

Вінницький національний аграрний університет
Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЧАЙКА ДМИТРО СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.7.016.2

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ВАЛЬЦЮВАННЯ
ЗАГОТОВОК З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ ЇХ
РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ**

05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ (Д. С. Чайка)

Науковий керівник: **Скрябін Семен Олександрович**, доктор технічних наук,
професор

Вінниця – 2019

АНОТАЦІЯ

Чайка Д.С. Удосконалення процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів із забезпеченням їх раціональних технологічних параметрів. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском». – Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, 2019. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.

Дисертаційна робота присвячена актуальним науково-технічним завданням з удосконалення заготівельної фази виробничого процесу отримання штампованих поковок за рахунок використання маловідходних технологічних процесів вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів, що полягає в максимальному наближенні форми та розмірів заготовки до форми та розмірів готових деталей. Метою роботи є підвищення довговічності виробів подовженої форми, виготовлених із заготовок з алюмінієвих сплавів, на основі визначення раціональних конструктивних, геометричних та фізико-механічних параметрів процесів формозміни та їх комплексного впливу на технологічні характеристики деталей.

В якості теоретичних методів дослідження використані методи математичної і прикладної теорії пластичності, векторної графіки, математичної статистики, а також метод скінченних елементів, що застосовується в спеціалізованому програмному комплексі QForm3D. Експериментальні дослідження процесу деформування виконувались за використанням методів фізичного моделювання та тензометрії, оптичної і електронної мікроскопії. Для обробки масивів даних, отриманих за математичним експериментом, використовувалися статистичні методи.

За виконаним літературним аналізом визначено, що гаряче вальцювання використовується для отримання фасонних заготовок з площами поперечних перерізів, що максимально наближені до розмірів та форми штампованих поковок. Це дозволяє зменшити норму витрат металу, підвищити стійкість штампів, скоротити витрати штампової сталі та електроенергії на виконання операції штампування, а також зменшити трудомісткість виготовлення штампованих поковок та підвищити норми

виготовлення. Аналіз існуючих схем вальцювання показав, що ковзання металу в поперечному напрямку з появою поперечних сил тертя, спричиняє розширення, яке має як негативний, так і позитивний вплив на процес формоутворення.

Розширення виникає як наслідок закону найменшого опору, що визначає інтенсивність витікання металу з осередку деформування в напрямку вільних поверхонь за рахунок вертикального обтиску та є функцією багатьох факторів. Аналіз існуючих методів з розрахунків розширення, дозволив встановити, що найбільш придатними та базовими для досліджень є ті, що засновані на використанні законів механіки деформовного тіла та враховують найбільшу кількість параметрів процесу.

При вальцюванні заготовок круглого перерізу в гладких валках або в калібрах спостерігається неповне охоплення периметра поперечного перерізу заготовки. Це відбувається через те, що контактна поверхня зазвичай трохи менша за ширину заготовки, що прокатується, та бічні ділянки поперечного перерізу заготовки не зазнають безпосереднього обтиснення. Ці бічні обсяги заготовки є позаконтактними зонами та суттєво впливають на характер течії металу в осередку деформації, кінематику і динаміку процесу прокатування. Одною з причин, за якою, розрахунок розширення, дає суттєві відхилення, є відсутність в формулах для розрахунку розширення врахування впливу позаконтактних зон.

При деформуванні в умовах наближених до ізотермічних, розширення і випередження за постійного ступеня обтиску практично не змінюється, а зміна ступенів деформації призводить до зміни його абсолютних значень, тому дослідження напружено-деформованого стану та геометрії осередку деформування за цих умов, також спрямовано на удосконалення процесу вальцювання.

Аналіз раніше розроблених систем проектування ТП вальцювання показав, що головною проблемою при створенні автоматизованої системи є відсутність єдиного алгоритму для розрахунку ТП вальцювання і неможливість формалізації процесу розрахунку деяких технологічних операцій, що надає потребу в розробленні нової САПР, в розрахунках якої враховуються вплив параметрів, що досліджуються в роботі, на точність вальцювання.

Використання теоретичних методів розрахунку, що засновані на дослідженні параметрів осередку деформування при вальцюванні за методом скінченних елементів, дозволяє визначати напружено-деформований стан. Геометричні параметри деформованих заготовок отримувались за допомогою вимірювання перерізів осередку деформування у векторному форматі. Розміри фактичного осередку деформування визначалися за величиною полів швидкостей деформації.

Оцінка деформовності при вальцюванні в області позаконтактних зон була виконана за допомогою побудови траєкторій деформування та діаграм пластичності. Можливість бездефектного вальцювання, коли метал зазнає складного навантаження, була підтверджена через оцінювання використаного ресурсу пластичності за модифікованим критерієм В. О. Огороднікова, що враховує істотний вплив похідної від шляху деформування на заліковування дефектів.

Розроблено методику теоретичного оцінювання силових параметрів процесу вальцювання різних алюмінієвих сплавів, за якою отримується поправний коефіцієнт K_{σ} , що враховує напружений стан деформованого металу та вплив ширини заготовки на питомий тиск під час вальцювання, у проміжку температур 420...470°C. Це дозволяє за більшим значенням зусилля деформування, здійснювати автоматизований вибір моделі кувальних вальців.

Теоретичні дослідження процесів прокатування прямокутних заготовок з різною формою та розмірами позаконтактних зон у гладких валках дозволили встановити наявність явища утягнення за невеликих обтисненнях, коли деформація не проникає в центральні зони. Це супроводжується тим, що поперечна деформація поширюється тільки в поверхневих шарах без розширення центральних, а лінійний показник розширення позаконтактних зон $(\Delta b/\Delta h)_{ПЗ}$ досягає негативних значень. Для заготовок з різною формою позаконтактних зон спостерігається різне розширення (найбільше - у заготовок з прямокутними позаконтактними зонами), що відображає їх істотний вплив на поздовжню і поперечну деформації та визначає необхідність врахування їх впливу при розрахунку калібрів для вальцювання.

Для операцій вальцювання заготовок циліндричного перерізу в гладких валках, теоретично досліджено напружено-деформований стан в перерізі осередку дефор-

мування у випадках наявності або відсутності в заготовках позаконтактних зон. У випадках, коли заготовки зазнають деформування менші за 40...50%, відсутність позаконтактної зони значно покращує рівномірність напружено-деформованого стану в осередку деформування та полегшує течію металу в поперечному напрямку, а розрахунок відносного лінійного розширення буде залежити також від впливу, що надають позаконтактні зони. Тобто, лінійний показник розширення $\Delta b/\Delta h$ за всіх інших рівних умов, є суттєво вищим за показник розширення контактних ділянок, які не мають позаконтактних зон. Він не сприяє покращенню течії металу в повздовжньому напрямку. В заготовках без позаконтактних зон по досягненню ступеня деформування 40...50%, утворюється позаконтактна зона, що викликає появу поперечних сил зчеплення, спричиняє більшу нерівномірність та ймовірність появи дефектів в осередку деформування порівняно з тими заготовками, в яких позаконтактна зона утворювалась поступово з самого початку процесу деформування.

Теоретичні дослідження геометричних параметрів операцій вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах, показали зростання розширення а також вплив на нього позаконтактних зон зі збільшенням кривизни калібру та діаметру заготовок. Запропоновано механізм виконання розрахунку розширення за розробленою моделлю деформування циліндричних заготовок за наявності або відсутності позаконтактних зон в овальних калібрах. В рекомендованих для вальцювання за схемою круг-овал інтервалах $1,25 \leq \lambda \leq 1,8$, коефіцієнт впливу позаконтактних зон на розширення перевищує 10% від розміру загального коефіцієнту нерівномірності деформування, що дає підставу окремо виділити розрахунок залежності розміру розширення від впливу позаконтактних зон.

Для випадків вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів в умовах наближених до ізотермічних, дослідження показали зменшення розміру розширення завдяки зменшенню нерівномірності розподілу температури на 5...20°C, що спричиняє вирівнювання напружено-деформованого стану за всього об'єму заготовки. Отримано залежності впливу цих умов на розширення при вальцюванні та показано, що умови деформування, які наближені до ізотермічних, сприяють збільшенню роз-

мірів фактичного осередку деформування на 13...15%, підвищенню пластичності в зоні деформованого металу та поліпшенню умов протікання процесу вальцювання.

Експериментальні дослідження показали, що використання удосконалених залежностей для обрахунку раціональних розмірів вальцювальних калібрів забезпечує глибше проникнення деформації в центральні зони заготовки, що вальцюється, з подрібненням та орієнтуванням зернят, покращенням його структури та загальної точності вальцювання. Розроблено методику, за якою прогнозування появи дефектів при штампуванні в остаточному рівчаку після операцій вальцювання та деформування у підготовчому рівчаку, виконується за допомогою моделювання, що покращило відповідність розмірів заготовки до геометрії підготовчого рівчака.

Розроблено програмно-методичний комплекс автоматизованого розрахунку калібрів та створення тривимірних моделей вальцювальних секторів з забезпеченням їх раціональних розмірів за використанням залежностей, що досліджувались в роботі. Результати роботи комплексу включають наступні етапи: отримання значень площ поперечних перерізів штампованої поковки; визначення параметрів заготовки, що вальцюється; визначення кількості переходів та системи калібрів; розрахунок системи калібрів; побудова параметричних тривимірних моделей вальцювальних секторів та вихідної заготовки в CAD-системі.

Рекомендації з для поліпшення процесів формоутворення при розрахунку операцій обробки тиском складних заготовок були передані для впровадження на ПАТ ЕМСС (м. Краматорськ). Розроблений програмно-методичний комплекс системи автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання було впроваджено на ПП НВЦ «Ухналь» (м. Київ). Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені у вигляді навчального посібника та використовуються в навчальному процесі на кафедрах «Обробка металів тиском» та «Комп'ютеризований дизайн і моделювання процесів і машин» Донбаської державної машинобудівної академії при викладанні дисципліни «Гаряче об'ємне штампування».

Ключові слова: вальцювання, штампування, калібри, розширення, позаконтактні зони, підготовчий рівчак, метод скінченних елементів, апроксимація, напружено-деформований стан, використаний ресурс пластичності, заготовка.

ABSTRACT

Chaika D. S. Influence of the noncontact zones of blanks rolling from aluminum alloy on expansion. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the candidate of technical science degree, specialty 05.03.05 «Processes and Machines of plastic working». - Vinnitsa National Agrarian University, Vinnitsa. 2019. - Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa. 2019.

The dissertation is devoted to actual scientific and technical tasks for improvement of the procurement phase of the stamped forgings production process due to the maximum approximation of the workpiece and finished parts shape and size. The work is aimed at increasing of the durability elongated products made from billets of aluminum alloys, based on the determination of theirs rational design, geometric and physico-mechanical parameters of shaping processes and their complex influence on the technological characteristics of parts.

As theoretical methods of research, methods of mathematical and applied theory of plasticity, vector graphics, mathematical statistics, as well as the finite element method, implemented in the specialized software complex QForm3D, were used. Experimental research of the deformation process were performed using the methods of physical modeling and strain gauging, optical and electronic microscopy. Statistical methods were used for the processing of obtained from the mathematical experiment data arrays.

According to the performed literature analysis, it is determined that hot rolling is used to obtain shaped billets with cross-sectional areas that are as close as possible to the size and shape of stamped forgings. This can reduce the cost of metal, increase the resistance of dies, reduce the cost of die steel and electricity to perform the stamping operation as well as reduce the labor content of stamped forgings manufacturing and to increase production rates. An analysis of existing rolling schemes showed that the metal slipping in the cross direction with the transverse friction forces appearance, causes expansion, which has both a negative and a positive effect on the forming process.

Broadening occurs as a consequence of the least resistance law, which determines the intensity of the of metal outflow from the deformation zones in the direction of free surfaces due to vertical compression and is a function of many factors. The analysis of ex-

isting methods for broadening calculations, allowed to establish, that the most suitable and basic for research are those based on applying of the laws of deformation body mechanics and considers the most number of process parameters.

When rolling the workpieces of a round cross section in smooth rolls or in calibers, there is an incomplete coverage of the perimeter of the cross section of the workpiece. This is because the contact surface is usually slightly smaller than the width of the rolled workpiece and the side sections of the workpiece cross section are not subject to direct compression. These side volumes of the workpiece are non-contact zones and significantly affects the metal flow character in deformation zone, kinematics and dynamics of the rolling process. One of the reasons why the broadening calculation gives significant deviations is the lack of formulas for broadening calculation of non-contact zones influence.

When deformation under conditions close to isothermal, broadening and leading with constant compression degree practically does not change, and the change of deformation degrees leads to change of its absolute values, therefore research of a stress-strain state and deformation zone geometry in these conditions, is also directed on rolling process improvement.

The analysis of previously developed rolling technological processes designing systems showed, that the main problem in creating an automated system is the lack of a unified algorithm for rolling technological processes calculating and the impossibility of formalizing the process of calculating some technological operations, which requires the development of a new CAD, which calculates the influence of the parameters studied in the work on the rolling accuracy.

The use of theoretical calculation methods, based on the study of deformation zone parameters during rolling with the finite element method, allows us to determine the stress-strain state. The geometric parameters of the deformed workpieces were obtained by measuring the deformation zone cross sections in a vector format. The dimensions of the actual deformation zone are determined by the strain rate fields size.

The evaluation of deformability during rolling in the non-contact zones region was performed by deformation trajectories and plasticity diagrams building. The possibility of defect-free rolling, when the metal is subjected to complex loading, has been confirmed by

evaluation of the used plasticity resource according to the modified Dr. Ogorodnikov criterion, which takes into account the significant influence of the path of deformation derivative on the defects repair.

The methodology of theoretical estimation of power parameters of the rolling process of different aluminum alloys is developed, according to which is obtained a correction factor K_{σ} , which takes into account the deformed metal stress state and the influence of the workpiece width on the specific pressure during rolling in the temperature range 420...470°C. It allows for a greater deformation force value, to carry out automated choice of forging rolls model.

Rolling rectangular workpieces with different shapes and sizes of non-contact zones of in smooth rolls processes theoretical researches, allowed to establish the fact of tightening under small compression, when the deformation does not penetrate into the central zones. This goes with the fact that the transverse deformation spreads only in the surface layers without the central ones broadening, and the linear non-contact zones broadening mark $(\Delta b/\Delta h)_{UZ}$ reaches negative values. There is a different broadening for the workpieces with different shapes of non-contact zones, (mostly in workpieces with rectangular non-contact zones), which reflects their significant effect on the longitudinal and transverse deformations and determines the necessity to take into account their influence in the calibration calculation.

For rolling operations of cylindrical section workpieces in smooth rolls, the stress-strain state in the deformation zone cross section in cases of presence or absence of non-contact zones in workpieces is theoretically researched. In cases where the workpieces are subjected to deformation less than 40...50%, the absence of the non-contact zone significantly improves the uniformity of the deformation zone stress-strain state and facilitates metal flow of in the transverse direction, and the calculation of the relative linear broadening will also depend on the non-contact zone influence. That is, the linear broadening mark $\Delta b/\Delta h$ under all other equal conditions is considerably higher than the contact areas, which do not have non-contact zones, broadening. It does not contribute the metal flow in longitudinal direction. In workpieces without non-contact zones, upon reaching the deformation degree of 40...50%, a non-contact zone is formed, that causes the appearance of transverse

adhesion forces, causing greater unevenness and the probability of deformation zone defects occurrence compared to those workpieces where the non-contact zone was formed gradually.

Theoretical studies of the geometric parameters of cylindrical workpieces in oval calibers rolling operations showed a broadening growth and also the influence of non-contact zones on it, with a caliber curvature and workpieces diameter growth. The mechanism of calculating of broadening according to developed model of the cylindrical workpieces deformation in the presence or absence of non-contact zones in oval calibers is proposed. In recommended intervals $1,25 \leq \lambda \leq 1,8$ for rolling according to the circle-oval scheme, the coefficient of non-contact zones influence for broadening exceeds 10% of the size of the general coefficient of deformation unevenness, which gives the ground to separately distinguish the calculation of the broadening size dependence from non-contact zones impact.

For cases of rolling aluminum workpieces in conditions close to isothermal, the researches, have shown a broadening size reduction due to the temperature unevenness distribution reduction by $5 \dots 20^\circ \text{C}$ and, which results in the stress-strain state alignment throughout the workpiece volume. Dependences of these conditions influence on broadening during rolling are obtained, and it is shown that deformation conditions, which are close to isothermal, increase an actual deformation zone size by $13 \dots 15\%$, increase the plasticity in the deformed metal zone and improve rolling process conditions.

The experimental study have shown that the improved dependencies using for rational dimensions of rolling calibers calculating, provides a deeper penetration of the deformation into the rolling workpiece central zones, causing grains grinding and orientation, improving its structure and the general rolling accuracy. A technique was developed to predict defects appearance when stamping in the final stream after rolling and deforming in final stream operations, performed using simulation, which improved the workpiece and preparatory stream conformity.

The program-methodical complex of automated calibers calculation and creation of three-dimensional rolling sectors models with the their rational dimensions provision, due to the dependencies investigated in the work using, was developed. The results of the

complex include the following steps: the areas of forged forgings cross sections values obtaining; rolling workpiece parameters determination; the number of transitions and system of calibres determination; calibration system calculation; building of parametric three-dimensional rolling sector models and CAD-system initial workpieces.

Recommendations for the shaping processes improvement while hot deformation processes calculation were passed for implementation at PJSC EMCS (Kramatorsk). The developed program-methodical complex of the system of computer-aided designing of the rolling technological process was implemented at the NPC of Scientific and Production Center Ukhna (Kyiv). The results of theoretical and experimental researches are implemented in the form of a manual and are used in the educational process in practical, laboratory and design work of students at the departments of "Processing of metals by pressure" and "Computerized design and modeling of processes and machines" of the Donbass State Machine-Building Academy when teaching the discipline "Hot volume stamping".

Keywords: rolling, stamping, broadening, non-contact zones, preparatory stream, finite element method, approximation, stress-strain state, used resource of plasticity, workpiece.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] С. А. Скрябин, Н. Н. Барабой и Д. С. Чайка, «Определение контактной площади при вальцовке заготовок, с учетом развития деформации во времени», *Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение*, № 49, с. 18 – 22, 2006.
- [2] С. А. Скрябин, Л. В. Швец и Д. С. Чайка, «Исследование течения металла в переходной и установившейся зонах при вальцовке заготовок в очаге деформации, с учетом развития деформации во времени», *Технологические системы*, № 4, с. 32 – 38, 2006.
- [3] С. А. Скрябин, В. Н. Полохов, Д. С. Чайка и Л. В. Швец, «Автоматизация расчета калибров для вальцовки под штамповку», *Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение*, № 50, с. 59 – 69, 2007.
- [4] С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Влияние формы и размеров внеконтактных зон вальцуемых заготовок на уширение», *Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение*, № 50, с. 192 – 199, 2007.
- [5] С. А. Скрябин, В. Л. Калюжный и Д. С. Чайка, «Влияние внеконтактных зон на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок в гладких валках», *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, № 3Е (14), с. 47 – 55, 2008.
- [6] С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Влияние внеконтактных зон вальцуемых заготовок на размеры фактического очага деформации», *Обработка металлов давлением: сб. науч. трудов*, № 2 (21), с. 220 – 226, 2008.
- [7] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, Д. С. Чайка и И. А. Бубновская, «Определение возможности появления дефектов при штамповке поковок с применением процесса вальцовки и подготовительных ручьев», *Обработка металлов давлением: сб. науч. трудов*, № 3 (24), с. 76 – 81, 2010.
- [8] С. А. Скрябин, И. В. Гунько и Д. С. Чайка, «Изготовление на ковочных вальцах заготовок удлиненной формы из алюминиевых сплавов», *Обработка ме-*

талов давлением: сб. науч. трудов, № 1 (26), с. 134 – 138, 2011.

[9] С. А. Скрыбин, И. В. Гунько, И. А. Бубновская и Д. С. Чайка, «Изготовление на ковочных вальцах заготовок из алюминиевых сплавов первой группы классификатора», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*, № 8, с. 18 – 20, 2011.

[10] Д. С. Чайка, А. Ф. Тарасов, А. А. Сидоров и М. А. Винников, «Автоматизация разработки чертежа вальцованной заготовки», *ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. праць*, № 1 (12), с. 315 – 323, 2011.

[11] С. А. Скрыбин, И. В. Гунько, Д. С. Чайка и И. А. Бубновская, «Исследование сопротивления деформации при вальцовке заготовок», *ВНАУ зб. наук. праць. Технічні науки*, № 6, с. 104 – 110, 2011.

[12] С. А. Скрыбин, И. В. Гунько и Д. С. Чайка, «Исследование сопротивления деформации при вальцовке заготовок из сплавов АК6, АК8, АМГ и АМЦ», *Научный вестник ДГМА*, № 1 (9Е), с. 176 – 185, 2012.

[13] С. А. Скрыбин и Д. С. Чайка, «Исследование методов аппроксимации зависимостей коэффициентов уширения и опережения при вальцовке в калибрах», *Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов*, № 3 (36), с. 64 – 67, 2013.

[14] С. А. Скрыбин и Д. С. Чайка, «Определение температурного коэффициента уширения при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в условиях приближенных к изотермическим», *Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов*, № 2 (39), с. 180 – 187, 2014.

[15] С. А. Скрыбин и Д. С. Чайка, «Влияние внеконтактных зон на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах», *Научный вестник ДГМА*, № 2 (14Е), с. 103 – 115, 2014. [Электронный ресурс]. Доступно: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962\(14%D0%95\)_2014/article/15.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(14%D0%95)_2014/article/15.pdf)

[16] Д. С. Чайка, «Определение показателей пластичности вальцуемых заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах», *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 1 (100), с. 158 – 165, 2018.

[17] Н. Р. Веселовская и Д. С. Чайка, «Повышение качества изготовления вальцовок из алюминиевых сплавов», на *IV Міжнар. наук.-техн. конф. Земля України - потенціал продовольчої, енергетичної та екологічної безпеки держави*, Вінниця, 2014, с. 156 – 159.

[18] Д. С. Чайка, «Удосконалення процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів», на *Всеукр. наук.-практ. інтернет конф. Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2019)*, Вінниця, 2019.

[19] Д. С. Чайка, «Дослідження деформовності метала у позаконтактних зонах при гарячому вальцюванні циліндричних заготовок з алюмінієвих сплавів в овальних калібрах», на *I Міжнар. наук.-техн. конф. Перспективи розвитку машинобудування та транспорту*, Вінниця, 2019, с. 109 – 111.

[20] Д. С. Чайка, «Исследование влияния внеконтактных зон на уширение для оптимизации разработки технологического процесса вальцовки», на *III науч.-техн. конф. молодых специалистов. Энергомашипецсталь-2011*, Краматорск, 2011, с. 28 – 30.

[21] С. А. Скрыбин, Д. С. Чайка и О. Е. Марков, *Методика автоматизированного проектирования технологического процесса и 3D-моделей для вальцовки: учебное пособие для студентов всех форм обучения специальностей «Обработка металлов давлением» и «Оборудование и технологии пластического формирования конструкций машиностроения» по дисциплине «Горячая объемная штамповка» и «Ковка и горячая штамповка»*. Краматорск, Украина: ДГМА, 2015.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	20
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАУКОВИХ РОБІТ, ПРИСВЯЧЕНИХ УДОСКОНАЛЕННЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ВАЛЬЦЮВАННЯ ЗАГОТОВОК З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ	28
1.1 Ознаки та переваги гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів	28
1.2 Аналіз існуючих методів з визначення розширення при вальцюванні	31
1.2.1 Види та параметри розширення при вальцюванні	31
1.2.2 Розширення під час вальцювання заготовок на гладкій бочці	34
1.3.3 Розширення під час вальцювання заготовок в калібрах	39
1.3 Вплив позаконтактних зон на параметри осередку деформування при гарячому вальцюванні	47
1.3.1 Вплив форми позаконтактних зон на процес гарячого вальцювання	47
1.3.2 Вплив позаконтактних зон на енергосилові параметри процесу деформації під час вальцювання	51
1.3.3 Дослідження розмірів осередку деформування при вальцюванні	56
1.4 Вальцювання заготовок в умовах наближених до ізотермічних	60
1.5 Огляд існуючого програмного забезпечення для автоматизації проектування та моделювання технологічного процесу вальцювання	62
1.5.1 Принципи проектування технологічного процесу вальцювання	62
1.5.2 Системи проектування та моделювання технологічного процесу вальцювання	65
Висновки за розділом 1	68
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ВАЛЬЦЮВАННЯ ЗАГОТОВОК З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ	70
2.1 Моделювання та дослідження параметрів вальцювальних операцій за допомогою програмного комплексу QForm3D	70

2.2 Методика дослідження геометричних параметрів заготовок при моделюванні процесу вальцювання	75
2.3 Апроксимація залежностей технологічних параметрів вальцювання заготовок	78
2.4 Загальна методика дослідження впливу позаконтактних зон на поперечну деформацію під час вальцювання заготовок	82
2.4.1 Вплив форми і розмірів позаконтактних зон на розширення при вальцюванні прямокутних заготовок в гладких валках	82
2.4.2 Визначення впливу позаконтактних зон на розширення при вальцюванні циліндричних заготовок в гладких валках та калібрах	83
2.5 Визначення температурного коефіцієнту розширення при вальцюванні в умовах наближених до ізотермічних	94
2.6 Оцінка показників пластичності заготовок, що вальцюються	96
2.7 Методика дослідження силових параметрів процесу вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів	104
Висновки за розділом 2	107
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ РОЗШИРЕННЯ, ДЕФОРМОВНОСТІ ТА ФАКТИЧНОГО ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ГАРЯЧОМУ ВАЛЬЦЮВАННІ	109
3.1 Дослідження впливу позаконтактних зон на розширення при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів	109
3.1.1 Визначення залежностей впливу розміру та форми позаконтактних зон на розширення при вальцюванні заготовок прямокутного перерізу в гладких валках	109
3.1.2 Визначення залежностей впливу нерівномірності деформації та позаконтактних зон на розширення при вальцюванні заготовок круглого перерізу в гладких валках	111

3.1.3	Удосконалення раціональних залежностей для визначення розмірів розширення з урахуванням впливу позаконтактних зон при вальцюванні циліндричних заготовок з алюмінієвих сплавів в овальних калібрах	120
3.2	Дослідження раціональних залежностей для визначення впливу умов вальцювання наближених до ізотермічних на розширення при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів	144
3.3	Дослідження впливу форми і розмірів фактичного осередку деформування на технологічні параметри процесу вальцювання	148
3.3.1	Визначення залежностей розміру фактичного осередку деформування від форми позаконтактних зон при вальцюванні заготовок прямокутного перерізу в гладких валках	148
3.3.2	Визначення залежності раціональних технологічних параметрів при вальцюванні циліндричних заготовок в гладких валках від розмірів фактичного осередку деформування	151
3.3.3	Визначення залежності раціональних технологічних параметрів від розмірів фактичного осередку деформування при вальцюванні заготовок циліндричних заготовок в гладких валках в умовах наближених до ізотермічного деформування	153
	Висновки за розділом 3	155
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАЛЬЦЮВАННЯ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ШТАМПОВАНИХ ВИРОБІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ		
4.1	Етапи проведення експериментальних досліджень раціональних технологічних параметрів при виготовленні заготовок з алюмінієвих сплавів, що вальцюються під штампування на кувальних вальцях	157
4.2	Визначення методу прогнозування дефектів при виготовленні поковок з алюмінієвих сплавів з попереднім вальцюванням та штампуванням у підготовчому рівчаку	160

4.3 Експериментальні дослідження раціональних технологічних параметрів при виготовленні типових представників заготовок з алюмінієвих сплавів, що вальцюються під штампування на кувальних вальцях	167
4.3.1 Дослідження впливу раціональних технологічних параметрів на процес виготовлення вальцьованих заготовок з одним потовщенням на кінці	167
4.3.2 Дослідження технологічних параметрів при виготовленні заготовок з потовщенням посередині, що вальцюються кувальних вальцях з алюмінієвих сплавів під подальше штампування	168
4.3.3 Експериментальні дослідження впливу раціональних технологічних параметрів при гарячому штампуванні поковок з алюмінієвих сплавів з попереднім вальцюванням заготовок з двома потовщеннями на кінцях	170
4.4 Перевірка на адекватність емпіричних моделей, що використовуються при розрахунках розширення	177
Висновки за розділом 4	178
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РОЗРАХУНКУ КАЛІБРІВ ДЛЯ ВАЛЬЦЮВАННЯ І СТВОРЕННЯ ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЕЙ ВАЛЬЦЮВАЛЬНИХ СЕКТОРІВ	180
5.1 Методика автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання	180
5.2 Математична модель автоматизації технологічного процесу вальцювання	184
5.2.1 Отримання розмірів площ поперечних перерізів штампувальної поковки	184
5.2.2 Визначення параметрів заготовки, що вальцюється	185
5.2.3 Визначення кількості переходів та вибір системи калібрів	188
5.2.4 Розрахунок систем калібрів	189
5.2.5 Побудова тривимірних моделей вальцювальних секторів	190
5.2.6 Інтерфейс проектування і збереження результатів	193
5.3 Оцінювання обґрунтованої ефективності використання ПМК САПР ТП вальцювання	193
Висновки за розділом 5	195

	19
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	197
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	201
ДОДАТКИ	220
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача	221
ДОДАТОК Б Апробація результатів дисертаційної роботи на міжнародних конференціях	226
ДОДАТОК В Криві деформаційного зміцнення алюмінієвих сплавів АМЦ, АМГ та АК8	227
ДОДАТОК Г Розрахунок в MathCad використаного ресурсу пластичності в області позаконтактних зон під час вальцювання алюмінієвого сплаву АК6	231
ДОДАТОК Д Пластичність і опір деформації алюмінієвих сплавів в деформованому стані	236
ДОДАТОК Е Алгоритми для розрахунків в ПМК САПР ТП вальцювання	240
ДОДАТОК Ж Акти впровадження результатів роботи	243

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. На сучасному етапі розвитку машинобудування одним із найважливіших резервів підвищення ефективності виробництва, максимальної економії матеріальних, трудових і енергетичних ресурсів є вдосконалення заготівельної фази виробничого процесу. Загальне завдання цієї стадії полягає в максимальному наближенні форми і розмірів заготовки до форми і розмірів готових деталей, забезпечення необхідних фізико-механічних властивостей та їх раціонального виконання, максимальної економії матеріальних, трудових і грошових ресурсів.

У номенклатурі штампованих заготовок значний обсяг займають деталі подовженої форми зі змінним поперечним перерізом уздовж осі (важелі, качалки, ручки, кронштейни і т. д.). Як загальні підготовчі операції перед штампуванням деталей подовженої форми з алюмінієвих сплавів, які широко використовуються в авіа- та автомобілебудуванні, застосовують операції протягування під час кування або висаджування головок на горизонтально-кувальних машинах. Недоліком першої є недостатня продуктивність, висока трудомісткість, підвищена витрата металу, низька якість поверхні, а другої – занадто висока вірогідність виникнення задирок на торцях та по лінії роз'єму матриці, а також утворення гофрованої поверхні в місцях переходу від висадженої головки до вихідного перерізу прутка. Це вимагає передбачити в технологічному процесі операції зачищення, що значно подовжує цикл виготовлення і збільшує вартість деталі. Натомість, операція гарячого вальцювання є більш досконалим способом підготування заготовок під наступне штампування на машинобудівних підприємствах.

Технологія гарячого вальцювання використовується для отримання фасонних заготовок з площами поперечних перерізів, які максимально наближені до розмірів і форми штампованих поковок, що дозволяє знизити норму витрати металу, підвищити стійкість штамсів і скоротити витрату штампової сталі та електроенергії на виконання операції штампування. Крім того, зменшується трудомісткість виготовлення штампованих поковок і підвищується норма виробітку. Проте, при вальцюванні

спостерігається неповне охоплення периметру поперечного перерізу заготовки, тому її бічні ділянки не зазнають безпосереднього обтиснення. Це спричиняє виникнення позаконтактних зон (ПЗ), які значною мірою впливають на характер течії металу та градієнт нерівномірності напружено-деформованого стану в заготовці, що призводить до появи дефектів у штампованих виробах і зниження їх якості. Рівномірний процес деформування заготовки за відсутності зон з ускладненою деформацією забезпечить всебічну проробку структури та, як наслідок, зменшить різницю властивостей по об'єму заготовки. Цій проблемі приділено значну увагу у працях І. І. Іванова, Д. А. Матуріна, С. Г. Нікітіна, В. Ф. Пушкарьова, С. О. Скрябіна, В. С. Смірнова, А. І. Целікова та ін. Тому, дослідження маловивченого механізму впливу позаконтактних зон на розширення при отриманні заготовок, що вальцюються, є актуальним завданням, зважаючи на необхідність його врахування при їх проектуванні, а також розрахунку і конструюванні калібрів та вальцювальних секторів.

Отже, удосконалення технологічних процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів, яке б забезпечувало зниження градієнту нерівномірності деформації в осередку деформування (ОД), зниження зусиль деформування, покращення пластичності, а, відповідно, і підвищення якості виготовлених з них напівфабрикатів подовженої форми, є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до «Стратегії розвитку вітчизняної авіаційної промисловості на період до 2020 року», схваленої розпорядженням Кабінету міністрів України від 27.12.2008р., № 1656 – р. та «Стратегії відродження вітчизняного авіабудування на період до 2022 року», схваленої розпорядженням Кабінету міністрів України від 10.05.2018р., № 429 – р.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення якості виробів, виготовлених із заготовок з алюмінієвих сплавів, на основі визначення комплексного впливу раціональних конструктивних, геометричних та фізико-механічних параметрів процесів формозміни заготовок на експлуатаційні характеристики деталей.

Для досягнення зазначеної мети, необхідно розв'язати такі задачі:

1. Виконати аналіз існуючих методів та способів визначення розширення заготовок в осередку деформування при вальцюванні, а також впливу на нього наявності в заготовці позаконтактних зон і ізотермічних умов деформування, та зробити вибір програмного забезпечення для моделювання та аналізу процесу деформування.

2. Розробити загальну методику для теоретичного дослідження параметрів процесів вальцювання та визначити технологічні можливості деформування позаконтактної зони в умовах гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів.

3. Розробити математичні моделі з визначення розмірів розширення та фактичного осередку деформування з урахуванням геометричних форм калібрів і заготовок, що вальцюються, на підставі теоретичного аналізу нерівномірності деформації та впливу позаконтактних зон при вальцюванні заготовок в гладких валках і овальних калібрах у звичайних умовах та наближених до ізотермічного деформування.

4. Встановити метод прогнозування появи дефектів при гарячому штампуванні поковок з алюмінієвих сплавів з попереднім вальцюванням на підставі результатів моделювання технологічного процесу та надати практичні рекомендації для забезпечення якості штампувань, що отримуються.

5. Провести експериментальні дослідження технологічних режимів вальцювання, які встановлені за отриманими аналітичними залежностями при виготовленні різних груп типових представників заготовок з алюмінієвих сплавів, що вальцюються, для операції штампування на кувальних вальцях.

6. Виконати узагальнення технічних рішень та розробити програмне забезпечення для розрахунку параметрів технологічного процесу вальцювання заготовок за удосконаленою методикою із урахуванням впливу позаконтактних зон та умов, наближених до ізотермічного деформування. Впровадити технологічні рекомендації на підприємствах машинобудівної галузі.

Об'єкт дослідження. Процеси гарячого вальцювання заготовок із алюмінієвих сплавів.

Предмет дослідження. Закономірності пластичного деформування заготовок з алюмінієвих сплавів при гарячому вальцюванні із забезпеченням раціональних технологічних параметрів процесу формозміни.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень покладено методи теорії пластичності та метод скінчених елементів, який реалізовано в спеціалізованому програмному комплексі QForm3D, методи векторної графіки і математичної статистики.

Експериментальні дослідження процесу проводилися з використанням методів фізичного моделювання і тензометрії, оптичної і електронної мікроскопії. Для оцінки точності отриманих результатів теоретичних і експериментальних досліджень використовувалися методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше встановлено, як результат експериментально-імітаційних досліджень, вплив позаконтактних зон на розміри розширення та фактичного осередку деформування, а також рівномірність розподілу напружено-деформованого стану в процесах гарячого вальцювання циліндричних заготовок з алюмінієвих сплавів в овальних калібрах.

2. Аналітичним шляхом отримав подальший розвиток метод теоретичного дослідження опору деформування в осередку деформування при гарячому вальцюванні, який відрізняється від існуючих тим, що для розрахунку повного зусилля вальцювання для сплаву, який досліджується, використовується визначені дані з розміру середнього питомого зусилля для базового сплаву, а також співвідношення даних з відносного подовження, межі пластичності та міцності для базового та досліджуваного сплаву.

3. Удосконалено математичну модель опису кінцевого формозмінення заготовки при гарячому вальцюванні, яка, на відміну від існуючих, враховує вплив позаконтактних зон та температурного коефіцієнту при визначенні розміру розширення, що дає можливість зменшити градієнт нерівномірності деформації в осередку деформування заготовок, що вальцюються.

4. Отримав подальший розвиток метод оцінки деформівності металу при вальцюванні, який полягає у визначенні показників напруженого стану та використаного ресурсу пластичності в умовах гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів, що дозволяє оцінювати можливість руйнування матеріалу в області поза-контактних зон.

Практичне значення отриманих результатів:

1. розроблено методику з розрахунку раціональних технологічних параметрів процесу гарячого вальцювання із врахуванням впливу на розмір розширення поза-контактних зон та ізотермічних умов деформування при розрахунках геометричних параметрів калібру, використання якої дозволяє краще перерозподілити метал, зменшити нерівномірність деформації по об'єму заготовки та підвищити якість виготовлених з неї напівфабрикатів.

2. розроблено рекомендації, що полягають у визначенні розміру фактичного осередку деформування за використанням результатів математичного моделювання, та надають можливість визначення ступенів обтиску з меншим градієнтом нерівномірності при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів.

3. Запропоновано методику прогнозування появи дефектів при гарячому штампуванні поковок з попереднім вальцюванням заготовок із алюмінієвих сплавів.

4. надано рекомендації, за якими для існуючої методики з розрахунку підготовчих рівчаків, можливо наблизити розміри їх вертикальних ребер та радіусів переходів до відповідних розмірів кінцевих рівчаків, що покращує заповнення кінцевого рівчака з тонкими та високими ребрами, підвищуючи якість штампувань, що отримуються.

5. Розроблено програмно-методичний комплекс автоматизації процесу побудови епюри перерізів штампованої поковки, розрахунку технологічних параметрів вальцювальних калібрів і побудови тривимірних моделей вальцювальних секторів з урахуванням впливу позаконтактних зон і ізотермічних умов деформування на процес вальцювання

Основні практичні результати роботи у вигляді рекомендацій з моделювання операцій обробки тиском складних заготовок були запропоновані для використання

на ПАТ «Енергомашспецсталь» (м. Краматорськ) для удосконалення технологій деформування та розробки заходів щодо поліпшення процесу формоутворення виробів. Використання автоматизованої система розрахунку калібрів для вальцювання, надало можливість проводити повністю автоматизовану розробку технологічного процесу вальцювання та вальцювальних секторів, підвищивши ефективність виробництва на на ПП НВЦ «Ухналь» (м. Київ).

Окремі результати дисертаційної роботи також використовувались при підготовці навчального посібника авторів С. О. Скрябіна, Д. С. Чайки та О. Є. Маркова «Методика автоматизованого проектування технологічного процесу та 3-D моделей калібрів при вальцюванні» та використовуються в навчальному процесі на кафедрах «Обробка металів тиском» Донбаської державної машинобудівної академії при викладанні дисципліни «Гаряче об'ємне штампування».

Особистий внесок здобувача. Внесок автора у процесі виконання роботи полягає в обґрунтуванні та вирішенні теоретичних завдань з визначення напружено-деформованого стану заготовки під час її формозміни, розробці практичних рекомендацій для забезпечення раціональних технологічних параметрів калібрів. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані у співавторстві, автору належить вибір та розробка методик досліджень, проведення теоретичного аналізу процесів вальцювання, підготовка та проведення експериментів, аналіз і узагальнення отриманих результатів, розроблення практичних рекомендацій. Внесок здобувача в роботах, опублікованих разом зі співавторами, наведені в анотаціях до списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація матеріалів дисертації. Загальні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких наукових конференціях: МНТК «Досягнення і перспективи розвитку процесів і машин обробки тиском в металургії і машинобудуванні»(м. Краматорськ, 2009 р); МНТК «Нові наукомісткі технології, устаткування і оснащення для обробки матеріалів тиском»(м. Краматорськ, 2010 р); МНТК «Нові наукомісткі технології отримання матеріалів і виробів підвищеної якості методами обробки тиском»(м Краматорськ, 2011 р.); III науково-технічної конференції молодих фахівців «Енергомашспецсталь 2011» (м. Краматорськ, 2011 р.);

XV – XVIII МНТК «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (м. Краматорськ, 2012 – 2015 рр.); IV МНТК «Земля України – потенціал продовольчої, енергетичної та екологічної безпеки держави» (м. Вінниця, 2014 р.); Всеукраїнська науково-практична інтернет конференція «Удосконалення процесів гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів» (м. Вінниця, 2019 р.); I МНТК «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (м. Вінниця, 2019 р.); семінар «Моделювання процесів об'ємного штампування для автомобільної промисловості» і «Підвищення кваліфікації користувачів. Нові можливості QForm 5.0», ВАТ НВО «ЦНИИТМАШ» – ТОВ «Кванторформ» (м. Москва, 2008 р.); наукових семінарах з ОМТ КПІ (2008 р.), ВНАУ (Вінниця, 2010 – 2019 рр.) та ВНТУ (2016, 2018 рр.)

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в 21 друкованій науковій праці, зокрема: 16 статей опубліковано в журналах і збірниках наукових праць, з них одна стаття у зарубіжному виданні, 15 статей у наукових фахових виданнях України, троє тез доповідей на міжнародних конференціях та одні тези на науково-технічній конференції. Матеріали досліджень і розробок опубліковано також в одному навчальному посібнику.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і восьми додатків. Повний обсяг роботи становить 244 сторінки, в тому числі 131 сторінки основного тексту, 107 малюнків і 17 таблиць. Список використаних джерел з 171 найменування на 19 сторінках, додатки містять 25 сторінок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] С. А. Скрыбин, *Изготовление поковок из алюминиевых сплавов горячим деформированием*. Киев, Украина: КВИЦ, 2004.
- [2] А. Р. Луц и А. А. Суслина, *Алюминий и его сплавы: Учебное пособие*. Самара, РФ: Самар. Гос. Техн. Ун-т., 2013.
- [3] В. В. Антипов, О. Г. Сенаторова, Е. А. Ткаченко и Р. О. Вахромов, «Алюминиевые деформируемые сплавы», *Авиационные материалы и технологии: сб. науч. трудов ВИАМ*, № 5, с. 167–182, 2012.
- [4] С. А. Каримов, «Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов для изделий авиационной техники», *Защита металлов*, т. 29, № 5, 1993. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.viam.ru/public/files/1993/1993-201287.pdf>
- [5] А. Ф. Белов и др., *Строение и свойства авиационных материалов: учеб. для вузов*. Москва, СССР: Металлургия, 1989.
- [6] С. А. Скрыбин, В. Н. Полохов и К. С. Скрыбин, «Штамповка поковок из алюминиевых сплавов с вытянутой осью, тонким полотном, закрытыми сечениями и глубокой полостью», *Технологические системы*, № 1, с. 30 – 35, 2006.
- [7] И. Н. Фридляндер, «Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970-2000 и 2001-2015 гг.», *Технология легких сплавов*, № 4, 2002. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://viam.ru/public/files/2001/2001-203438.pdf>
- [8] Е. Н. Кабалов, О. Е. Грушко и А. В. Гриневич ««Летающий металл» - в автомобилестроение», *Грузовик*, № 10, 2005. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.viam.ru/public/files/2005/2005-204333.pdf>
- [9] Н. И. Корнеев и др., «Отраслевой стандарт по штамповкам и поковкам из алюминиевых сплавов. Технические условия. ОСТ 1.90073–85. Введ. 01.11.85». Москва, СССР: Изд-во стандартов, 1989.
- [10] П. Г. Микляев, В. М. Дуденков и Г. Д. Лебедев, *Атлас тройных диаграмм пластичности и сопротивления деформации алюминиевых сплавов*. Москва, СССР: ВИЛС, 1975.
- [11] С. А. Скрыбин и В. Н. Полохов, «Исследование и разработка технологии профилирования вальцованных заготовок из алюминиевых сплавов под последую-

щую штамповку», Научно-исследовательский институт технологии и организации производства, филиал НИАТ, Киев, СССР, 1976.

[12] Г. С. Никитин, *Теория непрерывной продольной прокатки: учеб. пособие*. Москва, РФ: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2009.

[13] В. К. Смирнов, К. И. Литвинов, С. В. Харитонин, В. А. Волков и Ш. Д. Кошаев, «Применение вальцовки при штамповке лопаток газотурбинных двигателей летательных аппаратов», *Заготовительные производства в машиностроении*, № 6, с. 16 – 24, 2006.

[14] Zhong-Yi Cai, «Precision design of roll-forging die and its application in the forming of automobile front axles», *Journal of Material Processing Technology*, vol. 168, no. 1, pp. 95 – 101, 2005.

[15] С. А. Скрябин, *Технология горячего деформирования заготовок из алюминиевых сплавов на ковочных вальцах*. Винница, Украина: О. Власюк, 2007.

[16] В. К. Смирнов, К. И. Литвинов и С. В. Харитонин, *Горячая вальцовка заготовок*. Москва, СССР: Машиностроение, 1980.

[17] H. Eratz, *ERATZ-Engineering. Dortmund, Germany: Kirchhörder Str. 94, 44229*. [Online]. Available: https://www.veracad.de/vc/index_en.html

[18] С. А. Скрябин, «Профилирование заготовок из алюминиевых сплавов на ковочных вальцах под последующую штамповку. Элементы технологического процесса. ОСТ 1. 42291 – 85». Москва, СССР: Изд-во стандартов, 1985.

[19] ГОСТ 21488-97, Введ. 31.08.2001. *Прутки прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов*. Москва, РФ: Изд-во стандартов, 2001.

[20] Студопедия, *Скоростные условия в очаге деформации при прокатке*. [Электронный ресурс]. Доступно: http://studopedia.ru/2_29953_skorostnie-usloviya-v-ochage-deformatsii-pri-prokatke.html

[21] И. М. Павлов, «Теоретические проблемы прокатки», *Проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. МИСиС*, Металлургиздат, № 23, с. 88-109, 1946.

[22] М. А. Зайков, В. П. Полухин, А. М. Зайков и А. Н. Смирнов, *Процесс прокатки*. Москва, РФ: МИСИС, 2004.

[23] Ю. М. Чижиков, «Закономерности уширения при прокатке и анализ формул для его определения», *Сталь*, № 1, с. 989 – 1004, 1948.

[24] А. А. Миленин, «Исследование с помощью математической модели процесса уширения при прокатке металлов с разными реологическими свойствами», *Металлы*, № 4, с. 48 – 52, 1998.

[25] С. А. Скрябин, «Научное обоснование, исследование, разработка и внедрение малоотходных технологических процессов вальцовки заготовок из алюминиевых и титановых сплавов», дисс. докт. техн. наук, МАТИ, Москва, СССР, 1990.

[26] И. Л. Акаро, О. М. Смирнов и А. И. Батулин, «Штамповка поковок шатунов из алюминиевого сплава», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 5, с. 3 – 8, 2005.

[27] Л. Жез, *Калибровка валков при прокатке железа и стали*. Ленинград, СССР: Техника и производство, 1929.

[28] В. Тафель, *Прокатка и калибровка: введение в процессы прокатки и в работу калибровки: пер. с нем. А.В. Раков. – 2-е изд.* Москва – Ленинград, РСФСР: Научтехиздат, 1921.

[29] Ю. М. Чижиков, *Моделирование процесса прокатки*, Москва, СССР: Металлургиздат, 1963.

[30] Е. Зібель, *Обработка металлов в пластическом состоянии: пер. с нем.* Москва, СССР: Металлургиздат, 1934.

[31] А. Д. Зобнин, *Сборник задач по расчету энергосиловых параметров прокатки на листовых станах (с решением). Электронное учебное пособие*. Москва, РФ: МИСиС, 2010. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://ansya.ru/health/sbornik-zadach-po-raschetu-energosilovih-parametrov-prokatki-n/main.html>

[32] С. И. Губкин *Пластическая деформация металлов*. Москва, СССР: Металлургиздат, 1961.

[33] Б. П. Бахтинов и М. М. Штернов, *Калибровка прокатных валков*. Москва, СССР: Металлургиздат, 1953.

[34] В. К. Проурзин, «Типовые формулы для определения свободного уширения при прокатке», *Материалы по теории прокатки*. ч. IV, Москва, РФ: Металлургиздат, с. 272 – 277, 1960.

[35] М. С. Мутьев, «О структуре формул уширения», *Материалы по теории прокатки*. ч. IV, Москва, РФ: Металлургиздат, с. 602 – 604, 1960.

[36] А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзін, А. В. Третьяков и Г. С. Никитин, *Теория прокатки. Справочник*. Москва, СССР: Металлургия, 1982.

[37] А. П. Чекмарёв, М. С. Мутьев и Р. А. Машковцев, *Калибровка прокатных валков*. Москва, СССР: Металлургия, 1971.

[38] А. И. Целиков, Г. С. Никитин и С. Е. Рокотян, *Теория продольной прокатки*. Москва, СССР: Металлургия, 1980.

[39] М. С. Мутьев, *Калибровка черновых валков*. Москва, СССР: Металлургия, 1964.

[40] С. И. Губкин, *Теория обработки металлов давлением*. Москва, СССР: Металлургиздат, 1947.

[41] В. А. Николаев, *Деформация металла при прокатке в калибрах: Монография*. Запорожье, Украина: Издательство Запорожской государственной инженерной академии, 2006.

[42] А. Ф. Головин, *Прокатка. Часть III. Калибровка*. Ленинград, Москва, Свердловск, СССР: ОНТИ, 1934.

[43] В. К. Смирнов, В. А. Шилов и Ю. В. Игнатович. *Калибровка прокатных валков. Учебное пособие для вузов. Издание 2-е переработанное и дополненное*. Москва, РФ: Теплотехник, 2010.

[44] В. С. Смирнов, К. Н. Богоявленский и Н. Н. Павлов, *Калибровка прокатных валков по методу соответственной полосы*. Москва, СССР: Металлургиздат, 1953.

[45] Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев и С. Е. Меркурьев. *Прокатка и калибровка. Том I (Справочник)*. Днепропетровск, Украина: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002.

[46] Д. И. Кинзин, «Разработка методики расчета уширения при прокатке в калибрах простой формы», *Калибровочное бюро. Электронный журнал*, Магнитогорск, № 1, с. 4 – 19, 2014. [Электронный ресурс]. Доступно:

<https://cyberleninka.ru/article/v/razrabotka-metodiki-rascheta-ushireniya-pri-prokatke-v-kalibrah-prostoy-formy>

[47] В. А. Шадрин, *Инженерные методы расчетов деформации металла при прокатке*. Москва, СССР: Металлургия, 1973.

[48] А. М. Кривенцов, Р. В. Семенцул, В. В. Аксёнов и Н. В. Соломичев, «Расчет режимов деформации в вытяжных системах калибров при прокатке углеродистых и легированных сталей», *Заготовительные производства в машиностроении*, № 6, с. 25 – 26, 2006.

[49] В. А. Шилов, В. К. Смирнов и Ю. В. Игнатович, «Уширение при прокатке в калибрах с учетом реологических свойств металла», *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, № 4, с. 39 – 42, 1995.

[50] М. С. Мутьев, «Уширение и средний коэффициент вытяжки при прокатке с неравномерным обжатием», *на конференции по теоретическим вопросам прокатки*, Днепропетровск, 1959, с. 250 – 267.

[51] И. Я. Тарновский, *Формоизменение при пластической обработке металлов*. Москва, СССР: Металлургиздат, 1954.

[52] С. А. Тулупов и В. А. Курдюмова, «Расчет коэффициента высотной деформации в зонах развитого уширения калибров вытяжных систем», *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, № 4, с. 41 – 44, 1987.

[53] И. Л. Константинов, Н. Н. Загиров и Е. В. Иванов, *Конспект лекций по дисциплине «Теория процессов прокатки, прессования, волочения»*, Красноярск, РФ: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», 2008. [Электронный ресурс]. Доступно: http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/1801/u_lectures.pdf

[54] Д. А. Матурин и А. И. Хоменко, «Исследование влияния внеконтактных зон в процессах обработки металлов давлением», *на всероссийской науч.-техн. конф.*

студ. *Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии*, Москва, РФ: МГТУ им. Баумана, с. 304 – 309.

[55] С. Г. Никитин, М. П. Галкин и П. Ю. Жихарев, «Влияние внеконтактных зон на усилия деформирования в процессах обработки металлов давлением», *Металлург*, № 10. с. 61 – 65, 2012. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://naukarus.com/vliyanie-vnekontaktnyh-zon-na-usiliya-deformirovaniya-v-protssah-obrabotki-metallov-davleniem>

[56] И. И. Иванов, В. П. Балакин, В. А. Ливанов и А. И. Колпашников, «Исследование распространения деформации при осаживании и прокатке», *Труды МАТИ*, № 68, с. 5 – 20, 1967.

[57] А. И. Целиков и В. В. Смирнов, «Влияние внешних зон на сопротивление деформации при прокатке», *Сталь*, № 7, с. 614 – 621, 1952.

[58] В. Ф. Пушкарев, «К вопросу о влиянии внешних зон на сопротивление деформации при прокатке», *Прокатные станы и технология прокатки. Сборник*, № 84, с. 92 – 96, 1958.

[59] Г. С. Никитин, В. Н. Жучин, В. Ф. Свириденко и Г. М. Евстропов, «Влияние боковых внешних зон на сопротивление деформации», *Теория прокатки: Материалы, на всес. научн.-техн. конф. Теоретические проблемы прокатного производства*, Москва, СССР: Металлургия, 1975, с. 216 – 218.

[60] В. С. Смирнов. *Теория прокатки*. Москва, СССР: Металлургия, 1967.

[61] С. А. Скрыбин, Н. Н. Барабой и Д. С. Чайка, «Определение контактной площади при вальцовке заготовок, с учетом развития деформации во времени», *Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*, № 49, с. 18 – 22, 2006.

[62] А. И. Гришков, «Зависимость среднего удельного давления от ширины полосы при горячей прокатке в гладких валках», *Прокатные станы и технология прокатки. Труды МВТУ им. Баумана*. Машгиз, № 84, с. 172 – 184, 1958.

[63] Г. В. Панкратова, *Профилирование заготовок в ковочных вальцах: учеб. пос.* Волгоград, РФ: ИУНЛ ВолгГТУ, 2011.

[64] М. В. Сторожев и Е. А. Попов, *Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп.* Москва, СССР: Машиностроение, 1977.

[65] М. М. Радкевич, «Особенности формирования очага пластической деформации в условиях деформационно-термической обработки», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 2, с. 18 – 23, 2001.

[66] И. Я. Тарновский, А. А. Позднеев и В. Б. Ляшков, *Деформация металла при прокатке*. Москва, СССР: Металлургиздат, 1963.

[67] Ф. Е. Долженков, «Уширение, опережение и вытяжка при продольной прокатке (О некоторых противоречиях современной теории прокатки)», *Известия вузов. Черная металлургия*, № 5, с. 41 – 44, 2003.

[68] А. А. Уманский, «Управление качеством заготовок при прокатке из слитков методами математического моделирования», дисс. канд. техн. наук, СГИУ, Новокузнецк, РФ: СГИУ, 2007.

[69] А. И. Колпашников, «Течение металла при прокатке слитков из алюминиевых сплавов», *Цветные металлы*, № 4, с. 65 – 68, 1954.

[70] П. И. Полухин, В. К. Воронцов, А. Б. Кудрин и Н. А. Чиченев, *Деформации и напряжения при обработке металлов давлением (Применение методов Муар и координатных сеток)*. Москва, СССР: Металлургия, 1974.

[71] О. Г. Музалевский, А. И. Гришков, «Комплексное исследование течения металла и силового поля в очаге деформации», *Материалы по теории прокатки. ч. IV*. Москва, СССР: Металлургиздат, с. 484 – 492, 1960.

[72] В. Н. Перетяцько, «Опытное определение границ очага деформации», *Материалы по теории прокатки. ч. IV*. Москва, СССР: Металлургиздат, с. 546 – 547, 1960.

[73] Ф. Е. Долженков, А. П. Митьев и С. В. Мануйленко, «К вопросу о внеконтактных зонах очага деформации при продольной прокатке», *Наук. праці ДонНТУ. Серія: Металургія*, № 102, с. 92 – 96, 2005. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/2597/1/dolzenkov.pdf>

[74] С. А. Скрябин, «Теоретическое исследование процесса течения металла в очаге деформации при вальцовке заготовок под штамповку», Москва, СССР, Деп. в ВИМИ № ДО – 8451, 1991.

[75] С. А. Скрябин, Л. В. Шве́ц и Д. С. Чайка, «Исследование течения металла в переходной и установившейся зонах при вальцовке заготовок в очаге деформации, с учетом развития деформации во времени», *Технологические системы*, № 4, с. 32 – 38, 2006.

[76] А. А. Миленин, «Исследование с помощью математической модели процесса уширения при прокатке металлов с разными реологическими свойствами», *Металлы*, № 4, с. 48 – 52, 1998.

[77] В. Н. Чудин, «Процессы изотермического деформирования элементов летательных аппаратов», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 12, 2003.

[78] С. А. Стебунов, Н. В. Биба, П. А. Петров и В. И. Перфилов, «Разработка малоотходной технологии изотермической штамповки деталей из алюминиевых сплавов», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 11, с. 37 – 40, 2002.

[79] В. М. Михалевич, В. А. Матвийчук, В. П. Егоров и И. Ф. Корнет, «Изотермическая вальцовка лопаток», *Кузнечно-штамповочное производство*, № 3, с. 6 – 9, 1994.

[80] С. О. Скря́бін, В. І. Музичук та Л. В. Шве́ць, «Дослідження пластичності алюмінієвих сплавів при вальцюванні заготовок в умовах, наближених до ізотермічних», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5 (74), с. 102 – 107, 2007.

[81] С. А. Скрябин и Л. В. Шве́ц, «Определение уширения при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов, в условиях приближенных к изотермическим», *Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*. *Машиностроение*, № 55. с. 106 – 112, 2009.

[82] С. А. Скрябин, И. В. Гунько и Л. В. Шве́ц, *Вальцовка заготовок из алюминиевых сплавов в условиях изотермического и приближенных к нему деформирования*. Винница, Украина: ПП «Едельвейс і К», 2010.

[83] О. М. Смирнов, *Обработка металлов давлением в условиях сверхпластичности*. Москва, СССР: Машиностроение, 1979.

[84] ЭНИКМАШ – ОНТИ, *Получение заготовок на ковочных вальцах под последующую штамповку*. Воронеж, СССР: ЭНИКМАШ – ОНТИ, 1980.

[85] В. К. Смирнов, С. В. Харитонин, Ш. Г. Кошаев и К. И. Литвинов, «Расчет размеров поперечного сечения заготовок при вальцовке», *Кузнечно-штамповочное производство*, № 12, с. 10 – 12, 1979.

[86] С. Д. Шалагин и Р. А. Вайсбут, «Проектирование чертежа поковки методом динамического программирования», *Изв. вузов. Черная металлургия*, № 3, с. 11 – 13, 1979.

[87] В. К. Смирнов, В. И. Шилов, Ю. В. Игнатович и Д. Л. Шварц, *Программы для расчета на ЭВМ калибровок валков при прокатке в вытяжных калибрах: Методические указания по курсу «Технология процессов прокатки и волочения»*. 2-е изд. Екатеринбург, РФ: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004.

[88] А. П. Атрощенко и др., «Совершенствование технологий горячей штамповки турбинных лопаток», *Энергомашиностроение*, № 6, с. 27 – 29, 1974.

[89] С. А. Скрябин и А. И. Колпашников, *Профилирование заготовок на ковочных вальцах*. Москва, СССР: Машиностроение, 1988.

[90] С. А. Скрябин, «Исследование, разработка и внедрение процесса вальцовки заготовок из алюминиевых сплавов», дисс. канд. техн. наук, МАТИ, Москва, СССР, 1978.

[91] В. П. Шкляев, С. А. Скрябин, П. Т. Куцый и И. Г. Копейчиков, «Автоматизация расчета калибров для профилирования заготовок под штамповку», *Технология и организация производства*, № 4, с. 38 – 40, 1976.

[92] В. К. Смирнов и др., «Экспериментальное исследование вальцовки заготовок под штамповку турбинных и компрессорных лопаток», *Кузнечно-штамповочное производство*, № 4, с. 8 – 11, 1975.

[93] S. K. Biswas and W. A. Knight, «Computer Aided Preform Design for Long Hot Forgings», in *17th Machine Tool Design and Research Conf.*, Birmingham, UK, 1976, pp. 27 – 36.

[94] R. Singh and J. S. Colton, «Deformation processing rolling, ver. 1», Georgia institute of technology, Manufacturing process and systems, Tech. Rep. ME 6222, 2010. [Online]. Available: <https://www.me.iitb.ac.in/~ramesh/courses/ME649/Rolling.pdf>

[95] И. Б. Покрас и Э. Р. Ахмедзянов, «Использование САПР КОМПАС-3D для автоматизации проектирования технологии горячей объемной штамповки», *Интеллектуальные системы в производстве*, № 2, с. 165 – 169, 2009. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://izdat.istu.ru/index.php/ISM/article/download/1372/185>

[96] С. А. Скрыбин, В. Н. Полохов, Д. С. Чайка и Л. В. Швец, «Автоматизация расчета калибров для вальцовки под штамповку», *Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*, № 50, с. 59 – 69, 2007. Доступ: <http://visnyk-mm.kpi.ua/images/stories/pdf/50/59.pdf>

[97] А. А. Халафян, *STATISTICA 6. Статистический анализ данных*. Москва, РФ: Бином-Пресс, 2007.

[98] N. Biba, A. Vlasov and S. Stebunov, «Automated design and finite element simulation of reducer rolling technology», Ltd «QuantorForm», Moscow, RF, 2004. [Online]. Available: https://quantorform.ru/files_ru/2005_0001_0.pdf

[99] А. Я. Погорильчук и Р. В. Резвых, «Методика проектирования процессов вальцовки в САПР «VeraCAD» и системе моделирования методом конечных элементов QForm 2D», *Наука и образование: Электронное научное издание, МГТУ им. Н.Э. Баумана*, № 7, 2008. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://engineering-science.ru/doc/100628.html>

[100] Ю. А. Гладков и П. С. Мордвинцев, «Использование программы QForm2D/3D для моделирования технологических процессов вальцовки», ООО «КванторФорм», Москва, РФ, 2007. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://www.qform3d.ru/publications>

[101] G. Muflinoux and W. A. Knight, «Adaptation of design procedures for forging rolls for processing by computer», *Proceedings of The Japan Congress on Materials Research*, pp. 185 – 198, 1979.

[102] Н. В. Биба, С. А. Стебунов и Ю. А. Гладков, «Расчет процессов вальцовки и прокатки в калибрах в конечно-элементной системе QForm», ООО «Квантор-

Форм», Москва, РФ, 2004. [Электронный ресурс]. Доступно: https://qform3d.ru/publications?sort_by=field_pubyear_value&sort_order=DESC&page=2

[103] А. Г. Гривачевский, А. С. Дубень и В. И. Махнач, «Система автоматического проектирования секторов – штампов горячей вальцовки «Сектор»», *Кузнечно – штамповочное производство*, № 1, с. 20 – 22, 1976.

[104] В. А. Шилов, Ю. В. Игнатович, В. К. Смирнов, Т. С. Старостина и С. Е. Меркурьев, «Анализ и оптимизация на ЭВМ технологических режимов прокатки сортовых профилей на линейных станах», *Изв. вуз. Черная металлургия*, № 6, с. 53 – 58, 1984.

[105] С. А. Аксенов, И. В. Логашина и Е. Н. Чумаченко, «Быстрые алгоритмы для моделирования процессов прокатки в калибрах», *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*, № 14, с. 13 – 19, 2010.

[106] А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович и Н. Б. Пономарев, *SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике*. СПб, РФ: БХВ – Петербург, 2005.

[107] А. Аведьян, «SolidWorks API – универсальная платформа для разработки пользовательских приложений», *САПР и графика*, № 8, с. 1 – 5, 2002. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://sapr.ru/article/15013>

[108] О. К. Зинкевич, *Метод конечных элементов в технике*. Москва, СССР: Мир, 1975.

[109] Т. В. Гуреева и В. В. Третьюхин, «Моделирование технологического процесса штамповки поковок типа фланца из алюминиевых сплавов», *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр.- Краматорськ: ДДМА*, с. 237 – 240, 2007.

[110] N. Biba, A. Lishny, O. Sadykhov and S. Stiebounov, «Finite Element Simulation and Computer Aided Design of Forming Technology with FORM-2D System», in *International Conf. and Workshop. Metal Forming Process Simulation in Industry*, Baden-Baden, Germany, 1994, v. 2, pp. 302 – 320.

[111] N. Biba, A. Lishny, O. Sadykhov and S. Stiebounov, «Analysis of Closed-Die Forging with FORM-2D Finite Element System», *on 6-th International Conf. FORMABILITY'94*, Ostrava, Czech, 1994, pp. 306 – 312.

[112] В. Н. Субич, Н. А. Шестаков, В. А. Демин, Н. В. Биба, С. А. Стебунов и Л. Г. Лобастов, *Расчет и проектирование технологических процессов объемной штамповки на прессах: Учебное пособие, под ред. В. Н. Субич*. Москва, РФ: МГИУ, 2003.

[113] А. А. Харламов, А. П. Латаев, В. В. Галкин и П. В. Уланов, «Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса DEFORM», *САПР и графика*, № 5, 2005. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://sapr.ru/article/7366>

[114] R. Grant, «Forging modeling project», *University of Bath*, Bath, UK: School of Mechanical Engineering, 1994, pp. 1 – 11.

[115] П. А. Петров, «Построение «изотермической» кривой текучести алюминиевого сплава В95», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 2 (23), с. 88 – 93, 2010. [Электронный ресурс]. Доступно: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/2\(23\)-2010/article/10PPACAA.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/2(23)-2010/article/10PPACAA.pdf)

[116] H. Karacaovali, «Analysis of roll-forging process», fulfillment of the requirements for the degree of master of science of mechanical engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2005.

[117] М. В. Ильюшкин, *Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA (осадка цилиндрической заготовки). Учебно-методическое пособие*. Ульяновск, РФ: УлГУ, 2013.

[118] M. Tisza, Z. Lukacs and G. Gal, «Numerical modelling of hot forming processes», *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, vol. 3, № 1, p. 21 – 34, 2008. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/264437217_Numerical_modelling_of_hot_forming_processes

[119] O. C. Zienkiewicz, R. D. Wood and J. M. Alexander, *Flow formulation for numerical solution of metal forming processes. Numerical analyses of forming processes*. New York, USA: John Wiley, 1984.

[120] Г. Я. Гун, *Математическая модель обработки металлов давлением процессов*. Москва, СССР:Металлургия, 1983.

[121] S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, *Metal forming and the finite element method*. New York, USA: Oxford Univercity Press, 1989. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Forming-Finite-Element-Method-Advanced-Manufacturing/dp/0195044029>

[122] I. Kamaletdinov, V. Yusupov and N. Biba, «Development and investigation of the mathematical model of equal channel angular pressing process», *International Scientific Journal Machines. Technologies. Materials.*, pp. 122 – 124, 2013. [Online]. Available: <http://mech-ing.com/journal/papers/33.pdf>

[123] Quantor Ltd, *Theoretical formulation and finite element technique. Part 2. Qform, Users guide*. [Online]. Available: <http://www.qform3d.ru>

[124] П. И. Полухин, Г. Я. Гун и А. М. Галкин, *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов*. Москва, СССР: Металлургия, 1976.

[125] А. Хензель и Т. Шпиттель, *Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справ. изд. пер. с нем.* Москва, СССР: Металлургия, 1982.

[126] А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин, Б. Р. Картак, Ю. В. Ашпур и Ю. И. Спасский, *Контактное трение в процессах обработки металлов давлением*. Москва, СССР: Металлургия, 1975.

[127] M. Nilsson, «Tribology in metalworking», Uppsala University, Department of Engineering Sciences, Uppsala, Sweden, 2011. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:589436/FULLTEXT01.pdf>

[128] ООО «КванторФорм», «QFORM 2D/3D, Программа моделирования объемной штамповки, версия 4.2, 2D расчет». Москва, РФ, 2006. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.qform3d.ru/products>

[129] С. А. Левандовский, «К вопросу о дискретизации описания формы калибров», *Калибровочное бюро. Электронный журнал*, № 1, с. 56 – 65, 2014. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.passdesign.ru>

[130] В. А. Огородников, В. Б. Киселев и И. О. Сивак, *Энергия. Деформация. Разрушение*. Винница, Украина: УНІВЕРСУН, 2005.

[131] Э. А. Вуколов, *Основы статистического анализа Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTIKA и EXCEL: учебное пособие*. – 2-е изд., испр. и доп. Москва, РФ: ФОРУМ, 2008.

[132] С. А. Скрябин, С. В. Комаров, В. Н. Полохов, А. В. Буланов и И. Г. Ратушный, «Уширение при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов», *Авиационная промышленность*, с. 24 – 26, 1981.

[133] С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Исследование методов аппроксимации зависимостей коэффициентов уширения и опережения при вальцовке в калибрах», *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов*, № 3 (36), с. 64 – 67, 2013. [Электронный ресурс]. Доступно:

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962\(14%D0%95\)_2014/article/15.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%962(14%D0%95)_2014/article/15.pdf)

[134] С. А. Скрябин, В. Л. Калюжный и Д. С. Чайка, «Влияние внеконтактных зон на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок в гладких валках», *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, № 3Е (14), с. 147 – 155, 2008. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VDDMA/2008-3e14/pdf/24.pdf>

[135] Л. В. Швець, «Вальцювання заготовок із алюмінієвих сплавів в умовах ізотермічного і наближеного до нього деформування», дисс. канд. техн. наук., ВНТУ, Вінниця, Україна, 2009.

[136] С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Влияние формы и размеров внеконтактных зон вальцуемых заготовок на уширение», *Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*. Машиностроение, № 50, с. 192 – 199, 2007.

[137] Б. П. Серeda и А. К. Коваленко, «Моделирование напряженно-деформированного состояния на боковой поверхности полосы при прокатке в калибрах», *Вестник национального технического университета «ХПИ»*. Сборник науч-

ных трудов. Тематический выпуск: Новые решения в современных технологиях, Харьков, Украина: НТУ ХПИ, № 33, с. 90 – 93, 2009.

[138] В. Л. Колмогоров, *Напряжения. Деформации. Разрушение*. Москва, СССР: Металлургия, 1970.

[139] М. И. Румянцев, «К вопросу учета ограничения по деформируемости металла при разработке режимов холодной прокатки», Калибровочное бюро, № 4. с. 33 – 43, 2014. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ucheta-ogranicheniya-po-deformiruемости-metalla-pri-razrabotke-rezhimov-holodnoy-prokatki.pdf>

[140] А. А. Богатов, *Механические свойства и модели разрушения металлов*. Екатеринбург, РФ: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002.

[141] С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Влияние внеконтактных зон на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах», *Научный вестник ДГМА*, № 2 (14Е), с. 103 – 115, 2014. [Электронный ресурс]. Доступно: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%96\(14%D0%95\)_2014/article/15.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%96(14%D0%95)_2014/article/15.pdf)

[142] В. Е. Харсеев, «Оценка степени использования запаса пластичности трубной заготовки в процессах гибки проталкиванием на трубогибочном стане», *Известия ТулГУ. Технические науки*, № 10, ч. 2, с. 150 – 156, 2014. [Электронный ресурс]. Доступно: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_technical_sciences_2014_10_part_2.pdf

[143] В. А. Огородников, А. В. Грушко и А. В. Гуцалюк, «История деформирования, определяющая применение феноменологических критериев разрушения в процессах обработки давлением», *Вісник машинобудування та транспорту*, № 1, с. 67 – 77, 2015. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/2224>

[144] В. А. Огородников, *Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Монография*. Киев, СССР: Вища школа, 1983.

[145] Д. С. Чайка, «Определение показателей пластичности вальцуемых заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах», *Техніка, енергетика, транс-*

порт АПК, № 1 (100), с. 158 – 165, 2018. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://tetapk.vsau.org/files/pdfa/4241.pdf>

[146] В. М. Клименко и А. М. Онищенко, *Кинематика и динамика процессов прокатки Учеб. пособие для вузов*. Москва, СССР: Металлургия, 1984.

[147] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, Д. С. Чайка и И. А. Бубновская, «Исследование сопротивления деформации при вальцовке заготовок», *Збірник наукових праць ВНАУ. Серія «Технічні науки»*, № 6, с. 104 – 110, 2011. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://repository.vsau.org/getfile.php/3509.pdf>

[148] С. А. Скрябин, И. В. Гунько и Д. С. Чайка, «Исследование сопротивления деформации при вальцовке заготовок из сплавов АК6, АК8, АМГ и АМЦ», *Научный вестник ДГМА*, № 1 (9Е), с. 176 – 185, 2012. [Электронный ресурс]. Доступно: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961\(9%D0%95\)_2012/article/12SSAAAA.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%961(9%D0%95)_2012/article/12SSAAAA.pdf)

[149] Н. Дрейпер и Г. Смит, *Прикладной регрессионный анализ. Книги 1 и 2*. Москва, СССР: Финансы и статистика, 1987.

[150] С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Определение температурного коэффициента уширения при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в условиях приближенных к изотермическим», *Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов*, № 2 (39), с. 180 – 187, 2014. [Электронный ресурс]. Доступно: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2\(39\)_2014/article/33.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(39)_2014/article/33.pdf)

[151] С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Влияние внеконтактных зон вальцуемых заготовок на размеры фактического очага деформации», *Обработка металлов давлением: сб. науч. трудов*, № 2 (21), с. 220 – 226, 2008. [Электронный ресурс]. Доступно: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/2\(21\)-2009/article/09SSARCD.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/2(21)-2009/article/09SSARCD.pdf)

[152] Ф. С. Дубинский, А. В. Выдрин, М. А. Соседкова и П. А. Мальцев, «Моделирование температурных полей в очаге деформации при прокатке сортовых профилей», *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*, № 10, с. 82 – 85, 2006. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://cyberleninka.ru/article/v/modelirovanie-temperaturnyh-poley-v-ochage-deformatsii-pri-prokatke-sortovyh-profiley>

[153] С. А. Скрябин, И. В. Гунько и Д. С. Чайка, «Исследование размера фактического очага деформации при вальцовке заготовок в условиях изотермического деформирования», *Обработка металлов давлением: сб. науч. трудов*, № 3 (24), с. 25 – 30, 2010. [Электронный ресурс]. Доступно:

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3\(24\)-2010/article/10SSAIDC.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3(24)-2010/article/10SSAIDC.pdf)

[154] С. А. Скрябин, Д. С. Чайка и О. Е. Марков, *Методика автоматизированного проектирования технологического процесса и 3D-моделей для вальцовки: уч. пос. для студентов всех форм обучения специальностей «Обработка металлов давлением» и «Оборудование и технологии пластического формирования конструкций машиностроения» по дисциплине «Горячая объемная штамповка» и «Ковка и горячая штамповка»*. Краматорск, Украина: ДГМА, 2015.

[155] С. А. Скрябин, Н. Н. Черкасов, Б. И. Арсеньев и В. К. Васильев, «Оборудование для профилирования заготовок под последующую штамповку», *Авиационная промышленность: приложение к журналу*, № 4, с. 21 – 22, 1989.

[156] С. О. Скрябін, І. В. Гунько, І. А. Бубновська та Д. С. Чайка, «Вибір оптимального варіанта конструкції печі для нагрівання заготовок з алюмінієвих сплавів», Київ, Україна, НВЦ «Ухналь»: УДК 621.7.016.2.-412:669.715 ДРНТІ, Деп. в ДНТБ України. 20.09.10, № 66 – Ук. 2010.

[157] В. А. Тюрин, «Совершенствование технологии штамповки удлиненной поковки», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, № 3, с. 21 – 30, 2004.

[158] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, Д. С. Чайка и И. А. Бубновская, «Определение возможности появления дефектов при штамповке поковок с применением процесса вальцовки и подготовительных ручьев», *Обработка металлов давлением: сб. науч. трудов*, № 3 (24), с. 76 – 81, 2010. [Электронный ресурс]. Доступно: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3\(24\)-2010/article/10SSARFP.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/3(24)-2010/article/10SSARFP.pdf)

[159] С. А. Скрябин, В. Н. Полохов и Ю. Г. Роик, *Технологические рекомендации. Проектирование подготовительных ручьев для штамповки заготовок из алюминиевых сплавов*. Киев, Украина: Украинский научно-исследовательский институт авиационных технологий, 1993.

[160] ОСТ 1.41188-78. Введ. 01.01.79, *Заготовки штампованные. Конструктивные элементы*. Киев, СССР: МЦ КиАПО, 1988.

[161] С. А. Скрябин, И. В. Гунько, И. А. Бубновская и Д. С. Чайка, «Изготовление на ковочных вальцах заготовок из алюминиевых сплавов первой группы классификатора», *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*, № 8, с. 18 – 20, 2011.

[162] ОСТ 1.90011-70, *Форма и размеры образцов для определения механических свойств металлов при испытании на растяжение*. Киев, СССР: МЦ КиАПО, 1970.

[163] С. А. Скрябин, И. В. Гунько и Д. С. Чайка, «Изготовление на ковочных вальцах заготовок удлиненной формы из алюминиевых сплавов», *Обработка металлов давлением: сб. науч. трудов*, № 1 (26), с. 134 – 138, 2011. [Электронный ресурс]. Доступно: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/1\(26\)-2011/article/11GIVAFR.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/1(26)-2011/article/11GIVAFR.pdf)

[164] А. Ф. Тарасов и М. А. Винников, *Автоматизированное проектирование программных систем на основе объектно-ориентированного подхода: методические указания к курсовой работе и самостоятельным работам по дисциплине для студентов всех форм обучения*. Краматорск, Украина: ДГМА, 2008.

[165] ОСТ 1.52129-76, *Конструкция и размеры вальцовочных вставок*. Киев, СССР: МЦ КиАПО, 1976.

[166] Д. А. Марка и К. МакГоуэн, *Методология структурного анализа и проектирования SADT. Пер. с англ.*, Москва, РФ: МетаТехнология, 1993. . [Электронный ресурс]. Доступно: <https://pqm-online.com/assets/files/lib/books/marka.pdf>

[167] Д. С. Чайка, А. Ф. Тарасов, А. А. Сидоров и М. А. Винников, «Автоматизация разработки чертежа вальцованной заготовки», *есурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: сб. науч. трудов*, Луганськ, с. 315 – 323, 2011.

[168] Ф. Ш. Шарифьянов и А. А. Маркелов, *Проектирование штампованных поковок, получаемых на молотах и КГШП. Методические указания к выполнению практических занятий по дисциплине «Технология конструкционных материалов»*.

Уфа, РФ: ГОУВПО Уфимский государственный авиационный технический университет. Центр оперативной полиграфии УГАТУ, 2005.

[169] Ю. Н. Берлет и Ю. П. Пискунов, *Разработка чертежей поковок, штампуемых на молотах, прессах и горизонтально-ковочных машинах. Учебное пособие.* Ульяновск, РФ: УлГТУ, 2001.

[170] В. А. Лобов и Э. И. Ульянов, «Неравномерность степени деформации в поперечном сечении при вытяжке с утонением по внутреннему контуру», *Известия ТулГУ. Технические науки*, № 1, ч. 2, с. 112 – 119, 2014. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://cyberleninka.ru/article/v/neravnomernost-stepeni-deformatsii-v-poperechnom-sechenii-pri-vytyazhke-s-utoneniem-po-vnutrennemu-konturu>

[171] О. В. Грушко, *Карты материалов в холодной обработке давлением. Монография.* Винница, Украина: ВНТУ, 2015.