 1984.

53. А. М. Лаптев, «Метод характеристик в теории плоской деформации пористых материалов», *Изв. Вузов. Машиностроение*, №7, с. 21-24, 1984.

54. А. М. Лаптев, и А. Н. Ульянов, «Моделирование уплотнения порошковых материалов в прессформе», *Изв. Вузов. Машиностроение*, №3, с. 133-116, 1983.

55. А. М. Лаптев, «Вариационный функционал для жёстко-пластического пористого материала», *Порошковая металлургия*, №1, с. 1- 4, 1983.

56. А. М. Лаптев, «Зависимости между напряжениями и деформациями при пластическом деформировании пористых материалов. I. Теория пластического течения», *Порошковая металлургия*, №8, с. 34-38, 1985.

57. А. М. Лаптев, «Зависимости между напряжениями и деформациями при пластической деформации пористых металлов. II. Деформационная теория пластичности», *Порошковая металлургия*, №9, с. 9-10, 1985.

58. Я. Е. Бейгельзимер, А. П. Гетьманский, Ю. А. Палант, В. З. Спусканюк, и В. С. Тютенко, «Критерии деформируемости пористых тел», *Порошковая металлургия*, №5, с. 15 – 18, 1986.

59. О. М. Лаптев, Ю. Й. Тулашвілі, та В. О. Рудь, «Визначення граничної пластичності при холодному деформуванні пористих матеріалів», *Наукові нотатки (серія технології машинобудування)*, Випуск 3, с. 35 – 38, 1997.

60. Ю. Й. Тулашвілі, В. Д. Рудь, «Критерій граничної пластичності при холодному деформуванні спечених пористих матеріалів», на міжнародному семінарі “*Реологічні моделі та процеси деформування пористих і композиційних матеріалів*”, Луцьк: Луцький індустріальний інститут, 1997, с. 41- 43.

61. В. Л. Колмогоров, *Напряжения, деформации, разрушение*. Москва: Металлургия, 1970.

62. Т. Екобори, *Физика и механика разрушения и прочности твёрдых тел*. Москва: Металлургия - 1971.

63. А. Тетелмен, «Пластическая деформация у вершины движущейся трещины», *Разрушение твёрдых тел*, С. 46-50, 1967.

64. В. М. Финкель, *Физика разрушения*. Москва: Металлургия, 1970.

65. Ж. Фридель, *Дислокации*. Москва: Мир - 1967.

66. Г. Д. Дель, В. А. Огородников, и В. Г. Нахайчук, «Критерий деформируемости металлов при обработке давлением», *Изв. вузов. Машиностроение*, №4, с. 135 – 140, 1975.

67. В. М. Сегал, «Критерии вязкого разрушения при пластическом формоизменении металлов», *Журн. прикл. математики и техн. физики*, №1, с. 164 – 169, 1984.

68. Е. А. Дорошкевич, В. М. Горохов, И. М. Рябов, и Е. В. Звонарёв, «О нахождении оптимальной формы заготовки при горячей штамповке», *Порошковая металлургия*, №4, с. 11 – 15, 1988.

69. Я. Е. Бейгельзимер, и А. П. Гетманский, «Модель развития пластической деформации пористых тел в приближении теории протекания», *Порошковая металлургия*, №10, с. 17-20, 1988.

70. Я. Е. Бейгельзимер, «Пластическая деформация пористых тел при малой пористости», *Порошковая металлургия*, №3, с. 11-13, 1995.

71. Я. Е. Бейгельзимер, Б. М. Эфрос, и Н. В. Шишкова, «Деформация и разрушение металлических материалов в условиях высоких гидростатических давлений», *Металлы*, №1, с. 121-126, 1995.

72. M. G. Cockcroft, and D. J. Latham, “Ductility and workability of metals”, *J Inst Metals*, Т. 96, №1, p. 33-39, 1968.

73. S. I. Oh, C. C. Chen, and S. Kobayashi, “Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing - part 2: workability in extrusion and drawing”, *Journal of Engineering for Industry*, Т. 101, №1, p. 36-44, 1979.

74. А. В. Боткин, и Р. З. Валиев, «Оценка поврежденности металла при холодной пластической деформации с использованием модели разрушения Кокрофта-Латама», *Деформация и разрушение металлов*, №7, с. 17-22, 2011.

75. А. В. Власов, «О применении критерия Кокрофта-Лэтэма для прогнозирования разрушения при холодной объемной штамповке», *Известия ТулГУ. Технические науки*, Вып. 11, ч. 1, с. 46-58, 2017.

76. В. В. Новожилов, «О пластическом разрыхлении», *Прикладная математика и механика*, т. 29, с. 681-689, 1965.

77. В. С. Смирнов, А. К. Григорьев, В. П. Пакудин, и Б. В. Садовников, *Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением*. Москва: Металлургия, 1975.

78. А. А. Ильюшин, «Об одной теории длительной прочности», *Изв. АН СССР, Механика твердого тела*, №3, с. 21 – 25, 1967.

79. А. А. Костава, и И. О. Сивак, «Условие разрушения материалов, деформируемых при высоких гидростатических давлениях», на *II Всесоюзн. конф. “Гидростатическая обработка материалов”*, Донецк, 1981, с. 42 - 43.

80. В. А. Огородников, и И. О. Сивак, «Деформируемость в условиях сложного нагружения при гидростатической обработке материалов», на *II Всесоюзн. конф. “Гидростатическая обработка материалов”*, Донецк, 1981, с. 49 - 50.

81. В. А. Матвийчук, С. М. Мочалов, и И. О. Сивак, «Влияние немонотонности деформирования на предельную деформацию при раскатке в

торец», на *республ. научн.-техн. конф. “Высокоэффективные локальные методы обработки металлов давлением”*, Краматорск, 1984, с. 42 - 43.

82. О. А. Розенберг, С. Ф. Студенец, В. В. Мельниченко, В. А. Огородников, и А. В. Грушко, «Оценка деформируемости крутоизогнутых отводов при их формировании методом одновременной протяжки с изгибом заневоленной трубы», *Сучасне машинобудування, №2*, с. 49-53, 1999.

83. О. А. Розенберг, и В. А. Огородников, «Прогнозирование ресурса пластичности и управление технологической наследственностью в процессах холодного пластического деформирования с помощью феноменологической теории деформируемости металлов без разрушения», *Високі технології в машинобудуванні*, с. 249 – 251, 1998.

84. О. А. Розенберг, В. А. Огородников, А. В. Чернявский, и С. Г. Лопатенко, «Обработка чугунов деформирующим протягиванием», на *Ежегодной Междунар. Науч.-техн. конф. «Прогрессивные технологии в машиностроении» (ТЕХНОЛОГИЯ-2000)*, Киев – Одесса: АТМ Украины, 2000, с. 209 - 212.

85. Г. Д. Дель, Ф. Х. Томилов, и Ю. С. Богомолов, «Пластичность металлов при немонотонном деформировании», *Изв. ВУЗов. Чёрная металлургия, №6*, с. 34 – 37, 1982.

86. Е. П. Костюкова, Б. М. Ровинский, и Л. М. Рыбакова, «Структурные изменения в металлах при знакопеременной пластической деформации», *ФММ*, т. 20, вып. 2, с. 274 – 279, 1965.

87. И. М. Павлов, и И. Я. Мизес, «Зависимость микроструктуры металла от изменения знака пластической деформации», *Металлургия, металловедение, физико-химические методы исследования*, вып. 5, с. 127 – 132, 1960.

88. С. Менсон, *Температурные напряжения и малоцикловая усталость*. Москва: Машиностроение, 1974.

89. В. А. Огородников, «Деформируемость металлов при холодной объёмной штамповке» на *Всесоюзн. науч.-техн. конф. “Пути*

совершенствования технологии холодной объёмной штамповки и высадки”, Омск, 1978, с. 17 - 19.

90. E. Onate, “Advances of Finite Element Methods and Particle Based Methods for Metal forming processes”, *Steel research Int., Special Edition : 10 Int. Conf. on Tech. of Plast., ICTP11*, p. 43–48, 2011.

91. M. G. Cockcroft, and D. J. Latham, “Ductility and the workability of metals”, *J. of the Institute of Metals*, № 96, p. 33–39, 1968.

92. G. R. Johnson, and W. H. Cook, “Fracture characteristics of three metals subjected to various strain, strain rates, temperatures, pressures”, *Eng. Frac. Mech*, № 21, p. 31–48, 1985.

93. T. Wierzbicki, Y. Bao, Y.-W. Lee, Y. Bai, “Cflibration and evaluation of seven fracture models”, *Int. J. Of Mechanical Sciences*, № 47, p. 719–743, 2005.

94. В. Л. Колмогоров, *Механика обработки металлов давлением*. Екатеринбург: Изд-во Уральского ГТУ, 2001.

95. А. В. Власов, «Методика прогнозирования механических свойств материала после холодной деформации по результатам математического моделирования», *Обработка материалов давлением*, №1 (34), с. 72-78, 2013.

96. Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, Д. В. Орлов, и С. Г. Сынков *Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций*. Донецк: Фирма ТЕАН, 2003.

97. С. П. Яковлев, и В. Д. Кухарь, *Штамповка анизотропных заготовок*. Москва: Машиностроение, 1986.

98. А. Ю. Ишлинский, «Общая теория пластичности с линейным упрочнением», *Украинский математический журнал*, Т. 6, № 3, с. 314-325-1954.

99. Ю. И. Кадашевич, и В. В. Новожилов, «Теория пластичности, учитывающая остаточные микронапряжения», *ПММ*, Т. 22, Вып. 1, с. 78-79, 1958.

100. В. В. Новожилов, и Ю. И. Кадашевич, *Микронапряжения в конструкционных материала*. Ленинград: Машиностроение, 1990.

101. Р. А. Арутюнян, и А. А.Вакуленко, «О многократном нагружении упругопластичной среды», *Известия АН СССР. Механика и машиностроение*, № 4, С. 53 – 61, 1965.

102. В. Л. Данилов, «К формулировке закона деформационного упрочнения», *Известия АН СССР. Механика твердого тела*, № 6, с. 146- 150, 1971.

103. A. Baltov, and A. Sawchuk, “Rule of anisotropic hardening”, *Acta Mechanica*, Vol. 1, № 2, p. 81 – 92, 1965.

104. G. Backhaus, “Zur analytischen Darstellung des Materialverhaltens im plastischen Bereich”, *ZAMM*, №51, p. 471 – 477, 1971.

105. Д. В. Хван, Ф. Х. Томилов, и В. И. Корольков, *Экспериментальная механика конечных деформаций*. Воронеж: Изд-во «ЭЛИСТ», 1996.

106. Г. Д. Дель, *Деформируемость материалов с анизотропным упрочнением. Прикладные задачи механики сплошных сред*. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1988.

107. Г. Бакхауз, «Анизотропия упрочнения. Теория в сопоставлении с экспериментом», *Известия АН СССР. Механика твердого тела*, № 6, с. 120 – 129, 1976.

108. G. Backhaus, „Flie β Spannungen und Flie / bedingungen bey zyklischen Verformungen“, *ZAMM*, № 56, p. 337 – 348, 1976.

109. G. Backhaus, „Plastic Deformation in Form of Strain Trajectories of Constant Curvature - Theory and Comparison with Experimental Results”, *Acta Mechanica*, № 34, p. 193 – 204, 1979.

110. G. Backhaus, “Constitutive Equations for the Plastic Behaviour of Metals and the Influence of the Deformation Induced Rotation”, *Acta Mechanica*, № 41, p. 793 – 803, 1981.

111. Л. И. Алиева, и Я. Г. Жбанков, «Перспективы развития процессов точной объемной штамповки», *Вісник ДДМА: збірник наукових праць*, №1 (11), с. 13–19, 2008.

112. W. Voelkner, and H. J. Mewes, “Verfahrenskombination Stauchen und Seitwärtsauspressen”, *Fertigungstechnik und Betrieb*, № 7, p. 151–161, 1971.

113. Ю. А. Бочаров, А. В. Сафонов, и А. Г. Овчинников, «Способ получения изделий», А.с. 638412 СССР, МКИ В 21 J 5/08. (СССР), № 2008609/25–27; Заявлено 19.03.74; Открытия. Изобретения. № 47, 1978.

114. Р. І. Сивак, та В. А. Огородніков, *Холодне комбіноване видавлювання*. Вінниця: ВНТУ, 2011.

115. В. Г. Шibaков, М. Н. Гончаров, и С. Н. Гончаров, «Влияние параметров управляемого поперечного выдавливания на образование дефектов в поковках ступенчатой формы», *Кузнечно-штамповочное производство. ОМД*, №8, с. 7–9, 2005.

116. В. А. Головин, А. Н. Митькин, и А. Г. Резников, *Технология холодной штамповки выдавливанием*. Москва: Машиностроение, 1970.

117. Д. А. Щербатов, и Ф. П. Михаленко, «Исследование напряженно-деформированного состояния и удельных нагрузок при осадке с кручением и без кручения образцов из алюминиевых сплавов», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, №10, с. 3–13, 2008.

118. Э. П. Басалаев, и Д. Э. Басалаев, «Проблемы интенсификации процессов холодной обработки металлов давлением», *Кузнечно-штамповочное производство*, №9, с. 20–23, 2000.

119. А. Б. Найзабеков, и В. В. Исаенко, «Анализ деформированного состояния и качества заготовок при ковке», *Известия вузов. Черная металлургия*, № 2, с.17–20, 1998.

120. В. А. Тюрин, «Дополнительные макросдвиги – технологические резервыковки», *Кузнечно-штамповочное производство*, №12, с. 8–9, 1993.

121. В. М. Сегал, В. И. Резников, и Д. А. Павлик, «Технологические особенностиковки–протяжки с продольным сдвигом бойков», *Кузнечно-штамповочное производство*, № 1, с. 8–10, 1980.

122. Г. Б. Строганов, О. А. Кайбышев, и О. Х. Фаткуллин, *Сверхпластичность при обработке материалов давлением*. Москва: Изд-во МААТИ-РГТУ, 2000.

123. А. А. Слобода, А. А. Круглов, и В. В. Астанин, «Комбинированное выдавливание защитной накладки для углепластиковой лопатки из ультрамелкозернистого титанового сплава», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 12, с. 13–17, 2014.

124. Г. Б. Строганов, И. И. Новиков, В. В. Бойцов [и др.], *Использование сверхпластичности в обработке металлов давлением*. Москва: Машиностроение, 1987.

125. В. З. Спусканюк, «Развитие теории и методов гидроэкструзии», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 206–215, 2002.

126. Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, и Б. М. Эфрос, *Физическая механика гидростатической обработки материалов*. Донецк: Дон. физ.-техн. ин-т им. А. А. Галкина НАН Украины, 2000.

127. В. Л. Калюжный, Е. Г. Бердов, Ю. Е. Шамарин, и Т. К. Стеценко, «Холодное выдавливание деталей сложной формы из алюминиевых сплавов», *Технология и организация производства*, №4, с. 4–6, 1989.

128. Ю. Г. Розов, *Технологии изготовления прецизионных трубчатых изделий холодным пластическим деформированием*. Херсон: Изд-во ХНТУ, 2013.

129. А. Ямамото, «Технологии точной объемной штамповки алюминия и стали и их применение», *Оборудование и инструмент для профессионалов*, №4, с. 4-8, 2005.

130. В. М. Авдеев, Л. Б. Аксенов, И. С. Алиев [и др.]; под ред. К. Н. Богоявленского, В. В. Риса, А. М. Шелестова, *Изготовление заготовок и деталей пластическим деформированием*. Ленинград: Политехника, 1991.

131. Н. М. Ёлкин, «Технология холодной раскатки точных заготовок», *Кузнечно-штамповочное производство*, №1, с. 20–22, 1995.

132. Н. П. Агеев, «Технологические возможности процессов объемной штамповки обкатыванием на сферодвижном прессователе. Предельные деформации», *Металлообработка*, №1, с. 25–31, 2002.

133. И. С. Алиев, и В. А. Матвийчук, «Развитие локальных методов обработки металлов давлением», *Обработка материалов давлением*, № 1 (19), с. 201–205, 2008.

134. L. I. Aliyeva, and V. A. Matvijchuk, “Development of technological process of flanges upsetting on tubular billets by face rolling”, *Produkcja i zarzadzanie w hutnictwie XIV Miedz. konf. Naukowa*, Czenstchowa, 2006, p. 132–136.

135. В. Г. Капорович, «Поиск новых технических решений в области обкатки трубчатых заготовок», *Вестник машиностроения*, №9, с. 49–54, 1983.

136. S. H. Zhang, and Z. R. Wang, “Some new features in the development of metal forming technology”, *J. Mater. Process. Technol*, №1, p. 39–47, 2004.

137. R. Balendra, and Y. Qin, “Research dedicated to the development of advanced metal-forming technologies”, *J. Mater. Process. Technol*, №2, p. 144–152, 2004.

138. И. И. Столяров, В. А. Ромашкин, А. А. Суслов, и Ф. П. Михаленко, «Холодная листовая и объемная штамповка в ОАО «Заволжский моторный завод», *Кузнечно-штамповочное производство*, №12, с. 11–15, 2000.

139. Э. П. Басалаев, Д. Э. Басалаев, и К. В. Краснов, «Эффект восстановления (возврата) пластических свойств металла при знакопеременном деформировании», *Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением*, с. 185–196, 2000.

140. В. Г. Шibaков, С. Н. Гончаров, и Р. В. Шibaков, «Интенсивное пластическое деформирование выдавливанием», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, №3, с. 31–33, 2004.

141. Р. З. Валиев, и И. В. Александров, «Парадокс интенсивной пластической деформации металлов», *Доклады РАН*, №1, с. 34–37, 2001.

142. Я. Е. Бейгельзимер, Д. В. Орлов, С. Г. Сынков [и др.], «Техника винтового прессования», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 324–327, 2003.

143. К. М. Иванов, Г. А. Данилин, П. М. Винник [и др.], «Формирование механических свойств деталей при обработке уширяющей экструзией», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, №5, с. 3–10, 2015.

144. А. Ф. Тарасов, А. В. Алтухов, Н. И. Даниленко, и Н. Д. Рудык, «Особенности использования процесса реверсивного сдвига для получения субмикроструктурных объемных заготовок», *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*, №1(40), с. 113–119, 2015.

145. А. В. Алифанов, Л. В. Захаревич, Е. М. Макушок, и Л. Д. Оленин, *Технологические процессы пластического деформирования в машиностроении*. Мн.: Наука и техника, 1989.

146. Ф. З. Утяшев, и А. К. Галимов, «Интенсивная пластическая деформация и структурообразование металла при равноканальном угловом прессовании», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, №11, с. 33–37, 2015.

147. А. К. Галимов, и Ф. З. Утяшев, «Моделирование структурообразования в металлах при интенсивной пластической деформации», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, №5, с. 18–22, 2013.

148. М. Ю. Семашко, В. Г. Шеркунов, и П. А. Чигинцев, «Моделирование в среде DEFORM микроструктуры металлических образцов, подвергнутых интенсивной пластической деформации», *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*, №1, с. 57–61, 2013.

149. Н. А. Шестаков, В. Н. Субич, и А. В. Шукшин, «Технология получения объемных заготовок с мелкозернистой структурой», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 8, с. 26–34, 2013.

150. Р. З. Валиев, *Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией*. Москва: Логос, 2000.

151. П. В. Бриджмен, *Исследование больших пластических деформаций*. Москва: Изд-во иностр. лит., 1955.

152. В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов, Д. А. Павлик, и В. Ф. Малышев, *Процессы пластического структурообразования металлов*. Минск: Наука и техника, 1994.

153. V. M. Segal, "Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion", *Materials Science and Engineering, A*, V.345, №1–2, p. 36–46, 2003.

154. В. Н. Варюхин, В. З. Спусканюк, Н. И. Матросов, А. Б. Дугадко, Б. А. Шевченко, Э. А. Медведская, Л. Ф. Сенникова, А. В. Спусканюк, и Е. А. Павловская, «Равноканальная многоугольная экструзия», *Физика и техника высоких давлений*, т.11, №1, с. 31–39, 2001.

155. Бейгельзимер Я. Е., Варюхин В. Н., Сынков С. Г. и др. «Новые схемы накопления больших пластических деформаций с использованием гидроэкструзии», *Физика и техника высоких давлений*, т. 9, №3, с. 109, 1999.

156. Y. Beygelzimer, D. Orlov, and V. Varyukhin, "New severe plastic deformation method: Twist Extrusion", *Ultrafine Grained Materials II; Ed. By Y.T. Zhu, T.G. Langdon, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, M.J. Saran, T.C. Lowe. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)*, p. 297–304, 2002.

157. Е. И. Разуваев, Д. В. Капитаненко; С. В. Выдумкина, и Н. А. Якушева, «Холодная пластическая деформация в процессах обработки металлов давлением», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 3, с. 19–25, 2016.

158. А. Н. Пасько, *Холодная объемная штамповка осесимметричных заготовок*. Тула: Изд-во ТулГУ, 2004.

159. В. И. Гусинский, «О возможностях процессов холодного прессования», *Разработка и исследование технологических процессов ОМД*, с. 45–56, 1968.

160. Л. Д. Оленин, «К выбору оптимальной заготовки под точную объемную штамповку», *Повышение точности и качества при штамповке*, с. 72–79, 1975.

161. Л. И. Алиева, и Р. С. Борисов, «Формообразование утолщений на полых и сплошных заготовках», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 262–267, 2003.

162. К. Н. Богоявленский, и В. В. Рис, *Экономические методы формообразования деталей*. Ленинград: Ленинград, 1984.

163. А. Л. Воронцов, *Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением*. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – ISBN 978–5–70038–3916–4.

164. Ф. П. Михаленко, А. М. Шнейберг, О. С. Кошелев [и др.], «Экспериментальное исследование деформированного состояния при комбинированном обратном выдавливании стаканов», *Кузнечно-штамповочное производство*, №3, с. 3–8, 2003.

165. С. Ю. Радченко, «Основные технологические процессы валковой штамповки», *Кузнечно-штамповочное производство*, №4, с. 18–30, 2003.

166. В. Н. Субич, В. А. Демин, Н. А. Шестаков, и А. В. Власов, *Штамповка с кручением*. Москва: МГИУ, 2008.

167. Е. И. Семенов [и др.], *Ковка и штамповка. В 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка*. Москва: Машиностроение, 1987.

168. И. С. Алиев, и В. В. Лапин, «Способ изготовления деталей типа втулок», *А. с. 1052306 СССР, МКИ В 21 J 5/10. /.* – № 3452440/25–27; Заявлено 11.06.82; *Открытия. Изобретения. № 41*, 1983.

169. Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров [и др.]; под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова, *Теория пластических деформаций металлов*. Москва: Машиностроение, 1983.

170. В. А. Евстратов, *Основы технологии выдавливания и конструирования штампов*. Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987.

171. R. Neugebauer, *Umform – und Zerteiltechnik*. Chemnitz: Fraunhofer–institut IWU, 2005.

172. И. С. Алиев, и О. В. Чучин, «Технологические процессы выдавливания с раздачей», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 328–334, 2003.

173. Ф. В. Гречников, А. М. Дмитриев, В. Д. Кухарь [и др.], *Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки*. Москва: Машиностроение, 1985.

174. В. Л. Калюжний, «Математичне моделювання процесу холодного видавлювання з протитиском стаканів методом скінчених елементів», *Наукові вісті Національного технічного університету України «КПІ»*, №4, с. 88 – 93, 2001.

175. Р. М. Коган, «Штамповка с противодавлением», *Конструирование и технология машиностроения*, № 2, с. 1–7, 1965.

176. А. К. Евдокимов, и К. А. Антонкина, «Комбинированное выдавливание с противодавлением», *Кузнечно-штамповочное производство. ОМД*, №12, с. 6–12, 2012.

177 К. Hayashi, and К. Osakada, “Extrusion of Scroll against counter pressure”, *60 Excellent Inventions in Metal Forming / Springer–Verlag. Berlin–Heidelberg*, p. 330–335, 2015.

178. Л. И. Алиева, «Процессы комбинированного пластического деформирования и выдавливания», *Обработка материалов давлением*, №1 (42), с. 100-108, 2016.

179. І. С. Алієв, А. А. Носаков, Л. І. Алієва, та М. В. Косенко, «Спосіб виготовлення порожнистих деталей з фасонною зовнішньою поверхнею», *Пат. 71184 Україна, В 21 К 5/00. – № 20031110738; заявл. 27.11.2003; Бюл. № 11, опубл. 15.11.2004.*

180. Л. І. Алієва, та Р. С. Борисов, «Спосіб видавлювання деталей зі складним профілем», *Пат. 8620 Україна, В21К21/00. – № 200500452; заявл. 17.01.2005, Бюл. №8, опубл. 15.08.2005.*

181. А. Д. Хван, «Разработка технологий обработки длинномерных заготовок на основе пластического кручения», дисс. канд. техн. наук, Воронеж, 2004.

182. А. Д. Хван, Д. В. Хван, А. В. Попов, и А. В. Токарев, «Влияние механо-термической обработки на снижение балла карбидной неоднородности», *Кузнечно-штамповочное производство*, №8, с. 29-30, 2008.

183. П. И. Ящерицын [и др.], *Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей*. Новополоцк: ПГУ, 1996.

184. А. С. Васильев, А. М. Дальский, С. А. Клименко и др, *Технологические основы управления качеством машин*. Москва: Машиностроение, 2003.

185. В. Ю. Блюменштейн, и М. С. Махалов, «Наследование остаточных напряжений поверхностного слоя в процессах поверхностного пластического деформирования», *Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*, №3, с. 41-48, 2015.

186. В. Ю. Блюменштейн, и М. С. Махалов, «Моделирование остаточных напряжений на стадиях жизненного цикла изделий», *Вестник машиностроения*, №12, с. 21-25, 2014.

187. В. Ю. Блюменштейн, и В. М. Смелянский, *Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин*. Москва: Машиностроение-1, 2007.

188. В. М. Смелянский, *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва: Машиностроение, 2002.

189. П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, и В. И. Аверченков, *Технологическая наследственность в машиностроении*. Мк.: Наука и техника, 1977.

190. Ф. В. Гречников, *Деформирование анизотропных материалов*. Москва: Машиностроение, 1998.

191. В. А. Огородніков, В. І. Музичук, та О. В. Нахайчук, *Механіка процесів холодного формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007.

192. В. Г. Капорович, *Обкатка металлоизделий в производстве*. Москва: Машиностроение, 1993.
193. В. М. Михалевич, *Тензорні моделі накопичення пошкоджень*. Вінниця: УНІВЕРСУМ - Вінниця, 1998.
194. Д. В. Хван, О. А. Розенберг, и Ю. А. Цеханов, «Исследование деформационной анизотропии металлов при немонотонном пластическом деформировании в условиях линейного напряжённого состояния», *Проблемы прочности*, №12, с. 53-56, 1990.
195. И. С. Алиев, Л. И. Девиченко, и К. Д. Махмудов, «Повышение качества процессов холодного поперечного выдавливания», *Повышение точности в холодноштамповочном производстве*, С. 50-55, 1981.
196. Р. И. Сивак, О. В. Сердюк, и И. О. Сивак, «Влияние немонотонности пластической деформации на напряжённое состояние», *Обработка металлов давлением*, №2(23), с. 3-7, 2010.
197. R. Sivak, “Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7 (90), p. 34-41, 2017.
198. В. А. Огородников, В. Б. Киселёв, и И. О. Сивак, *Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы)*. Винниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.
199. Р. И. Сивак, В. А. Огородников, та І. О. Сивак, «Визначення компонент тензора напружень при немонотонній пластичній деформації», *Вісник машинобудування та транспорту*, №1, с. 111-119, 2015.
200. Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, и В. Л. Мирошниченко, *Методы сплайн-функций*. Москва: Наука, 1980.
201. Р. И. Сивак, «Условие разрушения металлов при немонотонном деформировании», *Металлургическая и горнорудная промышленность*, №7 (272), с. 49-52, 2011.
202. Р. И. Сивак, «Пластичность металлов при немонотонном нагружении», на *VII Международной научно-технической конференции*

«Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии», Харьков, 18-20 ноября 2015, с. 39-41.

203. Г. Д. Дель, «Модель разрушения пластичных материалов», на *міжнар. наук.-техн. конф. «Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз»*, Вінниця, 2011, с. 28-29.

204. В. А. Огородников, «Развитие теории обработки материалов давлением и ее практическое применение в современных условиях» на *міжнар. наук.-техн. конф. «Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз»*, Вінниця, 2011, с. 26-27.

205. И. О. Сивак, Р. И. Сивак, и И. С. Алиев, «Деформируемость заготовок при радиальном выдавливании с контурной осадкой», *Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением*, с. 278-284, 2000.

206. Р. И. Сивак, И. Г. Савчинский, и И. О. Сивак, «Оценка предельных деформаций при немонотонном нагружении», *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування*, №62, с. 247 – 250, 2011.

207. Р. И. Сивак, та И. Г. Савчинский, «Оцінка граничних деформацій при немонотонному навантаженні», на *VI МНПК «Структурна релаксація в твердих тілах»*, Вінниця: ВДПУ, 22 – 24 травня 2018, с. 47-49.

208. Л. И. Алиева, «Проектирование процессов холодного выдавливания деталей с фланцами», *Научный вестник ДГМА*, №3 (21Е), с. 19-27, 2016.

209. Л. И. Алиева, *Пластическая деформация металлов: коллективная монография. Оценка и прогнозирование отклонений формы деталей при холодном выдавливании*. Днепропетровск: НМетАУ, 2014.

210. Л. И. Алиева, «Моделирование процесса комбинированного выдавливания фланцев на полых деталях», *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування*, № 1(76), с. 20–30, 2016.

211. Р. И. Сивак, О. В. Нахайчук, и И. О. Сивак, «Влияние геометрии траектории нагружения на пластичность», *Обработка материалов давлением*, №1 (26), с. 22-25, 2011.

212. И. О. Сивак, «Поверхность предельной пластичности», *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії*, с. 9-15, 1999.

213. И. О. Сивак, «Оцінка деформуємості пористих тіл», на міжнародному семінарі "Реологічні моделі та процеси деформування пористих і композиційних матеріалів", Луцьк, 1999, с. 37-40.

214. И. О. Сивак, М. В. Бабак, Р. И. Сивак, та Г. О. Лебедева, «Визначення компонент тензора напружень з урахуванням ефектів запізнення», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії*, с. 151-154, 2001.

215. В. А. Огородніков, та Р. И. Сивак, «Особенности оценки пластичности металлов і механіки немоного пластичного деформування», на X МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії», Харків: НТУ «ХПІ», 21-23 листопада 2018, с. 76-77.

216. М. Р. Короткина, «Об одной модели с памятью», *Прочность, пластичность и вязкоупругость материалов и конструкций*, с. 82-86, 1986.

217. В. А. Лихачев, С. Л. Кузьмин, и З. П. Каменцева, *Эффект памяти формы*. Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1987.

218. И. Г. Савчинский, А. А. Костава, и Р. И. Сивак, «Классификация металлических материалов по показателям памяти», на IV Міжнародні науково-практичної конференції «Структурна релаксація у твердих тілах», Вінниця, 29-31 травня 2012 р, с. 66-69.

219. И. О. Сивак, «Оцінка деформуємості пористих тіл при обробці тиском», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1 (2), с. 79-82, 1994.

220. И. О. Sivack, D. V. Sakharov, T. I. Babjuck, and R. I. Sivack, "The Determination of Prouosity Functions for Sintering Powder Materials", *Optimum*

Technologies, Technologic Systems and Materials in the Machines Building Field, TSTM-4, p. 170-175, 1998.

221. Р. И. Сивак, «Поверхность предельных деформаций материала основы пористого спечённого материала на основе меди», *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении*, с. 205-208, 2002.

222. И. О. Сивак, и Е. И. Коцюбивская, «Пластичность металлов при объёмном напряжённом состоянии», *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні*, с. 73 - 76, 2007.

223. В. А. Огородников, и И. О. Сивак, «Влияние гидростатического давления на пластичность при сложном нагружении», *Физика и техника высоких давлений*, №11, с. 33 – 37, 1983.

224. А. А. Костава, и И. О. Сивак, «Условие разрушения материалов, деформируемых при высоких гидростатических давлениях», *Физика и техника высоких давлений*, №13, с. 3 – 6, 1983.

225. Р. И. Сивак, и И. О. Сивак, «Пластичность металлов при сложном нагружении», *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування*, №60, с. 129-132, 2010.

226. А. А. Костава, В. А. Огородников, и И. Г. Савчинский, «Влияние объёмной схемы напряжённого состояния на пластичность», *Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением*, Вып. 4, с. 126-135, 1977.

227. В. А. Огородников, «Зависимость пластичности от инвариантов тензора напряжений при гидростатической обработке материалов» на *Всесоюзной конф. «Гидростатическая обработка материалов»*, Донецк: ДонФТИ, 1979, с. 30-31.

228. О. В. Нахайчук, и Р. И. Сивак, «Оценка пластичности металлов при объёмном напряжённом состоянии», *Вісник Хмельницького національного університету*, №5, с. 149-151, 2007.

229. Р. І. Сивак, О. В. Нахайчук, та В. А. Огородников, «Залежність пластичності металів від історії навантаження при об'ємному напруженому стані», *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки*, с. 79-83, 2009.

230. И. О. Сивак, В. А. Огородников, Р. И. Сивак, и В. Т. Ивацко, «Влияние геометрии траектории деформации на пластичность», *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії та машинобудуванні*, с. 5-8, 1999.

231. О. В. Нахайчук, «Методы расчёта процессов холодной обработки давлением», *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії та машинобудуванні*, с. 119-123, 2005.

232. С. И. Губкин, *Пластическая деформация металлов. Т1: Физико-механические основы пластической деформации*. Москва: изд. лит. по черной и цветной металлургии в 3 т, 1961.

233. В. А. Бабичков, «Об экспериментальных теоретических основаниях механической теории прочности», *Труды МИИТ*, с. 15-19, 1951.

234. И. О. Сивак, «Пластичность металлов при холодной пластической деформации», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 168-171, 2000.

235. В. А. Огородников, и И. О. Сивак, «Зависимость пластичности металлов от градиента пластических деформаций», *Изв. АН СССР. Металлы*, №6, с. 169 – 174, 1978.

236. И. О. Сивак, С. И. Сухоруков, и Е. И. Сивак, «Влияние неравномерности напряжённого состояния на пластичность», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 221-225, 2003.

237. И. О. Сивак, «Поверхность предельной пластичности», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 272 – 274, 2003.

238. І. О. Сивак, та Т. В. Ярошенко, «Зміцнення поверхневого шару металу у разі вдавлювання кульки», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №4 (91), с. 54-58, 2010.

239. Р. И. Сивак, «Влияние неравномерности пластической деформации на использованный ресурс пластичности», *Обработка материалов давлением*, №3(32), с. 40-43, 2012.

240. И. О. Сивак, «Пластичность металла при плоском напряжённом состоянии», *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении*, Вып.4, с. 254-257, 1998.

241. Р. І. Сивак, В. А. Огородников, та І. О. Сивак, «Вплив злому траєкторії деформації на пластичність», на *МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти»*, Київ: НТУУ «КПІ», 30 травня – 3 червня 2016 р., с. 19-21.

242. H. Dell, H. Gese, L. Kessler, H. Werner, and H. Hooputra, “Continuous Failure Prediction Model for Nonlinear Load Paths in Successive Stamping and Crash Processes”, *SAE-paper 2001-01-1131, New Sheet Steel Products and Sheet Metal Stamping (SP-1614). SAE 2001 World Congress, Michigan*, p. 113-122, March 5-8, 2001.

243. H. Hooputra, H. Gese, H. Dell, and H. Werner, “Comprehensive Failure Model for Crashworthiness Simulation of Aluminum Extrusions”, *IJ Crash*, Vol.9, No.5, p. 449-463.

244. В. А. Огородников, И. А. Деревенько, и Л. И. Алиева, *Ресурс пластичности металлов при холодном объёмном формоизменении*. Винница: ВНТУ, 2016.

245. В. А. Огородников, А. В. Грушко, и И. А. Деревенько «Моделирование процессов обработки давлением на основе гипотезы о силовом и кинематическом подобии параметров деформирования», *Обработка металлов давлением*, №4(34), с. 46–52, 2012.

246. V. A. Ogorodnikov, V. Ye. Perlov, and S. V. Voytkiv, “Control of technological heredity in the process of sheet-metal stamping in order to increase the

constructions safety”, *Visnyk of National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnical Institute” Series «Machine Building»*, №60, p. 133-137, 2010.

247. В. А. Огородников, и Н. А. Шестаков, «Деформируемость металла при ротационном обжатии», *Изв. ВУЗов. Машиностроение*, № 9, с. 147–152, 1975.

248. В. Л. Колмогоров, «К математическому моделированию динамики течения и разрушения металла при пластической деформации», *Математическое моделирование систем и процессов*, №9, с. 47-66, 2001.

249. В. А. Матвийчук, и И. С. Алиев, *Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов*. Краматорск: ДГМА, 2009.

250. Р. И. Сивак, Е. И. Коцюбивская, и И. О. Сивак, «Тензорная модель процесса накопления повреждений при немонотонном нагружении», *Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании’ 2012»*, Выпуск 4, Том 6, с. 14-20, 2012.

251. R. Syvak, K. Kotsubivska, Y. Burennikov, and I. Syvak, “Evaluation of ultimate strain during the process of lateral extrusion with further upsetting”, *Stiinta si ingineria materialelor: Buletinul institutului politehnic din Iasi*, Tomul LVII (LXI), Fasc. 4, p. 291-298, 2011.

252. Р. И. Сивак, и И. А. Деревенько, «Оценка пластичности металла при поперечном выдавливании с последующей осадкой», *Обработка материалов давлением*, №3 (36), с. 32-35, 2013.

253. Р. И. Сивак, и Е. И. Коцюбивская, «Пластичность металлов при немонотонном нагружении», *Наукові праці ВНТУ*, №1, с. 1-6, 2011. – URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/4627/247.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

254. Л. И. Алиева, И. А. Деревенько, и Р. И. Сивак, «Ресурс пластичности в процессах комбинированного выдавливания», *Обработка материалов давлением*, №1(34), с. 11-17, 2013.

255. В. А. Огородников, І. О. Сивак, та Р. І. Сивак, «Модельовання процесів немонотонної пластичної деформації», на *V міжнар. наук.-техн. конф. «Контроль і управління в складних системах» Том 1*, Вінниця, 1999, с. 195-197.

256. І. О. Сивак, «Оцінка деформуємості пористих тіл при обробці тиском», *Вісник ВПІ*, №1(2), с. 79-82, 1994.

257. М. А. Рвачев, и В. Д. Покрас, «Применение метода R-функций для экспериментально-расчетного исследования напряженного состояния и деформируемости в осесимметричных процессах ОМД», *Известия Вузов. Черная металлургия*, №11, 1991.

258. І. О. Sivas, “The evaluation of Deformability of the Porous Bodeis”, *The Bulletin of Polytechnic Institute of Iassy*, XLII(XLVI), №3-4, p. 607-611, 1996.

259. R. I. Sivak, “Evaluation of porous material plasticity when direct extruded”, *Stiinta si ingineria materialelor: Buletinul institutului politehnic din Iasi*, Tomul XLVIII (LII), Fasc. 3-4, p. 165-171, 2002.

260. Р. І. Сивак, та О. В. Карватко, «Дослідження процесу прямого видавлювання пористої заготовки», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 82-85, 2005.

261. В. А. Евстратов, «Состояние, направления развития и проблемы холодного и полугорячего выдавливания», *Кузнечно-штамповочное производство*, №10, с. 10-11, 1985.

262. И. С. Алиев, «Технологические процессы холодного поперечного выдавливания», *Кузнечно-штамповочное производство*, №6, с. 1-4, 1988.

263. Ю. А. Буренников, Л. Г. Козлов, Е. И. Сивак, и Р. И. Сивак, «Поперечное выдавливание пористой заготовки с использованием гидростатического давления», *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении*, с. 159-162, 2002.

264. Р. И. Сивак, и Е. И. Сивак, «Поперечное выдавливание с последующей осадкой пористой заготовки», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 276-280, 2003.

265. И. С. Алиев, «Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания», *Кузнечно-штамповочное производство*, №2, с. 7–10, 1990.

266. Л. И. Алиева, Р. И. Сивак, Е. И. Коцюбивская, и С. И. Сухоруков, «Оценка технологической деформируемости при поперечном выдавливании», на *МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта»*, Київ, НТУУ «КПІ», 29 червня – 1 липня 2017, с. 108-110.

267. Е. И. Коцюбивская, И. О. Сивак, Л. И. Алиева, и С. В. Куценко, «Оценка деформируемости заготовок при радиальном выдавливании с противодавлением», *Обработка материалов давлением*, №1 (19), с. 29-33, 2008.

268. И. С. Алиев, «Теоретический анализ процесса выдавливания фланцев с противодавлением», *Физика и техника высоких давлений*, Вып. 34, с. 42-46, 1990.

269. Л. І. Алієва, «Розвиток наукових основ і розробка ресурсосберігаючих процесів об'ємного формоутворення на основі способів комбінованого деформування», дис. докт. техн. наук, ДДМА, Краматорськ, Україна, 2018.

270. Р. І. Сивак, К. І. Коцюбівська, та С. І. Сухоруков, «Вплив протитиску, що створюється твердим середовищем, на деформівність заготовок при радіальному видавлюванні», *Вісник машинобудування та транспорту*, №2 (4), с. 101-108, 2016.

271. Д. В. Хван, *Повышение эффективности в обработке металлов давлением*. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1995.

272. Г. С. Писаренко, П. С. Берник, та Р. І. Сивак, *Технологічні методи підвищення надійності деталей машин*. Вінниця: Едельвейс і К, 2008.

273. Л. Г. Одинцов, *Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник*. Москва: Машиностроение, 1987.

274. И. О. Сивак, Е. И. Сивак, и С. И. Сухоруков, «Оценка пластичности металлов при холодной пластической деформации», *Известия ТулГУ. Серия:*

Механика твёрдого деформируемого тела и обработка металлов давлением, Вып. 2, с. 114-121, 2004.

275. R. I. Sivak, O. V. Serdiuk, and S. Z. Yablonska, "Evaluation of the metal surface layer plasticity in the process of surface plastic deformation", *Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi. Sectia: Stiinta si ingineria materialelor. Universitatea tehnica "Gh. Asachi", Din Iasi*, Tomul LV (LIX), Fasc. 3, p. 201-204, 2009.

276. И. С. Алиев, и Р. И. Сивак, «Оценка пластичности при поверхностной пластической деформации», *Известия ТулГУ. Сер «Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением»*, с. 150-156, 2004.

277. Г. А. Малыгин, «Самоорганизация дислокаций и локализация скольжения в пластически деформируемых кристаллах», *ФТТ*, т.37, №1, с. 3-42, 1995.

278. В. М. Браславский, *Технология обкатки крупных деталей роликами*. Москва: Машиностроение, 1975.

279. Р. И. Сивак, О. В. Карватко, и В. Т. Ивацко, «Накопление повреждений при поверхностной пластической деформации», *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, №1 (3), с. 18-20, 2006.

280. А. М. Тихонов, и А. А. Самарский, *Уравнение математической физики*. Москва: Наука, 1972.

281. Г. Кольський, и Д. Рейдер, «Волны напряжений и разрушение», *Разрушение. т. 1*, с. 570-608, 1973.

282. Р. І. Сивак, «Накопичення пошкоджень при імпульсному пластичному деформуванні поверхневого шару», *Вібрації в техніці та технологіях*, №2 (85), с. 47-50, 2017.

283. П. С. Берник, и Р. И. Сивак, «Улучшение механических характеристик проволоки путём виброобработки», *Вопросы вибрационной технологии*, с. 81-84, 2003.

284. В. П. Радченко, и М. Н. Саушкин, «Расчёт релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочнённом слое цилиндрического изделия в

условиях ползучести», *Вест. СамГТУ. Серия: Физико-математические науки*, №13, с. 61-74, 2001.

285. Р. И. Сивак, и И. О. Сивак, «Оценка релаксаций остаточных напряжений в поверхностном пластически деформированном слое», на *МНПК «Структурна релаксація у твердих тілах»*, Вінниця: ВДПУ, 26 – 28 травня 2015, с. 5-7.

286. Р. И. Сивак, «Схема напряженного состояния в поверхностном пластически деформированном слое», *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении*, с. 224-227, 2004.

287. В. П. Радченко, «Энергетический вариант одноосной теории ползучести и длительной прочности», *ПМТФ*, №4, с. 172-179, 1991.

288. П. С. Берник, и Р. И. Сивак, «Упрочнение проволоки поверхностным пластическим деформированием», *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 435-439, 2003.

289. Г. А. Смирнов-Аляев, *Сопротивление материалов пластическому деформированию*. Ленинград: Машиностроение, 1978.

290. И. С. Афтаназив, П. С. Берник, Р. И. Сивак, и А. Д. Клименко, *Вибрационно-центробежная обработка деталей машин*. Винница: ВГАУ, 2002.

291. Ю. И. Бабей, Б. И. Буталов, и В. Г. Сысоев, *Поверхностное упрочнение металлов*. Киев: Наукова думка, 1995.

292. Р. И. Сивак, и О. В. Карватко, «Особенности оценки пластичности металлов при поверхностной пластической деформации», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 93-95, 2007.

293. В. М. Смелянский, Ю. Г. Калпин, и В. В. Баринов, «Исчерпание запаса пластичности металла в поверхностном слое деталей при обработке обкатыванием», *Вестник машиностроения*, №8, с. 34-38, 1990.

294. Р. И. Сивак, «Поверхностная пластическая деформация проволоки при вибрационно упрочняющей обработке», на 49-ой МНТК «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров», Москва: МГТУ «МАМИ», 23 – 24 марта 2005, с. 13-15.

295. О. В. Сердюк, І. О. Сивак, С. І. Сухоруков, та Р. І. Сивак, «Оцінка пластичності поверхневого шару металу при немонотонному навантаженні», *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»)*, Випуск 54, с. 277-281, 2016.

296. О. В. Сердюк, І. О. Сивак, та М. А. Карватко, «Напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика», *Наукові нотатки*, Вип. 40, с. 251-256, 2013.

297. В. А. Огородников, А. В. Грушко, Н. В. Бабак, и Р. И. Сивак, «Прогнозирование технологического наследия в современных технологиях обработки давлением», *Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды Кременчугского государственного политехнического университета*, Випуск 1 (10), с. 370-375, 2001.

298. О. А. Розенберг, В. В. Мельниченко, и С. Ф. Студенец, «Процесс формообразования крутоизогнутых отводов методом холодного пластического деформирования», на конф. «Высокие технологии в машиностроении», Алушта-Харьков: ХГПУ, сент. 1997, с. 46-51.

299. Б. А. Глаговский, и И. Б. Московенко, *Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении*. Ленинград: Машиностроение, 1977.

300. С. А. Сорока, П. С. Берник, и Р. И. Сивак, «Влияние акустических колебаний на механические характеристики стали», *Вібрації в техніці та технологіях*, №4 (42), с. 72-75, 2005.

301. Э. П. Белозерова, «Движение дислокаций в щелочно-галлоидных кристаллах в ультразвуковом и электрическом полях», *Динамика дислокаций*, с. 218-224, 1975.

302. Л. Д. Ландау, и Е. М. Лифшиц, *Теоретическая физика. в 10 т. Т. VI. Гидродинамика*. Москва: Наука, 1986.

303. П. С. Берник, и Р. И. Сивак, «Вибрационно-центробежная установка для упрочнения проволоки», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 590-593, 2005.

304. Я. Г. Пановко, и И. И. Губанова, *Устойчивость и колебания упругих систем*. Москва: Наука, 1987.

305. В. Л. Колмогоров, *Механика обработки металлов давлением*. Москва: Металлургия, 1980.

306. Ю. Г. Калпин, В. И. Перфилов, П. А. Петров, В. А. Рябов, и Ю. К. Филиппов, *Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением*. Москва: Машиностроение, 2011.

307. Я. Г. Жбанков, О. Е. Марков, и Р. И. Сивак, «Влияние формы и размеров заготовки на напряженно-деформированное состояние в процессе осадки», *Технология производства металлов и вторичных материалов*, №1 (23), с. 109-117, 2013.

308. В. М. Сегал, В. И. Резников, А. Е. Дробышевский, и В. И. Копылов, «Пластическая обработка металлов простым здвигом», *Изв. АН СССР. Металлы*, №1, с. 115-123, 1981.

309. И. Г. Савчинский, Р. И. Сивак, и Е. И. Коцюбивская, «Тенденции развития методов пластического деформирования труднодеформируемых сталей и сплавов», *Перспективы инновационного и конкурентноспособного развития кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств. Сборник докладов и научных статей XI Конгресса «Кузнец-2012»*, с. 345-352, 2012.

310. Г. Д. Дель, *Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости*. Москва: Машиностроение, 1971.

311. В. А. Огородников, О. В. Нахайчук, и В. И. Музычук, «Исследование процесса закатки поршня с шатуном аксиально-роторного поршневого насоса», *Проблеми трибології*, № 1(34), с. 129-133, 2005.

312. О. В. Нахайчук, В. А. Огородников, В. И. Музычук, Р. И. Сивак, и Е. В. Солоня, «Деформируемость заготовок в процессе закатки пары поршень-шатун аксиально-роторного поршневого насоса», *Вібрації в техніці та технологіях*, №1 (50), с. 41-44, 2008.

313. Ю. А. Буренников, И. О. Сивак, и Е. И. Сивак, «Зависимость пластичности от схемы напряжённого состояния при плоском напряжённом состоянии», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 272-274, 2003.

314. Р. И. Сивак, В. А. Огородников, и И. О. Сивак, «Оценка пластичности металла при холодном двухэтапном деформировании», *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Машинобудування», №3 (78), с. 96-100, 2016.

315. И. С. Алиев, И. О. Сивак, и Р. И. Сивак, «Пластичность металла при многократной холодной деформации с промежуточными отжигами», *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении*, Вып. №4, с. 203-207, 1998.

316. Ю. А. Алексеев, *Вопросы пластического течения металлов*. Харьков, 1986.

317. И. О. Сивак, В. А. Огородников, Р. И. Сивак, и А. Я. Мысловский «Ресурс пластичности заготовок при последовательных операциях пластического формоизменения», *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении*, с. 29-33, 2000.

318. И. О. Сивак, В. А. Огородников, Р. И. Сивак, и И. С. Алиев, «Оценка использованного ресурса пластичности при комбинированном выдавливании с промежуточными отжигами», *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*, с. 165-167, 2000.

319. И. О. Сивак, И. А. Гоцуляк, Р. И. Сивак, и А. Л. Мазуренко, «Применение промежуточных отжигов для повышения несущей способности

деталей, получаемых обработкой давлением», *Захист металургійних машин від поломок*, Випуск №6, с. 194-197, 2002.

320. С. С. Яковлев, В. И. Трегубов, и Д. В. Дудка, «Технологии изготовления осесимметричных деталей ротационной вытяжкой», *Известия ТулГУ; Серия: Технологии и оборудование для обработки металлов давлением*, Вып. 3, с. 121-127, 2010.

321. Л. Г. Юдин, В. А. Коротков, и Н. А. Горюнова, «О предельных возможностях формоизменения при многооперационной ротационной вытяжке», *Кузнечно-штамповочное производство*, №10, с. 24-26, 1998.

322. Г. Д. Дель, и В. И. Корольков, «Моделирование операций ротационной вытяжки с утоншением», *Кузнечно-штамповочное производство*, №3, с. 23, 1996.

323. И. С. Алиев, и В. А. Матвийчук, «Классификация и области применения локального ротационного деформирования», *Обработка материалов давлением*, №1 (22), с. 137-143, 2010.

324. О. В. Грушко, «Діагностування граничного формозмінення листових матеріалів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 111-115, 2008.

325. Е. И. Шевчук, Р. И. Сивак, и С. И. Сухоруков, «Оценка использованного ресурса пластичности металла при ротационной вытяжке конических заготовок», *Обработка материалов давлением*, №2 (43), с. 93-97, 2016.

326. Л. І. Алієва, Х. В. Гончарук, О. В. Шкіра, та Р. І. Сивак, «Спосіб виготовлення порожнистих виробів типу стакана», *Патент UA 107950 U, МПК В21К 21/00. / - №201513100; заявл. 30.12.2015; бюл. №12, опубл. 24.06.2016.*

327. Л. Н. Соколов и др. *Кузнецу штамповщику, справ. пособие*. Донецк: Донбасс, 1986.

328. І. С. Алієв, І. Г. Савчинський, Л. І. Алієва, та К. І. Сивак, «Спосіб видавлювання порожнистих деталей», *Патент UA 67977 A, МПК В21К 21/00. / - № 2003077078; заявл. 15.07.2004, бюл. № 7, опубл. 15.07.2004.*

329. Р. И. Сивак, «Оценка напряженного состояния с учетом анизотропии свойств деформированного металла в условиях сложного нагружения», на IX МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії», Харків: НТУ «ХПІ», 22-24 листопада 2017, с. 62-63.

330. Пейман Абхари, Л. І. Алієва, Р. І. Сивак, та А. А. Єршоміна, «Спосіб виготовлення деталей з фланцем», Патент UA 116545 U, МПК B21J 5/00. / - №201612411; заявл. 06.12.2016, бюл. №10, опубл. 25.05.2017.

331. П. Б. Абхари, Р. И. Сивак, Л. В. Таган, и К. В. Малий, «Моделирование процесса закрытого радиального выдавливания фланца с редуцированием», *Обработка материалов давлением*, №2 (45), с. 17-21, 2017.

332. И. С. Алиев, «Способ изготовления изделий радиальным выдавливанием», *А. с. 795693 B21J 5/00 / № 2336296/25-27. Заяв. 18.03.76.. Бюл. № 2*, Опубл. 15.01.81

333. Р. И. Сивак, «Оценка пластичности металлов при немонотонном деформировании», на IX МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ-Херсон, 2018, с. 105-106.

334. Р. И. Сивак, «Розвиток наукових основ розробки технологічних процесів холодного немонотонного пластичного деформування», на VIII МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ-Херсон, 2017, с. 168-169.

335. Л. В. Прозоров, А. А. Костава, и В. Д. Ревтов, *Прессование металлов жидкостью высокого давления*. Москва: Машиностроение, 1972.

336. Б. И. Береснев, К. И. Езерский, Е. В. Трушин, Б. И. Каменский; ред. Г. В. Кудрюмова, *Высокие давления в современных технологиях обработки материалов*. Москва: Наука, 1988.

337. В. К. Лобанов, А. А. Гулюк., и В. Л. Калюжный, «Гидропрессование – способ повышения работоспособности тяжело нагруженных деталей», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*, №8, с. 18-21, 2004.

338. В. Л. Калюжний, «Холодне видавлювання порожнин штампів, пресформ та ливформ в умовах високих гідростатичних тисків», *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні*, с. 66-69, 2002.

339. В. В. Воинов, Ю. Н. Гойхенберг и др. «Технология производства заготовок немагнитных бандажных колец для турбогенераторов из коррозионностойкой стали», на *I всесоюзной конференции по высокоазотистым сталям*, Киев, 1990, с. 411 - 413.

340. А. Г. Токарев, И. Г. Савчинский, и Р. И. Сивак, «Деформационное упрочнение заготовок бандажированных колец турбогенераторов мощностью 500 МВт», *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов*, №4 (25), с. 94-98, 2010.