

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 залежати 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 САD-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 their 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 $5 \dots 20$ ° 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-*

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

[9] 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.

[10] 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: зб. наук. праць*, № 1 (12), с. 315 – 323, 2011.

[11] С. А. Скрябин, 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. 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.

[13] С. А. Скрябин 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. 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.

[15] 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%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. Энергомашспецсталь-2011*, Краматорск, 2011, с. 28 – 30.

[21] С. А. Скрябин, 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

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ГКМ – горизонтально-кувальна машина.
- КВМ – коефіцієнт витрати металу.
- МСЕ – метод скінченних елементів.
- ПЗ – позаконтактні зони.
- ОД – осередок деформування.
- МНТК – міжнародна науково-технічна конференція.
- ОМТ – обробка металів тиском.
- ККД – коефіцієнт корисної дії.
- ПМК – програмно-методичний комплекс.
- САПР – система автоматичного проектування.
- ТП – технологічний процес.
- НДС – напружено-деформовний стан.
- НДІ – науково-дослідницький інститут.
- НВО – науково виробниче об'єднання.
- САЕ-система – система автоматизації інженерного аналізу.
- САЕ-система – система для автоматизованого проектування.

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 штампів 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 поза-контактної 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАУКОВИХ РОБІТ, ПРИСВЯЧЕНИХ УДОСКОНАЛЕННЮ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ВАЛЬЦЮВАННЯ ЗАГОТОВОК З
АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

1.1 Ознаки та переваги гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів

Технологічні властивості алюмінієвих сплавів забезпечують масове виробництво напівфабрикатів на металургійних заводах, легкість обробки деталей та задовільну корозійну стійкість. Алюмінієві сплави мають низьку густину ($2,7 \text{ г/см}^3$), високі питому міцність, межу плинності та модуль пружності [1], високі тепло- та електропровідність, здатність до утворення міцних захисних декоративних плівок [2].

У конструкціях літальних апаратів для елементів, що зазнають суттєвого аеродинамічного нагрівання, застосовують напівфабрикати зі сплавів АК4-1 та АК6 [3]. Широке розповсюдження також мають сплави, що зміцнюються термічною обробкою Д16ч [4], 1163, високоміцні сплави В95пч, В95оч і В93пч, сплави середньої та підвищеної міцності АВ, АК6 і АК8 (табл. 1.2). Зварювані алюмінієві сплави, що деформуються - АМг, використовуються у ракетно-космічній техніці [5].

Актуальність розробки та впровадження маловідходних технологічних процесів штампування поковок з алюмінієвих сплавів на підприємствах авіаційної промисловості, обумовлена значним застосуванням у виробі галузі цих сплавів і завданнями з вдосконалення металозберігаючих технологій [6]. Алюмінієві сплави залишаються основним конструкційним матеріалом авіакосмічної техніки, обсяг застосування яких наразі складає близько 70% від загальної кількості конструкційних матеріалів в планері літаків [7]. Ці сплави також мають суттєвий відсоток використання в багатьох типах ракет, суднах, автомобілях [8], вагонах швидкісних поїздів. Алюмінієві сплави мають комплекс ознак: високу міцність, гарну корозійну стійкість, високий супротив повторним навантаженням та низьку швидкість розповсюдження тріщини втоми, завдяки яким отримується їх краща вагова ефективність в поєднанні з тривалим ресурсом роботи і надійністю в експлуатації.

Особливості структури виробів залежать від технології виробництва напівфабрикатів, яка містить в собі: тривалість нагріву та температуру деформування; схеми ступеня, швидкості та тривалості деформування. Термомеханічні режими деформування для основних сплавів, що деформуються, повинні забезпечувати достатню пластичність, однорідну структуру та високі механічні властивості (табл. 1.1) [9].

Таблиця 1.1 – Термомеханічні режими кування та штампування алюмінієвих сплавів, що деформуються [9]

Марка сплаву	Температурний інтервал деформації, °С	Припустима ступінь деформації, %		Ковальське обладнання
		Лита заготовка	Пресована заготовка	
АМц, АМг1, АМг2, АВ, АД31, АД33, АД35, АК6, АД0, АД1, 01205	470–300	70	90	Прес гідравлічний
	470–300	70	90	Молот або прес механічний
Д1, Д1ч, ВД17, 1230, АК8	470–370	60	70	Прес гідравлічний Молот або прес механічний
	450–350	–	60	
Д20, Д21, 1201, АК4, АК4-1, АК4-1ч, СПАК-4, СПАК-4В	470–350	60	70	Прес гідравлічний Молот або прес механічний
	430–320	–	60	
АМг3, АМг4, АМг5, АМг5П, АМг6, В92, М40, В92Ц, 1915, 1913	430–320	60	60	Прес гідравлічний
	430–300	–	50	Молот або прес механічний

Сплави зі зниженою міцністю ($\sigma_B < 300$ МПа), а також сплав з середньою міцністю АК6 - мають високу пластичність, що не залежить від швидкості деформування [10]. Сплави середньої ($\sigma_B = 300 \dots 450$ МПа) та високої міцності ($\sigma_B > 450$ МПа) – мають ознаки високої пластичності, що зі збільшенням швидкості додання деформуючої сили зі статичної (0,3 м/с) до динамічної (8,0 м/с), зменшується на 15...20%, що повинно враховуватися за їх обробкою на механічних пресах і молотах.

Процес вальцювання є розповсюдженим як підготовча операція для виготовлення фасонних заготовок деталей подовженої форми з витягнутою віссю [11] та готових штампованих поковок і профілів [12]. Це прогресивний напрямок в розвитку

ковальсько-штампувального виробництва має використання в авіаційній і моторобудівній (для турбінних лопаток) [13] галузях, автомобілебудуванні [14] та ін. Досвід цих галузей показує, що вальцювання заготовок забезпечує високу продуктивність, хорошу проробку металу, зручну та швидку зміну інструменту. Кувальні вальці - порівняно просте і високопродуктивне обладнання, їх експлуатація не вимагає від робітників високої кваліфікації. Виготовлення заготовок змінного перерізу з подовженою віссю за допомогою протягування на кувальних молотах має надмірну трудомісткість, підвищену витрату металу та гіршу якість поверхні заготовки порівняно з вальцюванням. При висаджуванні головок на ГKM, існує занадто висока вірогідність виникнення задирок по торцях та за лінією роз'єму матриці, а також утворення гофрованої поверхні у місцях переходу від висадженої головки до вихідного перерізу прутка, що вимагає передбачати в технологічному процесі операції зачищення, чим значно подовжує цикл виготовлення та збільшує вартість деталі.

Сутність вальцювання полягає в тому, що при деформуванні заготовки між змінними вальцювальними штампами, що обертаються, відбувається зменшення площ поперечних перерізів вихідної заготовки за одночасного збільшення її довжини. Вальцювання є різновидом процесу поздовжнього періодичного прокатування [15] та рівчаки також розташовуються навколо вальцювальних штамів. Подача заготовок до вальцювальних штамів протилежна напрямку обертання інструмента, в у випадку, коли штампи повернені один до одного непрацюючими частинами – між ними утворюється проміжок, що перевищує товщину заготовки. Обтиснення виконується не за всією довжиною заготовки, що спричиняє виникнення в калібрах перехідних ділянок, на яких обтиснення змінюється від нуля до максимуму, за рахунок чого стає можливим збільшити разове обтиснення за прохід [16].

Отримання за допомогою вальцювання фасонних заготовок з площами поперечних перерізів максимально наближених до розмірів і форми штампованих поковок [1], забезпечує економію металу в залежності від конфігурації поковок та підвищення стійкості штамів на 5...25%, а також точності виконання та зменшення трудомісткості виготовлення штампованих поковок на 15...35% (із технологічного процесу вилучаються операції протягування та зачищення заготовок), підвищення

продуктивності праці на 50...150% [15]. Собівартість виготовлення штампованих поковок знижується на 10...35% завдяки зменшенню витрати металу, підвищенню норм виробітку, скороченню витрат штампової сталі і енергоносіїв [16].

Експериментально-промислові дослідження з розроблення методики з розрахунку калібрування вальцювальних секторів для отримання сталевих виробів, здійснювалися в уральському політехнічному інституті [16], НВО «ЕНІКмаш», НВО «ЦНПТімаш» і інших НДІ. В розвинених країнах Європи, Америки та Азії, існує декілька методик вальцювання заготовок подовженої форми під штампування [17].

Технологічні параметри розрахунку вальцювання алюмінієвих сплавів відрізняються від сталевих. В НВО «УкрНІАТ», під керівництвом С. О. Скрябіна, виконувалась розробка та впровадження методики з розрахунку процесів вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів. За результатами був отриманий ряд технологічних рекомендацій та галузевих стандартів [18] для розрахунку технологічних вальцювальних переходів, проектування секторів штампів, їх кріплення, визначення силових показників, проектування технологічних пристосувань та техніки безпеки [15].

Отже, процес течії металу при гарячому вальцюванні являє собою складну операцію тривимірного деформування, що викликає необхідність удосконалення існуючого технологічного процесу, яке б забезпечувало зниження градієнту нерівномірності деформації в осередку деформування та підвищення якості напівфабрикатів, є актуальною науково-технічною задачею та потребує подальших досліджень.

1.2 Аналіз існуючих методів з визначення розширення при вальцюванні

1.2.1 Види та параметри розширення при вальцюванні

Для більшості процесів прокатування - розширення супроводжується ковзанням металу у поперечному напрямку з появою поперечних сил тертя. Це призводить до додаткової витрати енергії, зниженню ККД та появі додаткових напружень в металі, що знижує його технологічну пластичність. Для усунення розширення потрібні додаткові етапи вальцювання та операції з відновлення технологічної пластичності

оброблюваного металу. Через це визначається негативна роль розширення під час вальцювання. Позитивна роль розширення виявляється у використанні цього явища для формування геометрії калібрів, коли вимушене розширення дозволяє сформува-ти більш складну геометрію перерізу [19].

Залежно від умов прокатування або вальцювання, розширення може бути по-зитивним або негативним [20]. У випадку, коли фактичне розширення виявиться бі-льше передбаченого за розрахунком при прокатуванні в калібрах, метал переповняє калібр та виходить у проміжок між валками, утворюючи задирки або лампаси за до-вжиною профілю, та викликає брак. Якщо фактичне розширення менше за розраху-нкове, калібр не заповнюється та має місце невиконання профілю. Розрізняють такі види розширення [21]:

– вільне, у разі прокатування прямокутної полоси на гладкій бочці - відсутні фактори, що ускладнюють або сприяють розширенню (крім тертя);

– стиснутим вважають прокатування в калібрах, коли реакція стінок калібру перешкоджає розширенню, проте сприяє більшому витягуванню, кращій якості кромки та можливості отримання більш точних розмірів заготовки за шириною;

– вимушене, яке за нерівномірного деформування з обтиснення у деяких діля-нках, призводить до додаткової поперечної деформації (прокатування в розрізних фасонних калібрах);

– комбіноване, що поєднує вимушене та стиснуте розширення.

Для кількісної оцінки розширення використовують наступні показники:

- абсолютне розширення - різниця ширини зразка до та після вальцювання:

$$\Delta b = b_1 - b_0, \quad (1.1)$$

де b_0 – ширина зразка до вальцювання; b_1 – ширина зразка після вальцювання.

- лінійний показник розширення для випадків вальцювання прямокутних заго-товок в гладких валках $\Delta b / \Delta h$, де Δh – абсолютна ступінь деформації - різниця ви-сот зразка до та після вальцювання (рис. 1.1):

$$\Delta h = h_0 - h_1, \quad (1.2)$$

де h_0 – початкова висота зразка, h_1 – висота зразка після вальцювання, мм.

- лінійний показник розширення для випадків вальцювання циліндричних заготовок $\Delta b/D_0$, де $D_0 = h_0$ – діаметр заготовки до початку деформування.

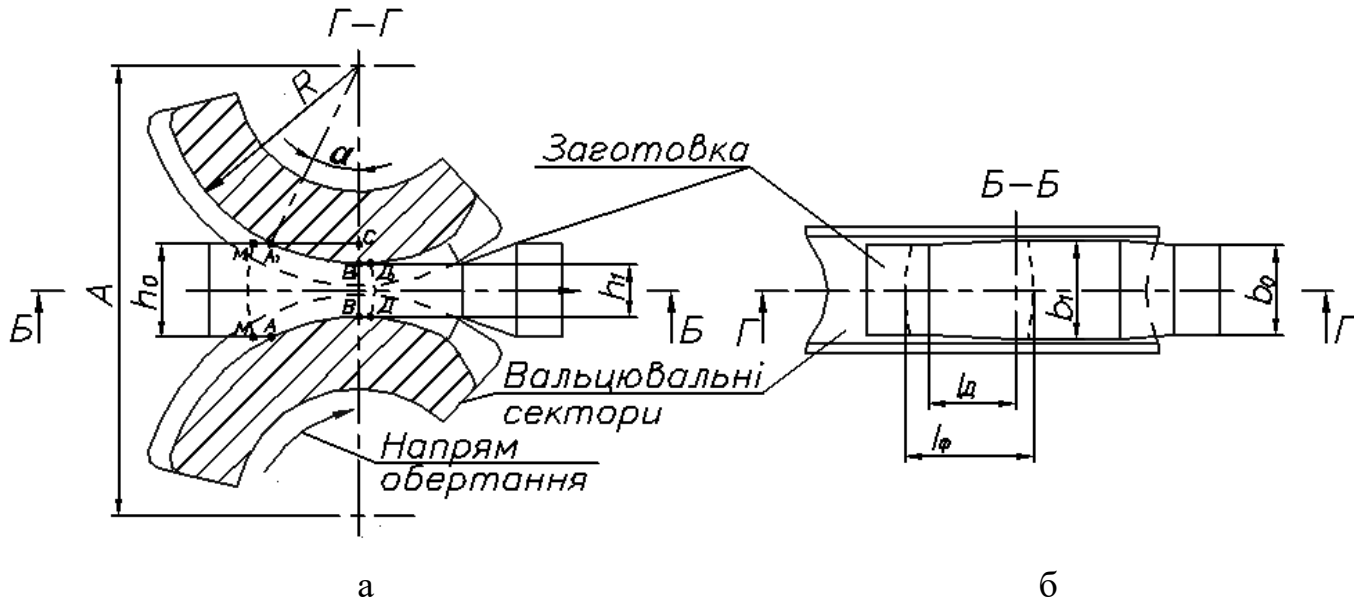


Рисунок 1.1 – Схема деформації при вальцюванні та прокатуванні: а) меридіональний, б) поперечний переріз

Ширина заготовки в процесі прокатування змінюється внаслідок закону найменшого опору, що визначає інтенсивність витікання металу в сторони вільних поверхонь з осередку деформування за рахунок вертикального обтиску. Тому, розширення при прокатуванні та вальцюванні є функцією багатьох факторів [22]: $\Delta b = f(H, h, h_{cp}, l, B, r, K_\delta, \Delta h, \varepsilon, f, t, m, P, \nu, N, ПЗ)$, де H, h, h_{cp} - висотні параметри осередку деформування; l, B, r - довжина, ширина та кривизна осередку деформування; K_δ - форма поперечного перерізу осередку деформування; f, t, m - коефіцієнти тертя між заготовками та сталевими валками (визначається з умов захоплення металу валками при прокатуванні [10], [23]), температура прокатування та склад металу (хімічний і реологічні властивості); P - механічні властивості металу, що дефо-

рмується; U - швидкість прокатування; N – натяг смуги [24]; ПЗ – форма та розміри позаконтактних зон; ε - відносне обтиснення (ступінь деформування):

$$\varepsilon = 100\% \cdot (h_0 - h_1)/h_0 \quad (1.3)$$

1.2.2 Розширення під час вальцювання заготовок на гладкій бочці

Існує чотири загальних етапи в розвитку теорії розширення при прокатуванні [14], [25]:

- а) розширення пропорційне лінійному обтисненню;
- б) розширення пропорційне обтисненню та довжині дуги захоплення;
- в) розширення пропорційне тільки зоні випередження;
- г) розширення залежить від довжини зони випередження, логарифму деформації, ширини та натягу смуги.

Л. Жез на початку ХХ століття [27], рекомендував приймати розширення в межах від $C = 0,35$ (для сталі) до $C = 0,48$ (для м'якого заліза): $\Delta b = C \cdot \Delta h$. В. Тафель рекомендував приймати $C=0,35$ (температура прокатування нижче 1000°C) и $C=0,25$ (температура прокатування вище за 1000°C) [28]. Ю. М. Чіжиков пропонував вважати $C=(0,47...0,68) \Delta h/h_1$ [29].

На думку С. М. Петрова [22] та Е. Зібеля [30], розширення пропорційне обтисненню та проекції довжини дуги захоплення:

$$\Delta b = C \cdot (\Delta h/h_1) \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (1.4)$$

де довжина геометричного осередку деформації [31]:

$$l_0 = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (1.5)$$

Надалі було враховано, що розширення пропорційне не за всією дугою захвату, а тільки за зоною випередження - формули:

$$\text{- С. І. Губкіна [32]:} \quad \Delta b = \left(1 + \frac{\Delta h}{h_1}\right) \cdot \left(f_y \cdot \sqrt{\frac{R \cdot \Delta h}{h_1^2}} - \frac{\Delta h}{2 \cdot h_1}\right) \cdot \Delta h, \quad (1.6)$$

$$\text{- Б. П. Бахтінова [33]:} \quad \Delta b = 1,15 \cdot \frac{\Delta h}{2 \cdot h_0} \cdot \left(\sqrt{R \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h}{2 \cdot f_y}\right), \quad (1.7)$$

де f_y - коефіцієнт тертя між заготовками з алюмінієвих сплавів та сталевими валками [10].

На думку М. С. Мутьєва, формули для аналітичного визначення розширення на гладкій бочці повинні враховувати наступні визначальні чинники [34]:

- зміщений об'єм, що йде на розширення: $\ln(h_0/h_1)$, $\Delta h/h_{cp}$ або $\Delta h/h_0$;
- вплив форми осередку деформування, через співвідношення l_δ/b_{cp} ;
- вплив кривизни (діаметра) валків, що виражається через α або $\alpha/(2 \cdot f_y)$;
- вплив жорстких кінців (зовнішніх частин ОД): l_δ/b_1 або l_δ/b_{cp} .

Для аналізу наявних формул їх рекомендується привести до вигляду:

$$\Delta b = C \cdot l_\delta \cdot (\Delta h/h_{cp}), \quad (1.8)$$

де $C = c \cdot c_\phi \cdot c_{вн}$; $\ln(h_0/h_1) \approx \frac{\Delta h}{h_{cp}} = \frac{2 \cdot (h_0 - h_1)}{h_0 + h_1}$; c_δ - функція, що відображає вплив жорстких кінцівок.

Відповідно до гіпотези з нерівномірного розподілу розширення за довжиною заготовки, що деформується [35], осередок деформації умовно ділиться на 4 зони: дві з них (I, II), прилеглі до бічних крамок полоси, називаються умовними зонами прагнення деформації на розширення (рис. 1.2). Завдяки впливу позаконтактних зон, частина металу заготовки, що знаходиться в бічних зонах, деформується в напрямку

довжини та навпаки, частина металу заготовки, розташована поруч з боковими кромками, зміщується в поперечному напрямку. Така схема служить початковою для формул з визначення розміру вільного розширення, які мають використання в даний час та відносяться до четвертого етапу розвитку формул розширення.

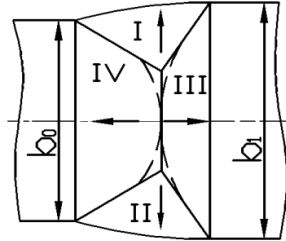


Рисунок 1.2 – Розподіл осередку деформації на зони: умовні зони прагнення деформації на розширення (I, II), випередження (III) та відставання (IV) [29]

А. І. Целіков та А. І. Грішков [36] теоретично зі значними спрощеннями розробили формулу з визначення розширення, вважаючи, що розширення переважно розвивається до нейтрального перерізу, та є незначним а в тій частині бічних зон, де воно прилягає до зон випередження:

$$\Delta b = 2 \cdot C_B \cdot C_\sigma \cdot \left(\sqrt{R \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h}{2 \cdot \mu} \right) \cdot \left(\frac{h_1^2}{\Delta h^2} \cdot \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right) - \frac{h_1}{h} + \frac{1}{2} \right), \quad (1.9)$$

де $C_\sigma = 1 - (2 \cdot \sigma_0 / \sigma_\phi)$ - коефіцієнт, що враховує вплив натягу матеріалу, що прокочується, де σ_0 - напруга натягу, σ_ϕ - фактичний опір деформації з урахуванням температури, швидкості та ступеня деформування;

$C_B = 4 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left(\frac{b_0}{l_0} - 0,15 \right) \cdot e^{1,5 \cdot \left(0,15 \cdot \frac{b_0}{l_0} \right)}$ - коефіцієнт, що враховує вплив ширини заготовки, для прямокутних профілів за прокатування на гладких валках.

За М. С. Мутьєвим відзначено, що відхилення при розрахунку за формулами Б. П. Бахтінова [33], С. І. Губкіна [32], А. П. Чекмарєва [37] та А. І. Целікова [38], складає 17...20% порівняно до дослідних даних, та запропоновано залежність для визначення вільного розширення з урахуванням впливу зовнішніх частин, що пока-

зала за дослідними даними [39] точність визначення розширення для звичайних випадків прокатування:

$$\Delta b = 0,5 \cdot l_{\partial} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2 \cdot f_{np}} \right) \cdot \frac{\Delta h}{h_{cp}} \cdot C_{вн}, \quad (1.10)$$

де $1 - (\alpha/2 \cdot f_{np})$ - співмножник, що визначає співвідношення між частинами об'єму заготовки, який пішов на розширення і випередження в залежності від кривизни валків та коефіцієнту тертя; $h_{cp} = (h_0 - h_1)/2$ - середня висота осередку деформування; $f_{np} = f \cdot \left(1 + 0,3 \cdot f \cdot \frac{l_{\partial}}{h} \right) \leq 0,5$ - приведений (середній) коефіцієнт тертя; $C_{вн}$ - співмножник, знайдений дослідним шляхом.

Розвитком формули (1.9), є запропонована А. І. Целіковим [38] залежність:

$$\Delta b = C_{вн} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} - \frac{1}{f} \right) \cdot \left[0,138 \cdot \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right)^2 + 0,323 \cdot \frac{\Delta h}{h_0} \right] \cdot \Delta h, \quad (1.11)$$

де $C_{вн}$ - коефіцієнт, що залежить від співвідношення ширини полоси до довжини дуги захоплення: $C_{вн} = 1,34 \left(\frac{b_0}{\sqrt{R \cdot \Delta h}} - 1,15 \right) \cdot l_{\partial}^{0,15 - \frac{b_0}{\sqrt{R \cdot \Delta h}}}$.

Чисто емпіричні формули вірно відображають лише частину чинників, що впливають протікання фізичного процесу [36, 38]. Після вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів, значення отриманого розширення істотно відрізняються від розрахункових, що отримують за вищенаведеними формулами. Тому, вивчення особливостей формозміни алюмінієвих сплавів і визначення точної методики для підрахунку розширення дозволяє розробити схеми обтиску при вальцюванні заготовок, що дають можливість змінювати шириною заготовок в широких межах.

Виконаний С. О. Скрябіним аналіз експериментальних і розрахункових даних (рис. 1.3, 1.4) [15] показав, що з усіх формул, розрахунок розширення за формулою С. І. Губкіна [40], дає максимально наближений результат при $\varepsilon = 5 \dots 50\%$.

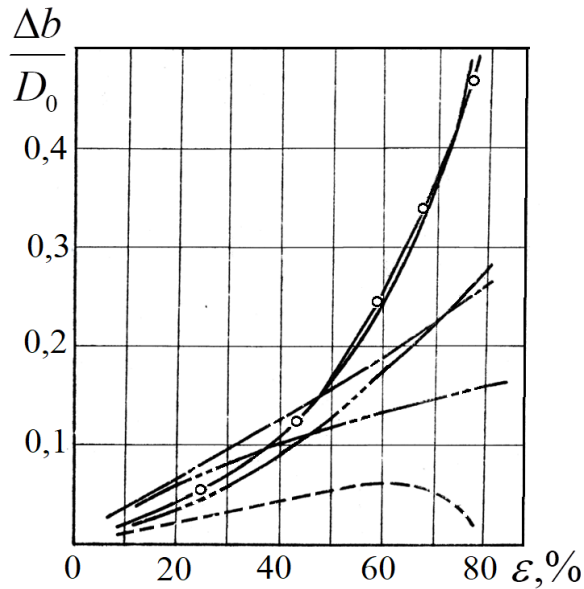


Рисунок 1.3 – Залежність відносного розширення від ступеня обтиснення при вальцюванні в гладких валках заготовок зі сплаву АК6, Ø30 мм:

— розрахункова за формулою С. О. Скрябіна; — о — експериментальна (Скрябін);
 — · — розрахункова за С. І. Губкіним; — · · — розрахункова за Б. П. Бахтіновим;
 — · · · — розрахункова за А. І. Целіковим; --- розрахункова за В. І. Зюзіним

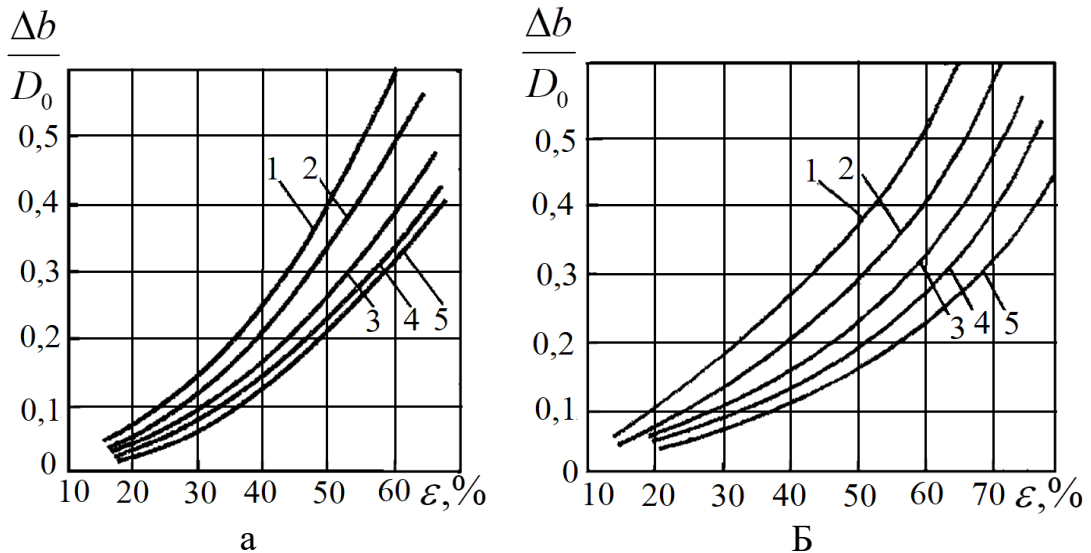


Рисунок 1.4 – Залежність показника розширення для циліндричних заготовок $\Delta b/D_0$ від ступеня обтиснення під час вальцювання гладких валках Ø 260мм (а) и Ø 130мм (б) заготовок різного діаметра: 1- Ø20; 2- Ø30; 3 - Ø50; 4 - Ø60; 5 - Ø 65 – мм

Аналіз характеру зміни розрахункових та експериментальних залежностей показав, що розрахована за формулою А. І. Целікова крива еквідистантно повторює експериментальну криву С. О. Скрябіна. Ця формула була використана як основа для розробки математичної моделі залежності, що досліджується, у вигляді регресійної моделі рівняння полінома другого порядку ($y = a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot x + a_3$), вважаючи, що $x = \Delta h / h_0$ та a_1, a_2, a_3 - параметри регресії (за принципом найменших квадратів). Для визначення показника лінійного розширення під час вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів в гладких валках було прийнято рівняння [15]:

$$\Delta b = C_{\text{вн}} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} - \frac{1}{f} \right) \cdot \left[5,64 \cdot \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right)^2 - 3,31 \cdot \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right) + 0,7 \right] \cdot \Delta h. \quad (1.12)$$

Перевірочний розрахунок за формулою (1.12) показав, що розбіжність за розрахунковими та експериментальними значеннями відносного розширення для заготовок, круглого перерізу з алюмінієвого сплаву АК6 Ø 20...40 мм не перевищує 4%, та свідчить про високий ступінь вживаності цієї методики для розрахунку розширення. За результатами експериментів показано, що під час вальцювання циліндричних заготовок з алюмінієвих сплавів в гладких валках [1], зі збільшенням ступеня деформації, при інших рівних умовах - показник розширення та відносне розширення збільшуються (рис. 1.4). Зі зменшенням діаметра прутка, значення показника розширення та відносного розширення зростають, а збільшення діаметра валків за інших рівних умов спричиняє зростання розширення.

Вивчення особливостей формозміни алюмінієвих сплавів та розробка точної методики для розрахунку розширення дозволяє розробляти раціональні схеми обтиснення при вальцюванні заготовок.

1.3.3 Розширення під час вальцювання заготовок в калібрах

Вальцювання та прокатування в калібрах супроводжуються істотною нерівномірністю деформації металу за шириною та висотою заготовки. Метал, зустрічаючи

на своєму шляху бічні стінки калібру зі змінним зазором за шириною, змушений приймати форму, що утворена калібром [40]. Складність процесу формозміни заготовки в калібрі ускладнює створення точного методу розрахунку та визначення технологічних параметрів. Саме тому, роботи багатьох авторів щодо експериментального та теоретичного дослідження окремих технологічних параметрів, спрямовані на конкретні випадки прокатування та вальцювання заготовок в калібрах. Через різноманітність та постійне розширення сортаменту фасонних профілів було розроблено більш універсальні методи, що можна застосувати для певних груп калібрів. Одночасно, розрахунок формозміни заготовки в калібрах зводиться до найпростішого випадку прокатування або вальцювання прямокутної полоси в гладких валках, а можливі похибки враховуються за допомогою поправних коефіцієнтів.

Методи розрахунку формозміни металу при прокатуванні в калібрах поділяють на: емпіричні; відповідної та наведеної полоси, метод описаних прямокутників; методи, що засновані на використанні законів механіки деформованого тіла (умови течії металу в калібрі) [41].

Емпіричні методи було розроблено на підставі узагальнення накопиченого практичного досвіду створення калібрувань валків, що дозволило отримати графіки та емпіричні формули для визначення коефіцієнтів витягування, розширення, енергосилових параметрів при прокатуванні за різними системами калібрів. На початку ХХ ст., вони розроблялися по черзі Л. Жезом, Е. Кіхбергом, Е. Зібелем, В. Тафелем, Х. Хоффом, Г. Далем, З. Вусатовським, М. В. Врацьким, А. П. Віноградовим, Л. С. Гейдельманом та ін. Згодом, більшість з них застаріла, оскільки за допомогою перемножування площі останнього калібру на коефіцієнт витягування, визначається тільки площа попереднього калібру. Як наслідок такого розрахунку, можливі випадки не заповнення калібрів, що призводить до надмірного збільшення кількості проходів та неможливості оформлення профілю або ж, навпаки – переповнення калібру та браку заготовки. Наразі використовують методи за Р. А. Машковцевим, М. С. Мутьєвим та А. П. Чекмарєвим [37], які засновані на використанні емпіричних графіків для визначення розширення в залежності від розміру заготовки, коефіцієнту витягування та діаметру валків.

Метод відповідних полос, був запропонований А. Ф. Головіним [42]. Калібрування розраховується для прямокутних (відповідних) полос, що прокочуються в гладких валках, після чого відповідні полоси перераховуються на фасонні за обрною системою калібрів. Тоді виконують розрахунки розширення відповідної полоси при прокатуванні або вальцюванні її на гладкій бочці [43]. За розрахованими розмірами відповідної полоси знаходять розміри калібрів до або після прокатування у відповідності з прийнятим порядком розрахунку.

За методом наведеної ширини у фасонної і відповідної полоси - рівні площі поперечного перерізу $F = F'$ та ширина $b = b'$ (індекс відноситься до відповідної полоси). Висота та ширина відповідної полоси: $h' = \sqrt{F/(b/h)}$ та $b' = h' \cdot (b/h)$.

За А. Ф. Головіним, метод відповідної полоси є наближеним, що не дозволяє врахувати кінематику течії металу за прокатуванням в калібрах, оскільки витягування полоси прямокутного перерізу повинно бути свідомо меншим за витягування відповідної полоси фасонного перерізу, що призводить до похибок при розрахунках.

Метод відповідної полоси отримав подальший розвиток в працях К. М. Богоявленського, М. М. Павлова та В. С. Смірнова, [44]. За прокатуванням фасонної полоси в калібрах та прямокутної полоси, вихідні розміри якої дорівнюють відповідним на гладкій бочці, виникає система сил, що залежить від розмірів форми калібру та полоси, а також від ступеню заповнення калібру. Різниця враховується за допомогою емпіричних поправних коефіцієнтів розширення:

$$K_g = (\Delta b/\Delta h)' / (\Delta b/\Delta h) \quad (1.13)$$

де $(\Delta b/\Delta h)'$ – показник розширення при прокатуванні в калібрі в перерахунку на відповідну полосу; $\Delta b/\Delta h$ – показник розширення при прокатуванні подібної полоси на гладкій бочці.

Метод описаних прямокутників для розрахунку калібрів був запропонований Б. П. Бахтіновим. Розрахунок площі калібрів (табл. 1.2), навколо вихідного і кінцевого профілів виконується за описаним квадратом, а навколо проміжного профілю – за прямокутником. Розміри фігур та їх площі визначаються через розміри сторін

квадратів і прямокутників та спричиняють необхідність врахування зміни площі кожного з профілів за рахунок зміни форми [33]:

$$b \cdot h = (A \cdot a) / \sqrt{\lambda_{np} / \lambda_{кв}} = const, \quad (1.14)$$

де b та h розміри проміжного прямокутника; A та a — сторони більшого і меншого квадратів; λ_{np} та $\lambda_{кв}$ — коефіцієнти витягування відповідно в прямокутному калібрі та меншому квадратному.

У рівнянні (1.14) використовується відношення коефіцієнтів витягування, що залежить від розширення в прямокутному калібрі та меншому квадратному. Побудова описаних прямокутників пов'язана з урахуванням розширення металу в калібрах. Нерівномірність деформування в калібрах та на гладких валках, а також різниця між поперечними перерізами фасонних профілів і перерізами описаних фігур повинні бути враховані за поправними коефіцієнтами.

Метод наведеної ширини полягає в заміні перерізу будь-якої складної форми рівновеликими за формою по площі перерізами прямокутної полоси [45], яка має ширину подібну до заміненого профілю (рис. 1.5, II). Висота наведеної прямокутної полоси (середня висота) є часткою від ділення площі розрахункового складного калібру на його максимальну ширину. Визначення середніх висот за приведенням початкового та кінцевого перерізів полоси до рівновеликого прямокутника по вхідній та кінцевій ширині є допустимим наближенням.

Д. І. Кінзін [46] запропонував методику, що є формалізацією графічного методу [37] та може бути легко пристосована в разі автоматизації розрахунків на ЕОМ.

Незважаючи на те, що методи переходу при розрахунках від прокатування в калібрах до простого випадку прокатування не є розповсюдженими, у всіх працях відсутній теоретичний аналіз загальних засобів переходу [2].

Методи, засновані на використанні законів механіки деформуючого тіла, використовують прості та адекватні аналітичні формули, що відображають залежність середніх показників формозміни від загальних факторів [47].

Таблиця 1.2 – Умови заміни полоси фасонного поперечного перерізу на прямокутне

Методи заміни	Вихідні параметри			Загальні співвідношення		
I. Наведеної ширини	$F_i = F_{i, np. u}$	$b_i = b_{i, np. u}$	$h_{i, np. u} = \frac{F_i}{b_i}$	$\lambda_I = \lambda_{I, np. u}$	$\beta_I = \beta_{I, np. u}$	$\eta_I \neq \eta_{I, np. u}$
				$\lambda_{II} = \lambda_{II, np. u}$	$\beta_{II} \neq \beta_{II, np. u}$	$\eta_{II} \neq \eta_{II, np. u}$
				$m_I \neq m_{I, np. u}$	$m_{II} \neq m_{II, np. u}$	
II. Наведеної висоти	$F_i = F_{i, np. s}$	$h_i = h_{i, np. s}$	$b_i = \frac{F_i}{h_i}$	$\lambda_I = \lambda_{I, np. s}$	$\beta_I \neq \beta_{I, np. s}$	$\eta_I = \eta_{I, np. s}$
				$\lambda_{II} = \lambda_{II, np. s}$	$\beta_{II} \neq \beta_{II, np. s}$	$\eta_{II} \neq \eta_{II, np. s}$
				$m_I \neq m_{I, np. s}$	$m_{II} \neq m_{II, np. s}$	
III. Відповідної полоси	$F_i = F_{i, c}$ $a_i = \frac{b_i}{h_i}$	$a_{i, c} = \frac{b_{i, c}}{h_{i, c}}$	$a_i = a_{i, c}$	$\lambda_I = \lambda_{I, c}$	$\beta_I \neq \beta_{I, c}$	$\eta_I = \eta_{I, c}$
				$\lambda_{II} = \lambda_{II, c}$	$\beta_{II} \neq \beta_{II, c}$	$\eta_{II} = \eta_{II, c}$
				$m_I = m_{I, c}$	$m_{II} = m_{II, c}$	
IV. Описаних прямокутників	$F_i = c_i F_{i, on}$	$b_i = b_{i, on}$	$h_i = h_{i, on}$	$\frac{\lambda_I}{\lambda_{II}} = \frac{c_0 c_2}{c_1^2} \cdot \frac{A_{on}^2 a_{on}^2}{b_1^2 h_1^2} = K_\phi K_{\Delta b}$		
				$\beta_I = \beta_{I, on}$	$\beta_{II} = \beta_{II, on}$	$h_I = h_{I, on}$ $h_{II} = h_{II, on}$
				$m_I = m_{I, on}$	$m_{II} = m_{II, on}$	

Переріз заготовки	Метод приведення	I	II	III	IV
Круг					
Овал					
Квадрат					

Рисунок 1.5 – Схема приведення фасонних заготовок до форми, що необхідна для обраного методу розрахунку

Оскільки форма калібру здійснює істотний вплив на величину розширення, В. І. Зюзінін і А. М. Кривенцовим була запропонована формула, що заснована на використанні методу приведеної полоси [48]:

$$\Delta b = C_b \cdot C_f \cdot C_m \cdot C_\sigma \cdot \Delta b_{\max}, \quad (1.15)$$

де C_b , C_f , C_σ та C_m - коефіцієнти, що враховують вплив ширини профілю, форми калібру, натягу та матеріалу полоси на розширення [22], [29]; Δb_{\max} - максимальне розширення:

$$\Delta b_{\max} = (1 - \sqrt{1 - \varepsilon}) \cdot \left(l_\partial - \frac{\Delta h^2}{4 \cdot f^2 \cdot l_\partial} \right) \quad (1.16)$$

В. К. Смирнов та ін. при прокатуванні на гладкій бочці та овальному калібрі визначили формулу розрахунку розширення [49]:

$$\Delta b = 1 + (\beta_6 - 1) \cdot m, \quad (1.17)$$

де β_6 - розмір коефіцієнту розширення в залежності від геометричних параметрів осередку деформування та умов контактного тертя, що враховує постійні коефіцієнти, в залежності від схеми прокатування (C_0, \dots, C_7); m - додатковий співмножник, що відображає вплив реологічних властивостей металу: $m = 1 + 0,6 \cdot \left(\left(\sigma_{\setminus S_i} / \sigma_{\setminus S_6} \right) - 1 \right)^{0,544}$, де $\sigma_{\setminus S_i}$, $\sigma_{\setminus S_6}$ - розміри опору деформування досліджуваного та базового сплавів [43].

Під час прокатування в калібрах, у формулах розширення необхідно враховувати також вплив позаконтактних зон та нахилу стінок калібру. У зв'язку з цим, за використанням всіх визначальних чинників, може вийти складна формула, яка за необхідністю спрощується [50]. М. С. Мутьєв [39] наводить аналітичне дослідження деформації металу в калібрі з похилими увігнутими гранями, за методикою, розви-

неною Б. П. Бахтіновим, А. І. Гришковим, Д. І. Старченко та А. І. Целіковим щодо прокатування на гладких валках. За узагальненням даних заводських калібрувань був отриманий зручний для практичного застосування з використанням ЕОМ методу з розрахунку витягування та розширення при прокатуванні в системах витяжних калібрів ромб-квадрат, овал-квадрат, овал-ребровий овал та ін. Розширення фасонної полоси після прокатування в калібрі визначається, М.С. Мутьєвим за формулою:

$$\Delta b = 0,5 \cdot c \cdot \ell \cdot \delta \cdot \frac{1 - (\alpha/2\mu_{np})}{1 + \frac{tg\delta}{f_{np}} + \frac{(\ell + \Delta h)tg\delta}{h_c}} \cdot \ln \frac{h_{oc}}{h_{1c}}, \quad (1.18)$$

де h_{oc} та h_{1c} – середня висота полоси до та після прокатування; δ – кут, що визначає нахил граней калібру або певний середній кут нахилу стінки овального калібру; c – коефіцієнт, що враховує вплив ширини полоси і жорстких кінцівок [50].

І. Я. Тарновський вважає, що вірна кількісна оцінка величини деформації передбачає інтегрування відносних змін розмірів тіла у відповідних межах, що дозволяє отримувати справжню деформацію [51]. Коригування розрахунку поперечної деформації в калібрах здійснюється за використанням варіаційних принципів механіки, де в якості показника розширення використана величина зміщеного об'єму металу в поперечному напрямку [52].

Аналіз методів розрахунку калібрів показав, що дослідники для визначення поперечної деформації усереднюють геометричні розміри полоси та використовують різні поправні коефіцієнти: $C_1 \dots C_6, f_{np}, k_1 \dots k_5, K_\phi, A, \Psi, \eta, \delta$ та ін. Ці методи не враховують геометричних співвідношень калібру та заготовки, що деформується в ньому, а також нерівномірність деформації по висоті та ширині калібру, є наближеними і не завжди забезпечують отримання якісних заготовок, що вальцюються.

С. О. Скрябіним було розроблено методу з розрахунку калібрів, що враховує нерівномірність розподілу поздовжньої і поперечної деформацій під час об'ємного деформування (рис. 1.6) в залежності від співвідношення геометричних форм калібру заготовки, що вальцюються в ньому [1], [15], [18] (табл. 1.3).

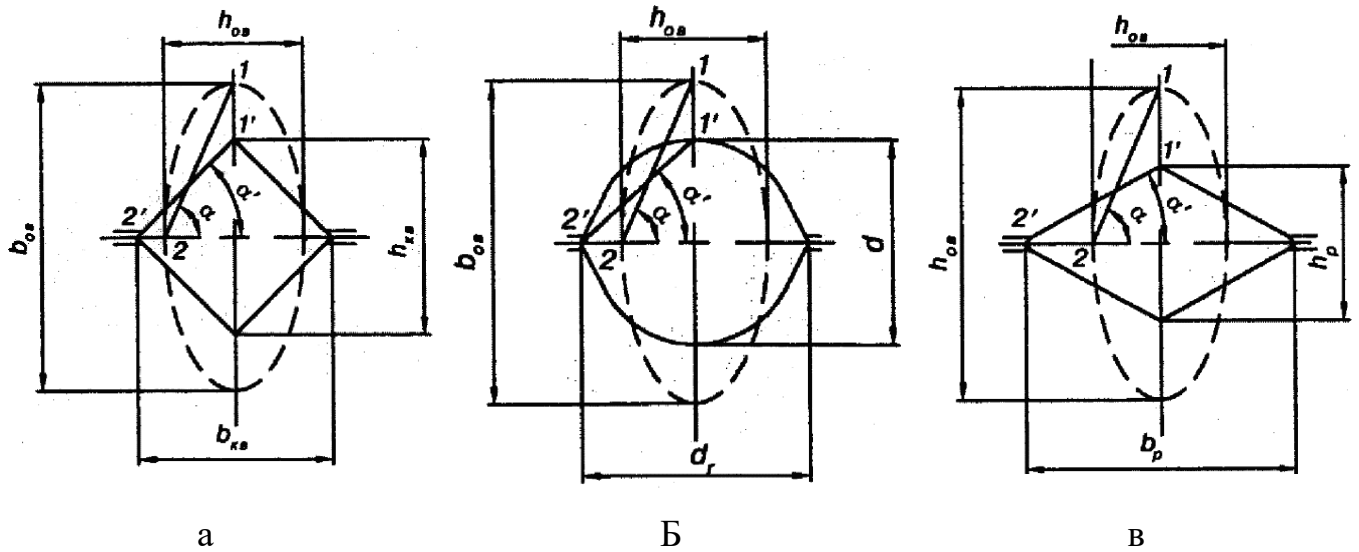


Рисунок 1.6 – Схема вальцювання овальної заготовки в квадратному (а), круглому (б) і ромбічному (в) калібрах

Таблиця 1.3 – Співвідношення геометричних форм вальцювальних калібрів та заготовок з формулами для визначення розширення

Заготовка	Калібр	Співвідношення	Розширення
Круг	Овал	$i = R_{\kappa} / R_{\text{з}}$	$\Delta b_{\text{ов}}^{\text{кр}} = K_{\text{розш}}^{\text{ов}} \cdot \sqrt{(d_0 - h_{\text{ов}}) \cdot \frac{D_{\kappa}^{\text{ов}}}{2} \cdot \frac{d_0 - h_{\text{ов}}}{d_0}}$
Овал	Квадрат	$\psi_{\text{кв}}^{\text{ов}} = a_{\text{ов}}$	$\Delta b_{\text{кв}}^{\text{ов}} = K_{\text{розш.кв.}}^{\text{ов}} \cdot \sqrt{(b_{\text{ов з}} - h_{\text{кв}}) \cdot \frac{D_{\kappa}^{\text{кв}}}{2} \cdot \frac{b_{\text{ов з}} - h_{\text{кв}}}{b_{\text{ов з}}}}$
Ромб	Квадрат	$\psi_{\text{кв}}^{\text{р}} = a_{\text{р}}$	$\Delta b_{\text{кв}}^{\text{р}} = K_{\text{розш.кв.}}^{\text{р}} \cdot \sqrt{(b_{\text{р з}} - h_{\text{кв}}) \cdot \frac{D_{\kappa}^{\text{кв}}}{2} \cdot \frac{b_{\text{р з}} - h_{\text{кв}}}{b_{\text{р з}}}}$
Овал	Круг	$\psi_{\text{кр}}^{\text{ов}} = a_{\text{ов}}$	$\Delta b_{\text{кр}}^{\text{ов}} = K_{\text{розш.кр.}}^{\text{ов}} \cdot \sqrt{(b_{\text{ов з}} - d_0) \cdot \frac{D_{\kappa}^{\text{кр}}}{2} \cdot \frac{b_{\text{ов з}} - d_0}{b_{\text{ов з}}}}$
Ромб	Круг	$\psi_{\text{кр}}^{\text{р}} = a_{\text{р}}$	$\Delta b_{\text{кр}}^{\text{р}} = K_{\text{розш.кр.}}^{\text{р}} \cdot \sqrt{(b_{\text{р з}} - d_0) \cdot \frac{D_{\kappa}^{\text{кр}}}{2} \cdot \frac{b_{\text{р з}} - d_0}{b_{\text{р з}}}}$
Овал	Ромб	$\psi_{\text{р}}^{\text{ов}} = a_{\text{ов}} \cdot a_{\text{р}}$	$\Delta b_{\text{р}}^{\text{ов}} = K_{\text{розш.р.}}^{\text{ов}} \cdot \sqrt{(b_{\text{ов з}} - h_{\text{р}}) \cdot \frac{D_{\kappa}^{\text{р}}}{2} \cdot \frac{b_{\text{ов з}} - h_{\text{р}}}{b_{\text{ов з}}}}$

Для визначення співвідношення геометричних форм калібру і заготовки, розраховується зміна положення крайніх точок 1, 2 (рис. 1.6, а), що знаходяться на осях заготовки в процесі її деформування в калібрі. При зміні кута нахилу прямої, ці точки зміщуються в положення 1' та 2', тобто кут змінюється від α до α' . Значення кута α залежить від розмірів овального калібру та може бути визначено через співвідношення півовісі перерізу заготовки, що спрощується у вигляді $\operatorname{tg} \alpha = b_{\text{ов}} / h_{\text{ов}} = a_{\text{ов}}$, а для квадратного калібру - $\operatorname{tg} \alpha' = b_{\text{кв}} / h_{\text{кв}} = 1$. Для вальцювання заготовок круглого перерізу в овальних калібрах, співвідношення геометричних форм калібру і заготовки, що деформується в ньому (табл. 1.3) виражається через співвідношення радіусу овального калібру (R_K) до радіусу заготовки (R_3).

Зміна параметрів співвідношення розмірів калібру та заготовки, призводить до існуючого перерозподілу сил, що діють на метал в зоні деформування та, як наслідок – до зміни значень розширення. Емпіричні формули С. О. Скрябіна (табл. 1.3), відносяться до другого етапу в розвитку теорії розширення за градацією А. І. Целікова [36], [38], за яким розширення є пропорційним до обтиснення ($\Delta h/h_0$), дугі захоплення (катаючий діаметр відповідного калібру D_K) та співвідношення геометричних форм калібру та заготовки, що вальцюються в ньому (коефіцієнт K , що враховує вплив на розширення нерівномірності деформації за шириною та висотою).

1.3 Вплив позаконтактних зон на параметри осередку деформування при гарячому вальцюванні

1.3.1 Вплив форми позаконтактних зон на процес гарячого вальцювання

У процесах обробки металів тиском часто зустрічаються випадки, коли у осередку деформування діють поздовжні та бічні зовнішні зони [53]. Під час вальцювання заготовок круглого перерізу в гладких валках або в калібрах, спостерігається неповне охоплення периметра поперечного перерізу заготовки. Це відбувається через те, що контактна поверхня зазвичай є меншою за ширину заготовки, яка прокочується, а бічні ділянки поперечного перерізу заготовки не зазнають безпосе-

реднього обтиснення. В цьому випадку бічні об'єми, що не контактують з інструментом є позаконтактними зонами [25], які суттєво впливають на характер течії металу в осередку деформування, кінематику, динаміку процесу прокатування та нерівномірність напружено-деформованого стану в заготовці. Це спричиняє появу дефектів у штапованих виробках та зниження їх довговічності. Те ж саме спостерігається за витягування круглих профілів за плоскими бойками, та гвинтового прокачування.

Окрім стискаючих напруг в осередку деформування, на позаконтактні області впливають великі за значенням напруження розтягнення. Позаконтактні напруги [12] в обсязі металу, що прокочується, визначається за чотирьома зонами дії поздовжніх напружень σ_{xx} : осьова зона розміром від входу до $0,1 \dots 0,8$ довжини ОД; позаконтактна зона на вході в осередок деформування; ПЗ на виході з осередку деформування та позаконтактна зона по кромках заготовки в роз'ємі калібру.

Існує декілька видів прокатування (рис. 1.7), в яких присутні як частина перерізу заготовки, що зазнає обтиснення, так і позаконтактна частина [53], [54]. Сила деформування в цьому випадку багато в чому визначається за площами цих частин. Це відбувається через те, що частина заготовки, яка обжимається при деформуванні, буде мати витяжку та спричинити подовження позаконтактних зон після проходження крізь валки. В той самий час, ПЗ зазнають розтягування та саме ці напруги будуть для частини заготовки, що обжимається, напругами «підпору».

Якщо площі поперечного перерізу позаконтактних ділянок є невеликими, під час вальцювання вони зазнають подовження подібне до ділянок заготовки, що обтискаються. Також вони надають незначний опір витягуванню ділянок, що обтискаються, а також зазнають значного впливу від розтягуючих напруг, які викликають зменшення (утягування) розмірів поперечного перерізу позаконтактних зон. Це зазвичай супроводжується порушенням їх суцільності, особливо за зниженої пластичності деформованого матеріалу [25]. Відсутність у формулах для розрахунку розширення врахування впливу форми бічних позаконтактних зон та позаконтактних зон взагалі, спричиняє суттєві відхилення в результатах.

С. О. Скрябін встановив [15], що зі збільшенням площі поперечного перерізу бічних позаконтактних зон, розширення зростає за прямолінійним законом, а поздо-

вжня деформація відповідно зменшується. Вплив форми поперечного перерізу позаконтактних бічних зон з однаковими їх площами на розширення, було досліджено на зразках з алюмінієвого сплаву АК6 (рис. 1.8) без ПЗ та з бічними ПЗ, що мають однакову площу поперечного перерізу (прямокутна, трапецеїдальна та трикутна форма). Результати показали, що лінійний показник розширення $\Delta b/\Delta h$ за всіх інших рівних умов, є суттєво більшим за показник розширення контактних ділянок, які не містять ПЗ (рис. 1.9, а). У зразків з позаконтактними зонами прямокутного поперечного перерізу, розширення виявилось меншим, ніж у зразків з трапецеїдальним та трикутним перерізами, що може істотно впливати на швидкість охолодження та зміни опору деформації при вальцюванні і прокатуванні за різних ступенів деформації:

$$\varepsilon = F_{зм} / F_{вих}, \quad (1.19)$$

де $F_{зм}$ – зміщена по висоті площа поперечного перерізу [28], $F_{вих}$ – площа поперечного перерізу вихідної заготовки.

Залежності об'ємного показника розширення $F_{розши}/F_{зм}$ ($F_{розши}$ – площа поперечного перерізу заготовки, що перейшла в розширення) від ступеня деформації (рис.1.9, б) показали, що за невеликих ступенях обтиску, коли пророблення внутрішніх шарів відсутня, інтенсивніше деформуються поверхневі та підповерхневі шари і розширення спостерігається саме в цих шарах. Підчас збільшення ступеня обтиснення, посилюється деформація в центральних зонах і опрацьовуються глибинні шари. Розширення відбувається внаслідок поперечної течії глибинних і незначно поверхневих шарів, а розширення контактних ділянок зразків, що мають ПЗ, при інших рівних умовах є суттєво вищим за розширення контактних ділянок, які не мають ПЗ. Лінійний показник розширення позаконтактних зон $(\Delta b/\Delta h)_{ПЗ}$ показує появу негативного розширення ПЗ (рис. 1.9, в), яке досягає максимуму при ступенях деформації до 17...20%, після чого поступово зменшується, переходячи в позитивне при деформаціях вище за 35...60%.

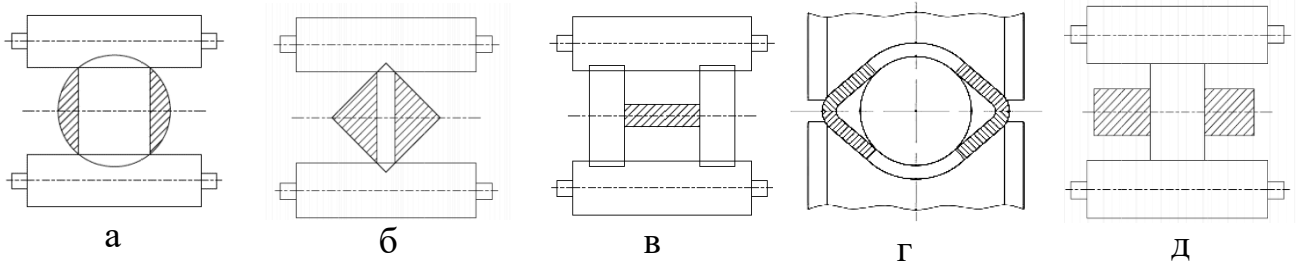


Рисунок 1.7 - Різні випадки ПЗ: при прокатуванні квадратного профілю на ребро (а), при витягуванні полос круглого перерізу в плоских бійках (б), прокатка двотавру (в), прокатка труби на оправці (г), смуги хрестоподібного перерізу (д)

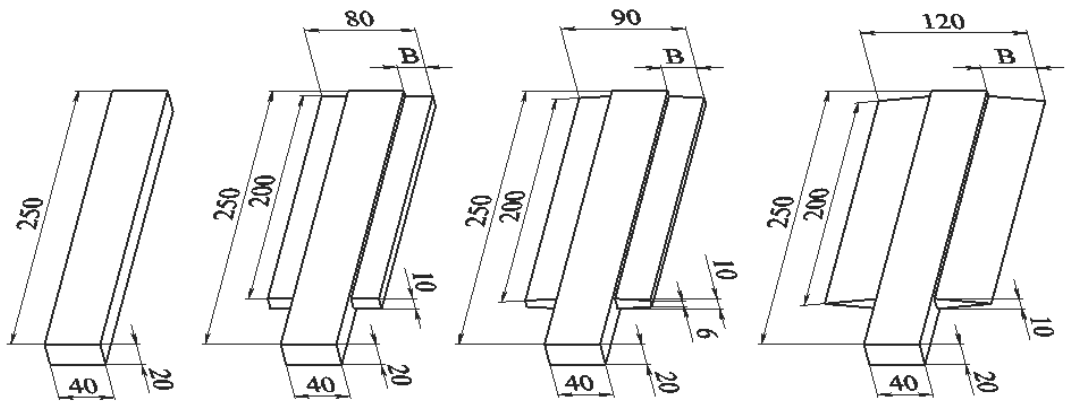


Рисунок 1.8 – Зразки для визначення впливу форми та ширини ПЗ (B) на поздовжню і поперечну деформацію під час вальцювання [15]

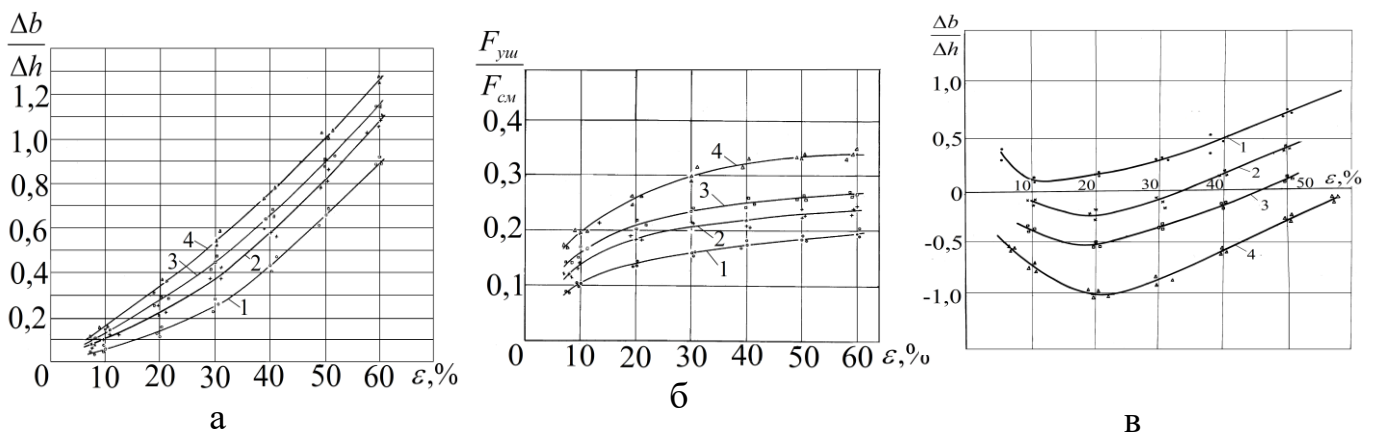


Рисунок 1.9 – Залежність показника розширення ($\Delta b/\Delta h$) (а), показника розширення $F_{розш}/F_{зм}$ (б), показника розширення позаконтактних зон ($(\Delta b/\Delta h)_{ПЗ}$) (в) від ступеня обтиснення ε при прокатуванні зразків без позаконтактної зони (1), з позаконтактної зони прямокутної (2), трапецеїдальної (3), трикутної (4) форм

1.3.2 Вплив позаконтактних зон на енергосилові параметри процесу деформації під час вальцювання

Дослідження впливу бічних ПЗ на силу деформування [38, 54-57] здійснювалося за схемами прокатування та осаджування зразків хрестоподібного перерізу (рис. 1.10). В силу суцільності середовища витягування частини перерізу, що обжимається - площі $F_0=b_1h_0$, створює у позаконтактних зонах розтягуючу напругу σ_p . Ця напруга дорівнює опору лінійної деформації розтягування з урахуванням температури, швидкості і ступеня деформації (σ^*), яке повинно створювати напругу стиснення σ_{cm} в частині заготовки, що обжимається. З умови збігу сил стиснення та розтягування в зонах перерізів, що обжимаються (F_0) та не обжимаються ($F - F_0$), отримується формула розрахунку напруги стиснення в зоні пластичного обтиснення полоси. Таким чином, напруга підпору, що виникає від впливу ПЗ:

$$\sigma_n = \sigma_{сжс} = \sigma^* \cdot [(F/F_0) - 1], \quad (1.20)$$

де F - загальна площа перерізу зразка.

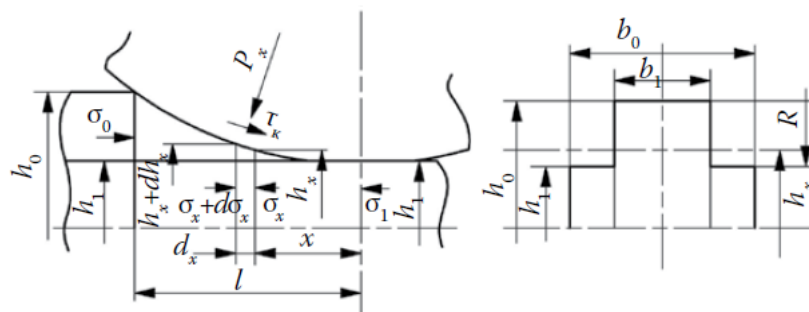


Рисунок 1.10 – Схема деформації полоси хрестоподібного перерізу

В. Ф. Пушкарьов досліджував вплив зовнішніх зон на контактний тиск під час прокатування спеціальних зразків, кожен з яких складався з двох частин, що були з'єднані між собою [58]. Довжину однієї частини зразків робили невеликою задля того, щоб під час заданого стиснення та заповнення металом геометричного осередку деформування - зовнішні зони були відсутні.

Поєднання рівнянь, отриманих за аналізом епюр контактних напруг за дугою захоплення при прокатуванні [36] та тих, що враховують вплив напруги підпору від ПЗ коефіцієнтом n''_{σ} , на контактне напруження в інтервалі $0,05 < l_{д}/h_{ср} < 1$ [54], [55]:

$$n''_{\sigma} = 1 + \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{4 \cdot k} = 1 + [(F/F_0) - 1] \cdot \frac{\sigma_s^*}{2 \cdot \sigma_s}, \quad (1.21)$$

де σ_s^* - напруга, що виникає від лінійного розтягування та враховує горизонтальне переміщення; σ_0 та σ_1 - напруги підпору (натягу) при вході та виході з осередку деформування відповідно; $k = 0,57\sigma_{\phi}$ (σ_{ϕ} - напруга течії з урахуванням температури, швидкості і ступеня деформування; $\sigma_{\phi} = \sigma_s$ - опір деформуванню, що виникає при дії вертикальної сили).

Г. С. Нікітін за величину, що визначає вплив бічних позаконтактних зон, [59] запропонував приймати відношення F/F_0 . Розмір F_0 за всіх випадків лишається незмінним. На валках з гладкою бочкою прокочувалися мідні та алюмінієві зразки (рис. 1.11). Довжина першої і останньої ділянки зразка були обрані такими, щоб при прокатуванні точно заповнювався геометричний ОД. За експериментом, фіксували зусилля, що спричиняють на валки під час послідовного обтиску ділянок зразків без зовнішніх зон з поздовжніми та бічними, а також лише з бічними зовнішніми зонами.

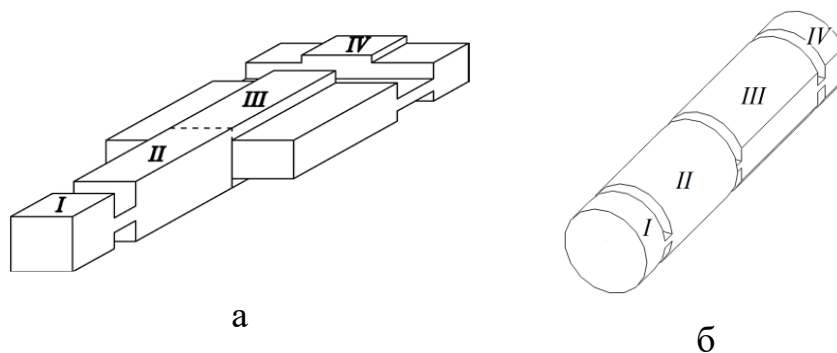


Рисунок 1.11 – Зразки для дослідження позаконтактних бічних зон при прокатуванні (а) та при осаджуванні (б), I - без бічних і поздовжніх ПЗ; II - з поздовжніми ПЗ; III - з поздовжніми і бічними ПЗ; IV - з бічними ПЗ

Залежності коефіцієнту, що враховує сумарний вплив зовнішніх поздовжніх і бічних позаконтактних зон $n''_{\sigma\Sigma} = p_{cp} / p''_{cp}$ (p''_{cp} - середній тиск під час прокатування з бічними ПЗ при обліку натягу матеріалу заготовки) $n''_{\sigma\Sigma} = f(l_D / h_{cp})$, за різних F/F_0 , мають еквідистантний характер. Це є показником того, що вплив бічних ПЗ для всього діапазону розмірів зразків, що прокочуються, не залежить від зміни l_D / h_{cp} [59] (рис. 1.12). Тому, при визначенні загального коефіцієнту впливу бічних і поздовжніх зовнішніх зон, можна користуватися залежністю А. І. Целікова та В. В. Смірнова [55], вводячи до неї коефіцієнт $n''_{\sigma_{бок}}$, який враховує вплив бічних зовнішніх зон:

$$n''_{\sigma\Sigma} = n''_{\sigma_{бок}} \cdot n''_{\sigma} = [0,6 + 0,4 \cdot (F/F_0)] \cdot (l_D / h_{cp})^{-0,4}, \quad (1.22)$$

де $n''_{\sigma_{бок}} = 0,6 + 0,4 \cdot (F/F_0)$ - вплив контактних напружень при прокатуванні в калібрах з урахуванням площ, що обжимаються та перерізів, які не обжимаються ($F_0 = h_2 l_D$ - глибина проникнення деформації $h_2 = 1,2 l_D$ [36]).

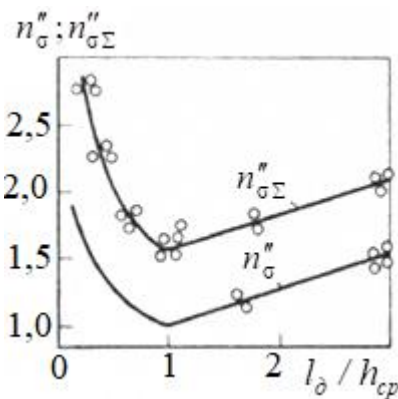


Рисунок 1.12 – Залежність коефіцієнтів, що враховують вплив зовнішніх поздовжніх зон і бічних позаконтактних зон, від l_D / h_{cp}

Під час розрахунку коефіцієнту n''_{σ} за різними формулами, чисельні значення відрізняються один від одного через врахування або неврахування різних чинників, таких як коефіцієнт тертя, а також умовність застосування відносин геометричного

фактору l_D/h_{cp} . Дослідження також показали, що матеріал зразків, істотно не впливає на коефіцієнт бічних зовнішніх зон.

Універсальна залежність, за формулою запропонованою Д. А. Матурінім та А. І. Хоменко [54], що враховує як відносини, контактної і повної площ та співвідношення геометричних параметрів заготовки (l_D/h_1) з коефіцієнтом тертя μ , дозволяє визначити коефіцієнт впливу ПЗ:

$$n_{\sigma}'' = 1 + \frac{(F/F_0) \cdot \sigma_{сж}}{2 \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot l_D}{2 \cdot h_0}\right) \cdot \sigma_S} \quad (1.23)$$

Цей метод використовується при визначенні впливу нерівномірності деформації полоси, що прокочується за шириною та розміром середньої контактної напруги, коли через вирівнювання природніх витяжок в зонах більшого обтиску, будуть діяти напруги стиснення (підпор), а в зонах зниженого обтиску, розтягування. Залежність (1.23) також використовується під час практичних розрахунків енергосилових параметрів процесу пластичної деформації за гарячого прокатування в калібрах.

Середня контактна напруга під час вальцювання (питоме зусилля), [60]:

$$P_{cp} = P / F_K, \quad (1.24)$$

де P - повне зусилля вальцювання; F_K - контактна площа деформованого металу з рівчаком штампа, яка дорівнює горизонтальній проекції цієї площі [61].

Середнє питоме зусилля при прокатуванні розраховують за формулою:

$$P_{cp} = n_B \cdot n_{\sigma} \cdot \sigma_{\phi} = n_B \cdot n'_{\sigma} \cdot n''_{\sigma} \cdot n'''_{\sigma} \cdot \sigma_{\phi}, \quad (1.25)$$

де n_B – коефіцієнт, що враховує вплив середньої головної напруги (ширини смуги) на питоме зусилля. Цей коефіцієнт змінюється від $n_B = 1$ при осісиметричному деформованому стані [62], до $n_B = 1,15$ при плоскій двомірній деформації [63]; n_{σ} , n'_{σ} , n'''_{σ}

– коефіцієнти що враховують напружений стан заготовки, вплив тертя на поверхні контакту металу з валками та наявність переднього і заднього натягу (коефіцієнт підпору) [64].

Базисний тиск $P_{ср.б.}$ для визначення опору деформації [36], [57], [60], приймається рівним середньому питомому зусиллю $P_{ср.б.} = P_{ср.} = K$. Цей метод експериментально визначає середнє контактне напруження під час прокатування еталонних зразків в умовах, що забезпечують постійне співвідношення всіх компонентів тензорів напруг та деформувань в об'ємі, що деформується. За ознаку опору деформування, приймають середнє питоме зусилля при прокатуванні еталонних зразків в умовах двовимірної деформації (базисний питомий тиск), що виключає вплив розширення, за якого вплив поздовжніх напружень на опір деформуванню був мінімальним [12].

Під час проведення розрахунків в умовах двовимірної деформації, коефіцієнт, що враховує вплив ширини полоси на питоме зусилля $n_B = 1$, а натяг n''_{σ} - настільки малий, що ним можна знехтувати [65]. Зі співвідношенням $0,05 < l_D/h_{ср} < 1,5$, вплив зовнішніх зон відсутній, тому з деяким припущенням приймають $n''_{\sigma} \approx 1$. В цих умовах, вплив зовнішнього тертя в поздовжньому напрямку є мінімальним та, відповідно, значення поздовжньої напруги σ_3 - мінімально та ним можна знехтувати. Рівняння середнього питомого зусилля надається у вигляді $P_{ср} = n'_{\sigma} \cdot \sigma_{\phi}$.

Побудовані С. О. Скрябіним за результатами експериментів [25] залежності середнього питомого зусилля для плоского напруженого стану показують, що при невеликих ступенях обтиску, зазнають деформації тільки поверхневі шари металу (рис. 1.13). В цьому випадку, контактна поверхня дотику металу з валком, є невеликою, а для деформування поверхневих шарів металу, що мають значний опір деформуванню, необхідно застосувати велике зусилля. Зі збільшенням ступеня обтиснення, контактна площа зростає, деформація проникає в глибинні шари металу, чим викликає зменшення розміру середніх питомих зусиль.

Мінімальні значення за температурами прокатування сплаву АК6 420 та 470°C, знаходяться відповідно за показником $l_D/h_{ср} = 1,4$ та 1,0. Подальше збільшення обтиснення, спричиняє деформацію всього об'єму заготовки та поступове збіль-

шення розміру середнього питомого зусилля. Результати експериментів показали, що при визначенні зусилля вальцювання заготовок можна користуватися даними, які були отримані за експериментами розтягування на пластометрі [10] з застосуванням поправного коефіцієнту [25].

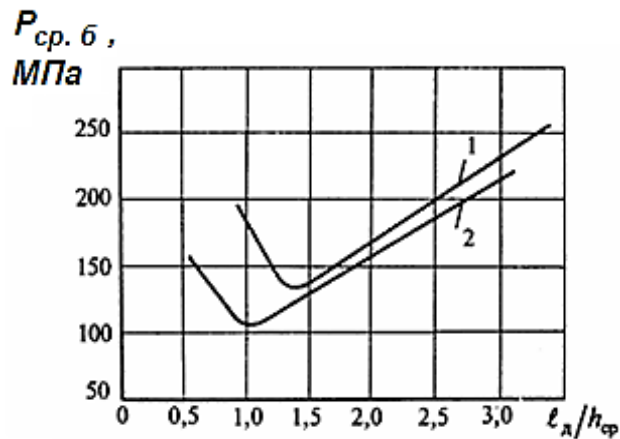


Рисунок 1.13 – Середнє питоме зусилля під час вальцювання еталонних зразків зі сплаву АК6 при температурі: 1 – 420°C; 2 – 470°C

1.3.3 Дослідження розмірів осередку деформування при вальцюванні

Коректність визначення форми та розмірів осередку інтенсивної пластичної деформації при вальцюванні впливають на ймовірність визначення результатів розрахунку [65]. Деформація починається під час втягування металу в валки під впливом сил тертя, які з'являтимуться на поверхні контакту металу з валками внаслідок дії зусилля прокатування. Осередок деформування визначається за меридіональним та поперечним перерізами (рис. 1.1).

Геометричний ОД обмежується площинами входу та виходу смуги з валків та органічно пов'язаний з металом, що прилягає до цього осередку [66]. Завдяки нерівномірності розподілу висотних деформацій, особливо при прокатуванні високих полос, швидкості течії частинок металу по висоті заготовки, розподіляються нерівномірно та їх вирівнювання відбувається лише за межами геометричного осередку деформування (рис. 1.14). Це відбувається через виникнення деформації розтягування в крайніх (верхній та нижній) частинах перерізу металу, що прокочується та стис-

нення його центральної частини [36]. Як наслідок, як на вході, так і на виході полоси з валків з'являються позаконтактні зони деформації, (зони загасання пластичної деформації), які надають істотний вплив на кінематику та динаміку процесу прокатування (рис. 1.15). Разом з геометричним ОД, вони утворюють фактичний, або фізичний осередок деформування.

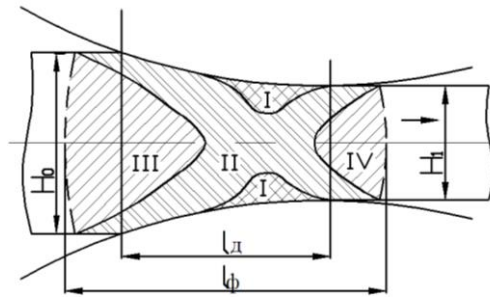


Рисунок 1.14 – Схема розподілу пластичних деформацій в ОД під час вальцювання: I – зона з ускладненою деформацією; II - область пластичної деформації стиснення за висотою і розтягування в поздовжньому напрямку; III, IV - області пластичної деформації стиснення в поздовжньому напрямку і потовщення по висоті

Зусилля вальцювання досягають максимального розміру на початку та в кінці зони позаконтактної деформації з боку входу смуги в валки та виходу з них [67]. Цим пояснюється безсумнівна важливість з теоретичної та практичної точок зору досліджень течії металу та розподілу деформацій по об'єму осередку деформації [68]. Складність її вирішення полягає у пошуку методики визначення довжини зон затухання в осередку деформації та їх впливу на силові умови в реальному процесі.

А. І. Колпашніков [69] виконував дослідження межі фізичного осередку деформування за допомогою фіксації на кінокамеру координатної сітки, нанесеної на бічну поверхню алюмінієвих слябів. За результатами була показана залежність розміру фактичного осередку деформування не тільки від геометричних факторів, а й швидкості деформування, коефіцієнту тертя на контактній поверхні, розміру обтиску за прохід, тощо (рис. 1.16).

Як наслідок дослідження І. Я. Тарновського [66] за методом координатної сітки, було визначено відстань від початку фактичного осередку деформування до

площини входу металу до валків, яка становить 50...60% від довжини геометричного осередку деформування.

Ізохроматична картина, отримана П. І. Полухінім [70] за кінограмами, що були зняті з бічної частини розкату, на який було нанесено оптично чутливе покриття (метод муар), показує три стадії зміни ОД:

1. пластичне зім'яття кутів заготовки та проникнення пластичних деформацій на всю висоту розкату. Закінчується частковим вирівнюванням висотної деформації і початком утворення зони ускладненої деформації (рис. 1.14);

2. межі другої стадії несталого процесу для високих полос знаходяться на відстані до $0,5 l_D$ при виході з геометричного осередку ОД;

3. починається після виходу з осередку деформації кінця заготовки довжиною $l_k > l_D$ та закінчується за $l_k = (1,0 \dots 1,5) l_D$. При $l_D / h_{cp} = 0,8 \dots 1,0$ - третя стадія починається до виходу з валків і закінчується при виході кінця $(0,2 \dots 0,5) l_D$.

За результатами досліджень О. Г. Музалевського та А. І. Грішкова [71], з використанням синхронної кінозйомки та осцилографічного запису процесу прокатування, розміри осередку деформування визначаються за допомогою розподілу горизонтальних швидкостей металу. Дані показали наявність векторів швидкостей пластичної течії до входу у валки на відстані $1/3 l_D$, які спрямовані проти руху заготовки.

В. Н. Перетятко [72] за допомогою методу лакового покриття показав, що максимальна протяжність задньої позаконтактної зони майже не залежить від ширини заготовки. Дані з обробки швидкісного запису на осцилографі сили прокатування Ф. Е. Довженковим [67], [73] показали, що довжина зони затухання осередку деформації становить з боку входу полоси в валки $0,42 \dots 0,53$, а зі сторони виходу - $0,33 \dots 0,38 l_D$. Довжина фактичного (фізичного) осередку деформації в умовах дослідження у $1,75 \dots 1,9$ разів перевищувала довжину геометричного осередку деформації. Збільшення сили прокатування за рахунок зон затухання деформації досягає $0,1 \dots 0,5$ сили в межах геометричного осередку деформування.

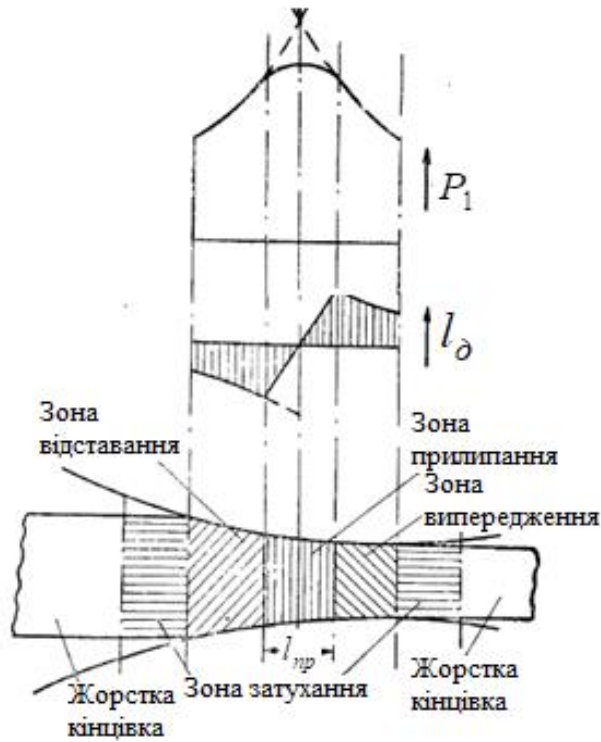


Рисунок 1.15 – Епюри розподілу питомого тиску і питомих сил тертя за дугою захоплення (за А. І. Целіковим [36]) l_D

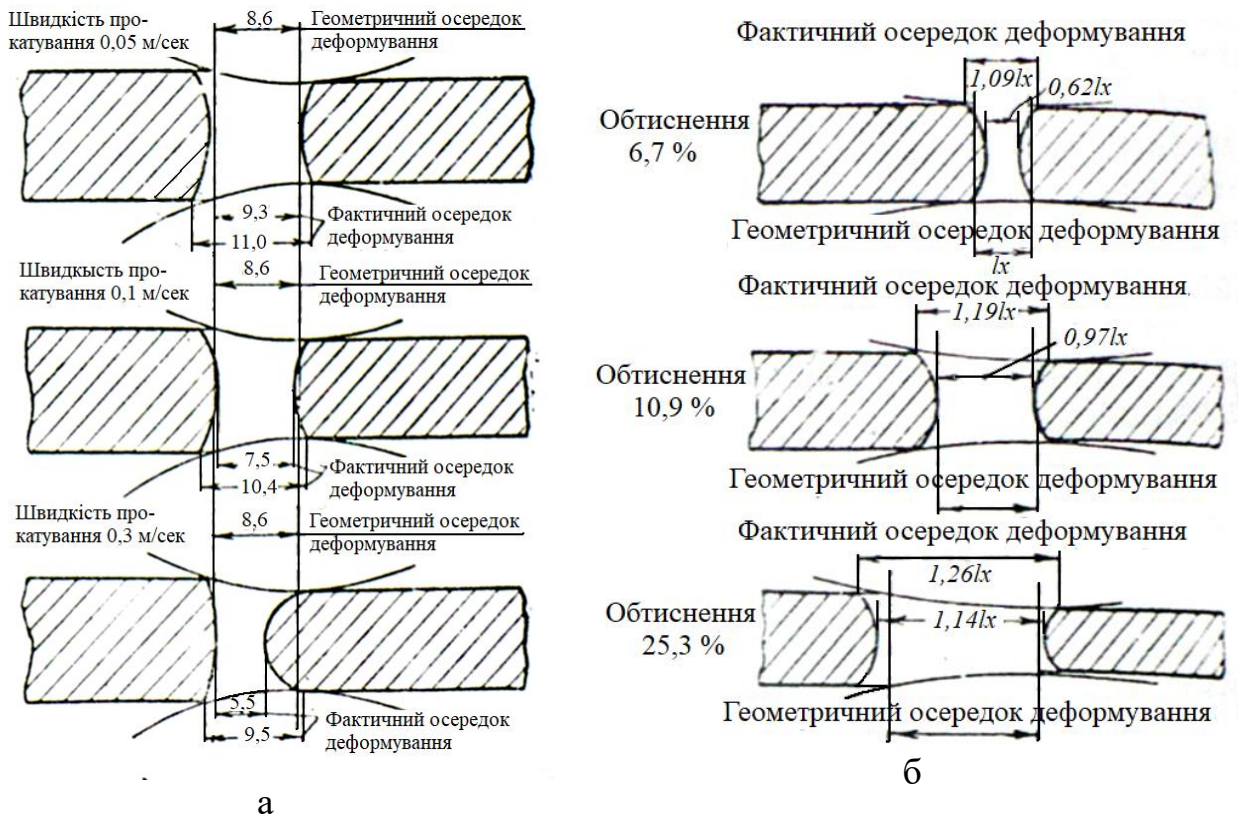


Рисунок 1.16 – Межі фактичного осередку деформації в залежності від швидкості прокатування (а) і ступеня деформування (б) [69]

С. О. Скрябін, розробив та експериментально підтвердив метод теоретичного дослідження процесу течії металу під час вальцювання заготовок під час їх об'ємного деформування в осередку деформації за контуром довільної форми та дискретно заданими граничними умовами [25]. Для їх визначення, на поверхню заготовки наносилася координатна сітка, за якою після деформації заготовки-зразка, визначається переміщення на поверхні області, що досліджується. Метод дозволяє показати переміщення металу в досліджуваній області, визначити нерівномірність деформації в залежності від співвідношення геометричних форм калібру і заготовки, що вальцюються в ньому, та визначити область можливої концентрації напружень [74], [75].

1.4 Вальцювання заготовок в умовах наближених до ізотермічних

Під час гарячого вальцювання, на течію металу в осередку деформації істотно впливає неоднорідність температурного поля металу, яка формується під впливом охолодження з боку валка, деформаційного розігріву металу та теплопередачі в навколишнє середовище [76].

При деформуванні металу холодним або підігрітим до невисокої температури інструментом, можливості дотримання оптимального термомеханічного режиму обмежені через охолодження заготовки під час її перенесення та подальшого деформування. В цей час знижується пластичність металу та зростає опір деформації, що обумовлює необхідність застосування більш потужного устаткування. Внаслідок неоднорідності температурного поля, спостерігається нерівномірність властивостей міцності за всього об'єму тіла, що деформується - збільшується знос інструменту. Тому, під час визначення температурного інтервалу деформування, передбачають неминучі втрати тепла заготовкою при транспортних переходах та в процесі деформування.

Ізотермічний метод ОМТ відрізняється від традиційних методів гарячого деформування тим, що в процесі обробки металу, температура тіла, що деформується і деформуючого інструменту витримується постійною, близькою до верхньої межі кувальних температур, протягом усього процесу. Створені ізотермічні умови дозво-

ляють деформувати в оптимальному термомеханічному режимі, за використанням явища надпластичності (деформування з малими швидкостями за постійної температури). Це дозволяє здійснювати процес за меншого опору деформування, забезпечувати високі пластичні показники властивостей оброблюваного металу [77], рівномірність деформації та властивостей в обсязі металу [78], зниження контактного тертя і напруг течії, рівномірність та стабільність температурного поля заготовки [79], а також заліковує мікротріщини внаслідок дифузії в металі.

Впровадження технологічного процесу вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів під подальше штампування в умовах ізотермічного та наближеного до нього деформування [80], [81], дозволило визначити особливості процесу штампування поковок з цих сплавів [82]:

- практично виключені теплові втрати заготовки в навколишнє середовище;
- деформація за низьких швидкостей і постійно високої температури заготовки, забезпечує високі пластичні властивості оброблюваних матеріалів, рівномірну деформацію та знижені питомі зусилля штампування;
- підвищена пластичність дозволяє штампувати деталі складної конфігурації з тонкими полотнами та високими тонкими ребрами за один перехід [83];
- постійні температурні умови та знижені зусилля штампування, забезпечують можливість отримання деталей високої точності, значне зниження трудомісткості та обсягу подальшої механічної обробки;
- низькі навантаження на штампи і стабільні температурні умови роботи штампів гарантують їх високу стійкість;
- при нагріванні вальцювальних штампів до 250...350 °C, розширення та випередження за постійного ступеня обтиску (рис. 1.17) – практично не змінюється, а зміна ступенів деформації призводить до зміни його абсолютних значень [82]. Це відбувається внаслідок досягнення рівності осьових стискаючих напруг направлених уздовж і поперек осередку деформації, а також рівності обсягів металу, що зміщуються в цих напрямках.

Результати попередніх досліджень не дозволяють гарантувати точні розрахунки вальцювальних калібрів для виготовлення штампівок зі складним поперечним

перерізом. Ця проблема може бути вирішена через додаткові дослідження впливу умов деформування наближених до ізотермічних на розширення та інші параметри процесу вальцювання.

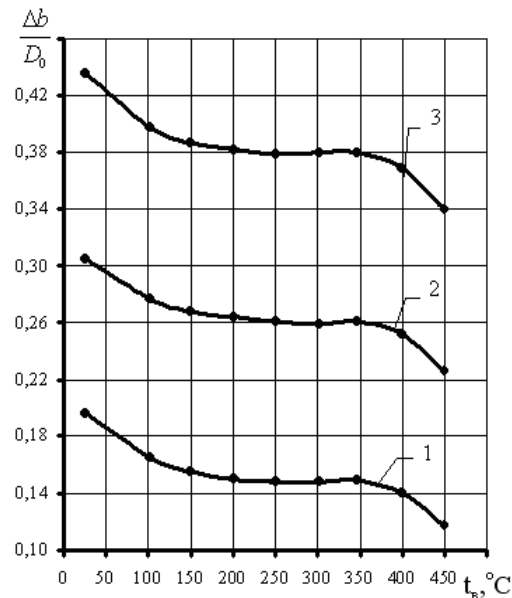


Рисунок 1.17 – Залежність розширення від ступеня обтиснення і температури нагріву вальцювальних штампів при вальцюванні заготовок круглого перерізу в овальних калібрах при температурі нагріву заготовок 450°C, ступінь обтиснення:
1 - 30%; 2 - 40%; 3 - 50%

1.5 Огляд існуючого програмного забезпечення для автоматизації проектування та моделювання технологічного процесу вальцювання

1.5.1 Принципи проектування технологічного процесу вальцювання

Технологія вальцювання досить складна для розробки, оскільки потребує проектування профілю кувальних вальців, кількості переходів, підбір форми заготовки, перехідних перерізів, тощо. Розробка такої технології вимагає кілька етапів.

У 70...90-ті роки роботи по дослідженню теоретичних та прикладних питань технологічного процесу вальцювання виконувались на НВО «ЕНІКмаш» [84], Уральському політехнічному інституті (УПІ) [13], [16], [43], [85...87], Ленінградському політехнічному інституті [88], Українському науково-дослідному інституті

авіаційних технологій (УкрНІАТ) [15], [25], [69], [89...91] та ін. Заготовки, що були отримані після вальцювання в калібрах, розрахованих за викладеними в вищенаведених працях методиками, відрізнялися від розрахункових, спостерігалось переповнення калібрів та невідповідність довжин поздовжніх розмірів. Різниця в цих методиках полягає в розрахунках ознак формозміни (різні методи приведення фасонних заготовок до спрощеної форми) в калібрах (розширення, обтиснення), енергосилових параметрів (тиск металу на валки, робота деформування), кінематики процесу (швидкість деформування, розмір випередження).

У 70...80-ті роки було створено методи автоматизації розрахунку процесу вальцювання, засновані на варіаційних принципах механіки деформованого тіла [36] та на методі відповідної полоси [92]. Ці методи базувались на неавтоматизованому проектуванні, в зв'язку з чим, переважно використовувались наближені графічні методи, що шкодило якості розрахунку. Не враховувалися властивості матеріалу та розміри ділянок, що оброблюється, температура вальцювання, протяжність зони випередження, ширина і натяг полоси, розміри осередку деформування та наявність в ньому бічних ПЗ. У роботі [93], описана розроблена авторами S. K. Biswas та W. A. Knight в 70-х роках програма для автоматизованого проектування геометрії вальцювального рівчака, заснована на різних закономірностях, визначених за досвідом впровадження вальцювання на різних машинобудівних підприємствах.

Процес розробки технології вальцювання заготовок під штампування повинен містити в собі наступні етапи: конструювання креслення заготовки, що вальцюється; визначення параметрів вихідної заготовки та кількості переходів і вибір системи калібрів; розрахунок поперечних та поздовжніх розмірів калібрів вальцювальних секторів за переходами; проектування вальцювальних секторів; вибір термомеханічних режимів для вальцювання заготовок конкретного сплаву; вибір засобів для моделювання ТП вальцювання. Окрім цього, задля отримання якісної штампованої поковки, необхідно врахувати особливості штампування конкретного сплаву, оскільки заготовка після вальцювання в вальцювальних штампах призначена для подальшої обробки.

Вибір схеми калібрування визначається за сукупністю наступних факторів: формою поперечного перерізу вихідної заготовки та заготовки після вальцювання на всіх її ділянках по довжині; кількістю переходів, обумовлених інтенсивністю режиму обтиснень [94]. Вихідними заготовками для отримання необхідного профілю на кувальних вальцях, є заготовки мірної довжини з сортового прокату круглого, квадратного та прямокутного перерізів.

Для виготовлення необхідної фасонної заготовки, може бути запропоновано декілька варіантів технологічного процесу вальцювання, що відрізняються кількістю технологічних переходів, схемою калібрування, формою та розмірами заготовки, що отримується, типорозміром кувальних вальців. Обмежувальні умови призводять до того, що розрахунок калібрування при багатоперехідному вальцюванні вимагає багаторазового перерахунку. Тому досягнення оптимального варіанту, за якого в кожному переході буде використовуватись максимально можливе витягування, вимагає тривалого та трудомісткого розрахунку [15]. Порядок проектування технологічного процесу вальцювання при цьому розбивається на ряд нетрудомістких підзавдань.

При використанні САПР стає можливою реалізація ідеї «віртуального виробництва», згідно з якою, за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, здійснюється моделювання повного циклу виготовлення виробу, за використанням комплексу креслярської документації, розробленні тривимірної моделі, проектуванні технології виробництва та моделюванні самого процесу виготовлення. Такий підхід дозволяє прогнозувати ознаки готового виробу та, в разі потреби, вносити зміни до технологічного процесу або до самого виробу, що розробляється [95]. Ефективність застосування автоматизованого проектування пов'язана з великим обсягом розрахунків при розробленні ТП вальцювання, а також при проектуванні вальцювальних секторів, які зазвичай вимагають неодноразового перерахунку [96].

Для створення тривимірних моделей вальцювальних секторів та вихідної заготовки, автоматизована система повинна передати дані до САД-системи для їх побудови. З метою пошуку недоліків технології та зміни геометрії інструменту, розподілу температури, опору та швидкості деформування, середньої напруги та інших параметрів в заготовці, можна здійснювати попередній аналіз технологічного процесу

вальцювання в одній з програм скінченно-елементного моделювання з обробки металів тиском. Розробка керуючих програм для верстатів з ЧПУ з виготовлення оснащення, виконується в САМ-системах.

Завдання системи автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання: отримувати дані розмірів штампованої поковки для розрахунку з САД-системи, будувати епюри, ескізи поперечних перерізів і діаметрів, визначати число перехідних ділянок, вибирати систему калібрів, виконувати розрахунок системи калібрів, будувати тривимірні моделі вальцювальних секторів та вихідної заготовки. В автоматизованій системі все залежності, за якими технологи виконують розрахунок ТП вальцювання, повинні бути наведені у вигляді рівнянь, що були отримані за допомогою методів апроксимації експериментальних даних [97].

1.5.2 Системи проектування та моделювання технологічного процесу вальцювання

Однією з найбільш відомих систем автоматизації проектних робіт ТП вальцювання є програмний комплекс VeraCAD [17], [98], [99] фірми Eratz Ingeieur Buro [100], який дозволяє повністю виконувати розробку технологічного процесу вальцювання, починаючи з моделі штампованої поковки і закінчуючи моделями калібрів вальцювальних секторів. Методика проектування вальцювання з використанням САПР складається з декількох етапів [99] та заснована на використанні емпіричних закономірностей, отриманих компанією розробником «SMS Eunicо» [101].

Вихідними даними для проектування процесу вальцювання із застосуванням САПР VeraCAD є 3D-модель деталі або поковки, за використанням якої у відповідному модулі будується епюра перерізів деталі. Потім за епюрою перерізів, здійснюється автоматична побудова заготовки, що вальцюється, розрахунок кількості переходів та побудова калібрів. Вихідними даними VeraCAD є експорт геометрії валків у форматі, що використовується програмою.

До недоліків VeraCAD належать: відносно неточне автоматичне визначення форми поковки після вальцювання та відсутність врахування особливостей матеріа-

лу заготовки при розрахунку ТП вальцювання. Також мало відомо про методику проектування технологічного процесу вальцювання, що реалізована в даній САПР [102].

З діючих на виробництві систем, описана система «Сектор» [103], яка являє собою комплекс технічних та програмних засобів, що забезпечують автоматизоване проектування технологічних процесів і вальцювальних штампів для гарячого вальцювання фасонних заготовок та є впровадженою на Мінському тракторному заводі. В роботі [104] наведена програма «АНАЛІЗ-ЛС», що розроблена в УПІ, яка використовується для аналізу та оптимізації технологічних режимів прокатки сортових профілів. В роботі [105] наведено обчислювальний комплекс SPLEN (Rolling), що призначений для проектування процесів прокатки і розрахунку елементів інструменту, оснащення та обладнання.

С. О. Скрябіним [91, 96] було розроблено методику з автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання, за якою визначаються технологічні параметри процесу вальцювання для алюмінієвих, титанових сплавів та конструкційних сталей, що враховують нерівномірність розподілу поздовжньої та поперечної деформацій в залежності від співвідношення геометричних форм калібру та заготовки, що вальцюються в ньому [15]. За цією методикою розрахунку, було розроблено програмний комплекс та впроваджено на ДАХК «Артем» (Київ). Але наразі він потребує доробки та розширення відповідно до можливостей сучасних програмних систем, а також змін в існуючих методиках розрахунку технологічного процесу.

Сучасні САД-системи надають широкі можливості для створення тривимірних моделей складнопрофільних інструментів як засобами самої САПР, так і за допомогою функцій АРІ-зборок з можливістю імпорту в різні формати (IGES, STEP) для подальшого аналізу отриманої геометрії засобами САЕ-систем.

До систем автоматизованого побудови складнопрофільних інструментів відносять САД-системи: Delcam PowerSHAPE, SolidWorks, КОСМОС 3D, Unigraphics, ProENGINEER та ряд інших.

Найбільш простим та зручним з точки зору інтеграції із розроблюваним комплексом САПР вальцювання, є SolidWorks - система автоматизованого проектуван-

ня, інженерного аналізу та підготовки виробництва виробів будь-якої складності і призначення [106]. Для інтеграції з цією CAD-системою існує так званий SolidWorks API - інтерфейс прикладного програмування, що дозволяє розробляти власні програми на платформі САПР SolidWorks. API-функції забезпечують прямий програмний доступ до функціональних можливостей пакета SolidWorks [107].

CAE-системи для моделювання процесів обробки тиском існують для перевірки розробленої технології. Вони дозволяють «довести» технологію за допомогою розрахунків на комп'ютері без трудомістких експериментів з металом. Для моделювання реальних фізичних процесів в заготовці, що деформується найчастіше використовуються чисельні методи скінченних (МСЕ) та граничних елементів (МГЕ). Ці методи дозволяють отримати найбільш повне уявлення про формозміну поковки при пластичному деформуванні, напружено-деформований стан, енергосилові параметри процесу та ін. [108].

Програмний комплекс QForm (КванторСофт, Росія) - забезпечує моделювання всіх стадій технології вальцювання, аналіз умов захоплення заготовки вальцями, деформацію заготовки по переходах і кантування між переходами, також дозволяє визначати кінематику течії металу [109]. Програма може передбачати виникнення таких дефектів як затиснення, незаповнення і неможливість отримання форми [110], [111]. Отримана після вальцювання заготовка може бути передана далі для моделювання процесу об'ємного штампування [112].

Функціональні можливості моделювання ТП вальцювання в QForm: висока точність розрахунку процесу течії металу; точний імпорт геометрії з CAD-систем виконується у STEP або IGES форматі (геометрія апроксимується за квадратичними поверхневими елементами); процес покрового розрахунку здійснюється за повного автоматичного налаштування кроку та збільшення ступені деформування.

Іншими популярними системами для вирішення технологічних задач з вальцювання є також спеціалізовані системи DEFORM [113], FORGE [114], [115] і MSC з системою Autoforge/Superforge [116]; універсальні ANSYS [117], Nastran, MARK та ін. [118].

Висновки за розділом 1

Проведений аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновки щодо актуальності дослідження, розроблення та впровадження маловідходних технологічних процесів штампування та вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів на підприємствах авіаційної, ракетної, автомобільної та ін. промисловостей. Завдання щодо вдосконалення металозберігаючих технологій встановили значне застосування у виробках наведених галузей алюмінієвих сплавів, низький коефіцієнт використання металу, висока трудомісткість, а також тривалий цикл виготовлення якісних штампованих деталей.

Встановлено, що ковзання металу в поперечному напрямку під час вальцювання, з появою поперечних сил тертя проявляється у вигляді розширення і призводить до додаткової витрати енергії та появи додаткових напружень в металі, що знижують його технологічну пластичність. Внаслідок цього, потрібні додаткові етапи вальцювання і операції по відновленню технологічної пластичності металу для усунення розширення. Однак при формуванні складної геометрії перерізу різних калібрів, розширення відіграє позитивна роль.

Аналіз методів, що використовуються для визначення впливу різних технологічних параметрів на розширення при вальцюванні на гладкій бочці, показав найбільш вагомими є протяжність зони випередження, логарифм деформації, ширина і натяг смуги, кривизна валків та вплив зовнішніх частин ОД. Для операцій вальцювання в калібрах, для розрахунку розширення використовуються методи емпіричні; відповідної і наведеної полоси, описаних прямокутників методи та засновані на використанні законів механіки деформованого тіла. Найбільш точними з яких є останні, що підтвердив С. О. Скрябіна при розробленні методики, яка враховує максимальну кількість факторів (обтиснення, дуга захоплення та нерівномірність розподілу деформацій по перерізу калібру).

Відсутність в методах розрахунку розширення обліку впливу, який здійснюють позаконтактні зони, спричиняє суттєві відхилення, від експериментальних даних, що були розраховані за вже існуючими формулами. Наразі, коефіцієнт впливу

ПЗ (n'') використовується тільки в оцінці енергосилових параметрів процесу вальцювання.

З аналізу літературних джерел встановлено, що існують різноманітні методи експериментальної оцінки розмірів розміру фактичного осередку деформування, для розширення діапазону досліджень існує необхідність в методі, що заснований на використанні сучасних методів моделювання процесу вальцювання, та дозволить ефективно визначати оптимальні для деформування умови.

Актуальним є вирішення завдання з отримання розрахункових залежностей для визначення розміру коефіцієнту впливу наближених до ізотермічних умов деформування, на розширення при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів, що надасть можливість виконувати точні розрахунки розмірів вальцювальних калібрів.

Аналіз систем проектування ТП вальцювання показав, що головною проблемою при створенні автоматизованої системи є відсутність єдиного алгоритму розрахунку та неможливість формалізації процесу розрахунку деяких технологічних операцій. Це спричиняє необхідність розробки САПР для розрахунку параметрів технологічного процесу вальцювання заготовок та створення тривимірних моделей вальцювальних секторів із урахуванням впливу ПЗ та ізотермічних умов деформування.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ВАЛЬЦЮВАННЯ ЗАГОТОВОК З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

2.1 Моделювання та дослідження параметрів вальцювальних операцій за допомогою програмного комплексу QForm3D

Чисельна модель процесу деформування заснована на теорії течії [119...121], за якою, матеріал заготовки розглядається як нестисливе в'язко-пластичне тіло. Інструмент при розрахунках формозміни заготовки розглядається як абсолютно тверде тіло та описується за пружно-пластичною моделлю. Пружні деформації не розглядаються через їхню незначущість у порівнянні з пластичною деформацією заготовки. У програмі розрахунки виконуються за системою рівнянь в'язко-пластичної течії металу в Ейлеревій системі координат. Для побудови моделей заготовки та інструмента - використовується система SolidWorks [106]. Розрахунок виконується за рівняннями руху без урахування масових сил [122]:

а) рівняння рівноваги $\sigma_{ij,j} = 0$;

б) швидкість деформування:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \cdot (v_{i,j} + v_{j,i}); \quad (2.1)$$

де $v_{i,j}, v_{j,i}$ - номінальні величини компонентів швидкості (рис. 2.1, а).

в) рівняння течії, що зв'язує дівіатори тензорів швидкостей деформації та напружень (теорія пластичності Сен-Венна-Мізеса):

$$\sigma'_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}_{ij}; \quad (2.2)$$

г) умова нестисливості $v_{i,j} = 0$;

д) рівняння теплопровідності (енергетичного балансу):

$$\rho \cdot c \cdot \dot{T} = (k_1 T_{,i})_{,i} + \beta \bar{\sigma} \dot{\bar{\varepsilon}}, \quad (2.3)$$

де охолодження заготовки під час транспортування від нагрівального пристрою до пресу або на протязі пауз між ударами вважається як температурна задача в твердому тілі;

е) реологічне рівняння, що зв'язує опір деформації з напругою деформації, швидкістю деформації і температурою для жорстко-пластичного матеріалу, яке визначається спільним впливом процесу зміцнення і знеміцнення [123]:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T), \quad (2.4)$$

де $\sigma_{ij,j}$ - тензор напружень; $\dot{\varepsilon}_{ij}$ - тензор швидкостей деформації; $v_{i,j}$ - вектор швидкості; σ'_{ij} - девіатор напруг; $\bar{\sigma}$, $\bar{\varepsilon}$, $\dot{\bar{\varepsilon}}$ - інтенсивність напружень, деформацій і швидкостей деформацій відповідно; ρ - густина; c та k_1 - коефіцієнти теплоємності і теплопровідності матеріалу; T - температура; β - коефіцієнт переходу роботи пластичної деформації в тепло (звичайно $\beta = 0,9 \dots 0,95$).

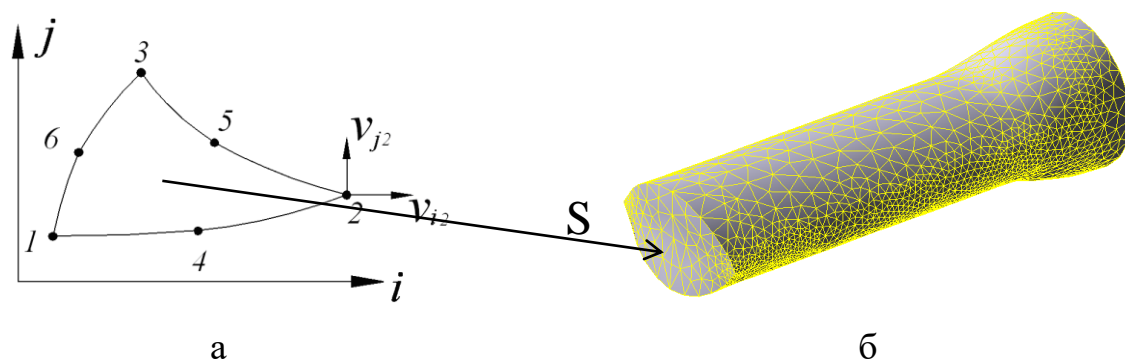


Рисунок 2.1 Квадратичний трикутний елемент (а) і циліндрична заготовка з сіткою скінченних елементів після деформації в овальних калібрах (б)

Для формування завдання моделювання, з метою визначення загальних параметрів матеріалів, що використовуються в розрахунках, до бази даних було додано

довідкові дані [124], [125] за реологічними властивостями матеріалів (рис. 2.2, додаток Б). Дискретизація рівнянь руху (2.1, 2.2), здійснюється на підставі принципу віртуальних швидкостей і робіт, та методу скінченних елементів. Розрахунковими одиницями є вузлові значення швидкостей і середніх напружень. Ці параметри на кожному переході розрахунку визначаються за скінченно-елементною сіткою, що складається з лінійних чотирьовузлових тетраедрів і квадратичних трикутників з шістьма вузлами (рис. 2.1, а).

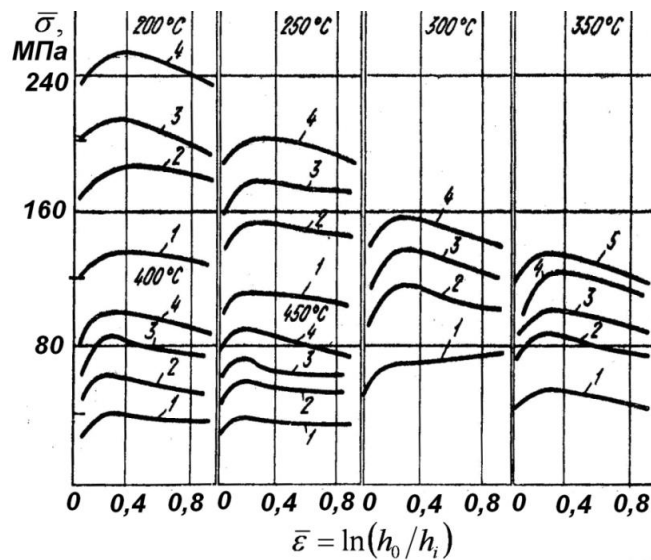


Рисунок 2.2 – Криві деформаційного зміцнення сплаву АК6 [124]. Швидкість деформації, s^{-1} : 1 – 10^{-2} ; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

У QForm3D використовується квадратична скінченно-елементна апроксимація для поверхонь, що дозволяє підтримувати постійний об'єм заготовки. Програма на кожному етапі розрахунку автоматично генерує скінченно-елементну сітку. Оптимальний розподіл щільності якої забезпечує адаптивний алгоритм її розподілу (рис. 2.1, б). Кінематичні граничні умови формуються на різних поверхнях деталі S (рис. 2.1, б):

а) на поверхні S_v (між заготовкою та штампом з'являються зони прилипання), де задана швидкість v_i^0 , граничні умови будуть виражені через швидкості: $V_i = v_i^0$;

б) на поверхнях S_F , де діють зусилля, граничні умови будуть: $\sigma_{ij} \cdot n_j = F_t$;

в) на поверхні S_S , де задані швидкість і зусилля (відбувається ковзання металу по поверхні інструменту), граничні умови є змішаними:

$$\left. \begin{array}{l} \text{- умова непроникності} \\ \text{- умова тертя} \end{array} \right\} \begin{array}{l} v_i \cdot n_i = v_n^0, \\ \sigma_{ij} \cdot n_i \cdot l_j = F_i, \end{array} \quad (2.5)$$

де F_i – дотична складова діючих на поверхню зусиль, відповідає тертю яке залежить від різних параметрів процесу; l_j – одиничний дотичний вектор, спрямований у протилежний бік від вектору швидкості заготовки щодо штампа Δv_i ($l_i = -\Delta v_i / |\Delta v|$), де нормальні і дотичні вектори лежать в площині (або на осях) симетрії.

З метою подолання недоліків простих моделей тертя для контакту заготовка - інструмент, система QForm включає розрахунок за моделлю тертя, запропонованою і експериментально перевіреною за А. М. Левановим [126]. Ця модель об'єднує переваги моделей тертя Амонтона-Кулона та Зібеля [127] і дозволяє врахувати переваги закону постійного тертя і вплив низького контактного тиску:

$$F_f = m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} (1 - e^{-1.25(\sigma_n / \bar{\sigma})}), \quad (2.6)$$

де m – фактор тертя зсуву, значення якого наведено А. М. Левановим для різних пар контактних інструментальних матеріалів і матеріалів, що деформуються, а другий вираз в дужках бере до уваги вплив нормального контактного напруження.

Для розрахунку температурного поля в заготовці при деформації необхідно знати розподіл тепла в заготовці перед формозміною. У різних частинах поверхні заготовки при розрахунку використовуються різні теплові граничні умови:

1) теплообмін на вільній поверхні:

$$\left. \begin{array}{l} \text{- конвекцією} \\ \text{- випромінюванням} \end{array} \right\} \begin{array}{l} k_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = -h \cdot (T - T_\infty), \\ k_1 \frac{\partial T}{\partial n} = -\varepsilon \cdot \sigma' \cdot (T^4 - T_\infty^4), \end{array} \quad (2.7)$$

2) теплообмін на контактній поверхні:

$$\left. \begin{array}{l} \text{- за допомогою коефіцієнту теплопередачі} \\ \text{- за рахунок тертя на контактній поверхні} \end{array} \right\} \begin{array}{l} k_1 \frac{\partial T}{\partial n} = -h_{lub}(T - T_d), \\ k_1 \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{F_f / \Delta v}{2}, \end{array} \quad (2.8)$$

де h – коефіцієнт тепловіддачі, T – температура на поверхні заготовки, T_∞ – температура навколишнього середовища, ε – ступінь чорноти, σ' – константа Стефана Больцмана, h_{lub} – коефіцієнт теплопередачі мастила, T_d – температура штампа, враховується, що тільки половина тепла, що виділяється, витрачається на нагрів заготовки.

При тривимірній течії металу, всі компоненти тензора деформації не рівні нулю і повинні бути розраховані. Для практичних цілей використовується простий показник інтенсивності деформації (ступінь деформації), яка включає в себе всі компоненти деформації у вигляді залежності [122]:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + 6 \cdot (\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{xz}^2)}. \quad (2.9)$$

Швидкість деформації є похідною від інтенсивності деформації і розраховується за формулою (2.1) для всіх вузлових точок скінченних елементів, на які розбивається заготовка.

Середня напруга деформації розраховується за формулою:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad (2.10)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – напруги по трьом головним осям.

Відповідно до закону збереження енергії, процеси в тілі, що деформується, здійснюється тиском поля напруги на поле швидкостей деформації ε_{ij} що дорівнює роботі, що виробляє сила зчеплення з поверхнею для поля швидкостей δv . Для вирішення завдань течії використовуються ізопараметричні елементи другого порядку.

Поля швидкості апроксимують за допомогою квадратичних функцій форми. Результати розрахунку показують зміну наступних параметрів, що визначають процес деформації заготовки: геометрія заготовки, температура, ступінь деформації, швидкість деформації, опір деформації, середня напруга, швидкість течії матеріалу заготовки за трьома осями, робота деформування. Також, в програмі всередині заготовки, що деформується, розміщена ціла ділильна сітка з нанесеними лагранжевими лініями, зміна якої при деформації дозволяє проаналізувати течію металу, оцінити переміщення мікрооб'ємів металу в ході деформування, визначити картину текстури в заготовці.

2.2 Методика дослідження геометричних параметрів заготовок при моделюванні процесу вальцювання

Меню програми QForm3D [128] передбачає можливість отримання після прокатування (рис. 2.3, а) або вальцювання (рис. 2.3, б) контуру поперечного перерізу заготовки (рис. 2.4, а) та перенесення його перерізу в векторний формат DXF (рис. 2.5, б). Площа та лінійні розміри перерізу, отримані в форматі DXF, вимірюються в програмі для автоматизованого векторного проектування «AutoCad», яка виконує розрахунки з точністю до восьмого знаку після зап'ятої за принципом інтегрування часткових функцій, з яких складається крива, що описує форму калібру [129]. Поділення заготовки на скінченні елементи, викликає певну нерівномірність поперечного перерізу вздовж заготовки, що отримується після деформації. Велику точність вимірювань забезпечують перевіркою геометричних параметрів перерізів (6...10 спроб) по всій довжині заготовки, що прокочується (рис. 2.4). За отриманими даними, визначається середнє значення ширини і площі перерізів для даного випад-

ку прокатування, що використовується в подальшому для розрахунків розмірів розширення.

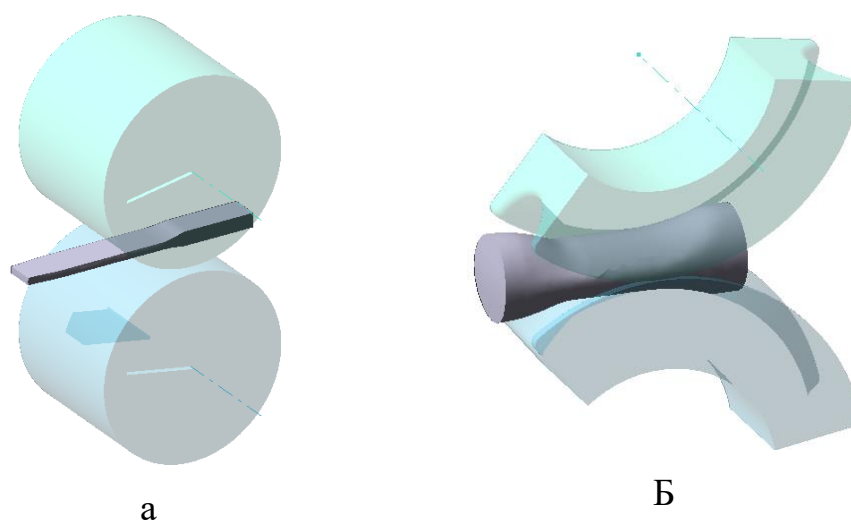


Рисунок 2.3 – Моделювання процесу прокатування (а) та вальцювання (б)

Для дослідження параметрів, які визначають довговічність заготовок, що вальцюються в залежності від ПЗ, необхідно розглянути геометрію осередку деформації (ОД) - ділянки з обсягом металу, що деформується. Осередок деформації визначається за геометричною і фактичною зонами (осередками) деформування (рис. 2.5).

Геометричний ОД - ділянка деформованого металу, яка знаходиться між валками і перерізами входу металу у валки і виходу його з валків AA_1BB_1 (рис. 2.5, а). Геометричний ОД залежить від діаметра валків, ширини заготовки, товщини її до та після вальцювання, контактної поверхні. Розмір фактичного ОД залежить не тільки від геометричних факторів, а й від умов вальцювання: швидкості деформації, ступеня обтиску, коефіцієнту тертя на контактній поверхні і ін.

Для визначення розрахункових розмірів фактичного ОД, в даній роботі була використана програма QForm3D [128]. Розміри фактичного ОД визначаються в залежності від ступеня деформації за розміром поля швидкостей деформації (рис. 2.5, б) в горизонтальному перерізі центру заготовки та меридіональному (вертикальному) перерізі.

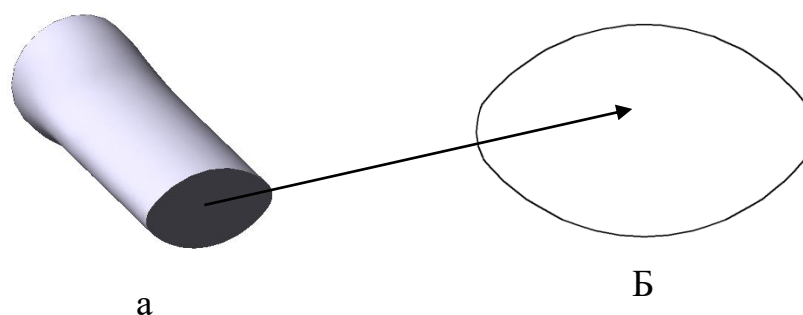


Рисунок 2.4 – Отримання геометрії поперечного перерізу заготовки: а) після вальцювання в овальних калібрах, б) периметр поперечного перерізу, отриманого експортом з QForm3D до AutoCad

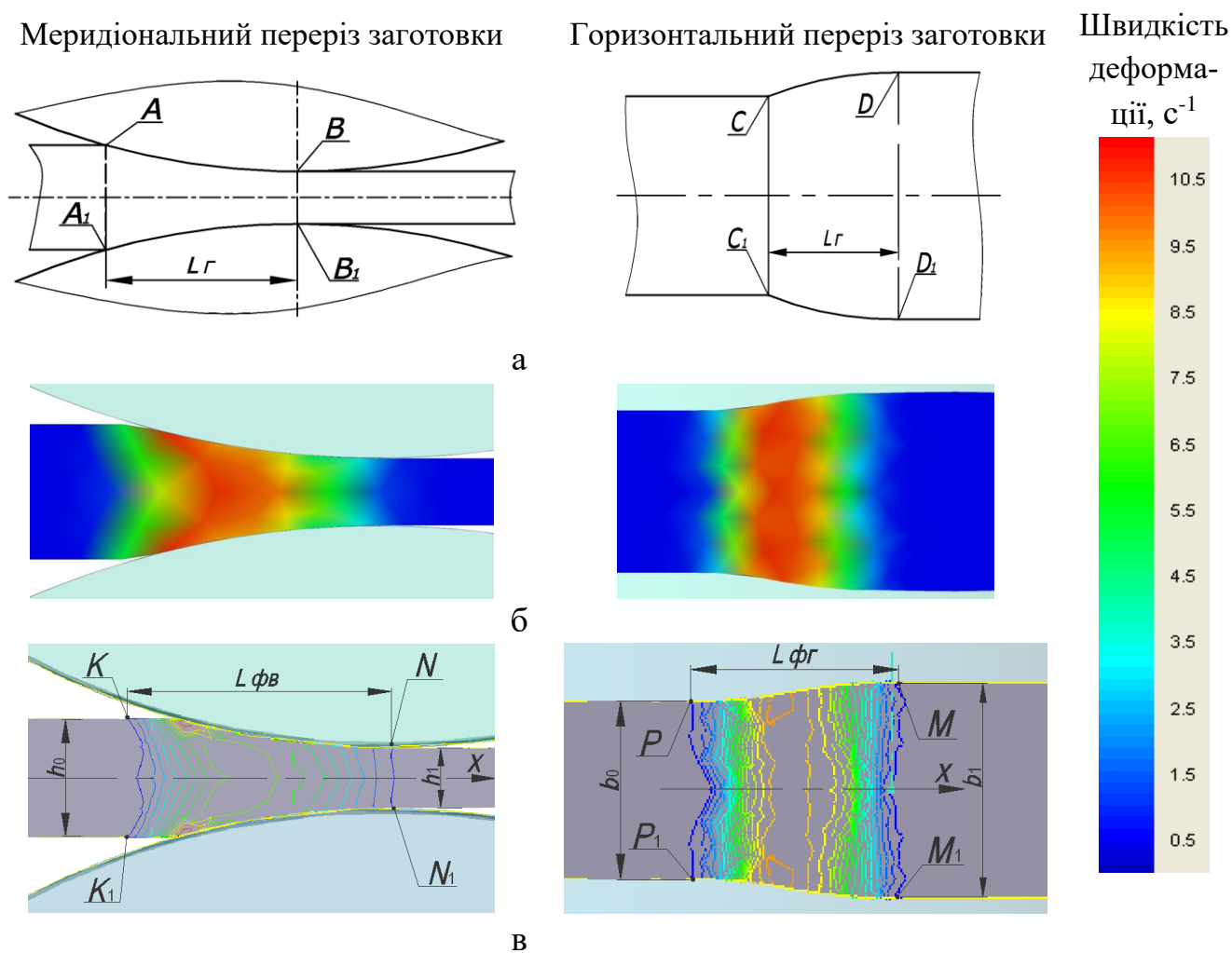


Рисунок 2.5 – Схема перерізів в осередку деформації заготовки: геометричний осередок деформації (а), поле швидкостей деформацій (фактичний осередок деформації) кольорова заливка (б), ізолінії (в)

Лінійне відображення кордонів фактичного ОД отримується за обраним типом відображення у вигляді ізоліній (рис. 2.5, в). Зміна кольору ізоліній від синього до червоного означає зростання швидкості деформування від 0 до 11 с^{-1} . Для вимірювання фактичної площі меридіонального ОД ($F_{\text{ф.о.м.}}$), використовується переріз меридіональною площиною середини заготовки, який зберігається спочатку у вигляді растрового зображення формату BMP. Отримане растрове зображення за допомогою програми ScanPro конвертується до векторного формату DXF, який аналізується у системі AutoCad.

AutoCad надає можливість визначення площ геометричного ($F_{\text{г.о.м}}$ и $F_{\text{г.о.з}}$) AA_1BB_1 і CC_1DD_1 та фактичного ($F_{\text{ф.о.м}}$ и $F_{\text{ф.о.з}}$) KK_1NN_1 і PP_1MM_1 осередку деформування в горизонтальному перерізі центру заготовки і меридіональному перерізі для всіх ступенів деформації заготовок без позаконтактної зони та з позаконтактними зонами різних форм. Довжина геометричного ОД (L_g), визначається за схемою на рис. 2.5, а. Довжина фактичного ОД (L_f), визначається за максимальною довжиною меридіонального фактичного ОД (рис. 2.5, в).

2.3 Апроксимація залежностей технологічних параметрів вальцювання заготовок

Для отримання інформації за результатами досліджень, будуються графіки залежності геометричних та технологічних параметрів вальцювання (коефіцієнти розширення, випередження, відносні відхилення) від даних процесу деформування, що варіюються (ступінь деформації, діаметр заготовки, кривизна калібру, тощо). Отриманий графік залежності порівнюється за зовнішнім виглядом з графіками, що були побудовані за допомогою відомих формул, які містять невелику кількість параметрів (коефіцієнти, показники ступенів деформації, тощо), зміною яких можна в тій чи іншій мірі змінювати вигляд кривої. Загальними ознаками, що дозволяють оцінювати можливість використання залежностей, є поведінка функції за великих та малих значеннях аргументу, опуклість кривої вгору або донизу на окремих ділянках, тощо.

Після вибору відповідної формули апроксимації, відбувається операція підбору значень параметрів залежності. При цьому необхідно, щоб різниця між дослідженими значеннями і значеннями, що знайдені за формулою, не перевищувала помилок експерименту. У разі занадто великої різниці, треба підбирати інший відповідний графік і повторювати спробу [130]. Процес підбору графіків на підставі існуючих формул апроксимації здійснюється за допомогою методів статистичної обробки даних. Таким чином, автоматизується процес отримання формульних наведень різних залежностей технологічних параметрів процесу для розрахунку технології виготовлення вальцьованих заготовок.

Для вирішення завдання за визначенням зв'язку між залежною змінною Y (розширення (Δb) або випередження (S)) та розміром співвідношення геометричних форм калібру і заготовки, що деформується в ньому (фактор X), в праці використовується метод нелінійного регресійного аналізу. Формула регресії була розроблена С. О. Скрябіним в працях [4], [15] та використана для опису залежності коефіцієнту нерівномірності деформації у вигляді нелінійної залежності:

$$Y = \sqrt{aX^2 - bX + c} - dX + e, \quad (2.14)$$

де Y – коефіцієнт, що враховує вплив на розширення або випередження нерівномірності деформації за шириною та висотою заготовки для різних систем калібрів; X – для системи калібрів круг-овал – співвідношення геометричних форм калібру і заготовки, що деформується в ньому, що виражається через співвідношення радіусів овального калібру та заготовки (i) (табл. 1.5); для системи калібрів овал-ромб – співвідношення осей овальної і ромбічної заготовок ($\psi = a_{ов.з.} \cdot a_{р.з.}$); для систем калібрів овал-квадрат і овал-круг – співвідношення осей овальної заготовки $a_{ов}$; для систем калібрів ромб-квадрат і ромб-круг – співвідношення осей ромбічної заготовки a_p ; a, b, c, d, e - параметри нелінійної регресії.

Параметри регресії - використовуються при обчисленні в програмному комплексі для статистичної обробки даних Statistika [131] за методами нелінійного оці-

нювання, які являють собою узагальнення методу множинної регресії та дисперсійного аналізу. На підставі наявних експериментальних графіків [1], обраної формули нелінійної залежності (2.14) та перевірки збіжності за формулою (2.15), в програмі Statistika – для різних систем калібрів розраховуються параметри a, b, c, d, e . Після підстановки розрахованих параметрів в (2.14), відбувається формування залежностей для визначення коефіцієнтів, які враховують вплив на розширення (Δb) та випередження (S) нерівномірності деформації за шириною та висотою заготовок, що вальцюються з алюмінієвих сплавів в різних системах калібрів.

В разі використання для визначення залежностей коефіцієнтів математичної двофакторної моделі – в програмному комплексі Statistika, розрахунок моделі поверхні та відповідної поліноміальної залежності, відбуваються в модулі з побудови тривимірних діаграм розсіювання даних та підгонки точок до поверхні за допомогою полінома другого ступеня.

Апроксимуючі процедури – оцінюють заданий вид залежності між змінною Y та фактором X за допомогою підбору коефіцієнтів, що мінімізують суму квадратів залишків (Q_e) між значеннями змінної Y , що спостерігаються при $X = X_i$, кількості дослідів $i=1, 2, \dots, n$ та розрахованими значеннями, які отримуються за емпіричною моделлю ($\tilde{Y}_i = f(X_i)$), визначаючи залишкову дисперсію [131], що сприяє максимальній відповідності функції:

$$S_3^2 = \frac{Q_e}{n-2} = \frac{1}{n-2} \cdot \sum p_i (Y_i - \bar{Y}_i)^2. \quad (2.15)$$

де \bar{Y}_i - середнє значення функції відгуку у i -му досліді.

За результатами експерименту розраховується дисперсія помилок, що визначає ступінь розсіювання, яка викликана експериментальною помилкою:

$$S_n^2 = \frac{Q_n}{\Sigma(p-n)} = \frac{1}{\Sigma(p-n)} \cdot \sum (\bar{Y}_i - \tilde{Y}_i)^2 \quad (2.16)$$

де $Q_y = \sum (Y_i - \bar{Y})^2$ – сума квадратів різниць між середніми експериментальними даними для кожного дослідження та значеннями емпіричної функції в експериментальних точках; p – кількість паралельних дослідів в кожному дослідженні.

Методи оцінювання починають працювати з набору початкових значень, які в подальшому послідовно уточнюються в кожній ітерації. Коефіцієнт детермінації дорівнює частці в діапазоні результатів спостережень $Y_i, i=1, 2, \dots, n$ відносно горизонтальної прямої $Y = \bar{Y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i$ та визначає адекватність обраної формули регресії за результатами вимірювань: $R^2 = 1 - Q_e / Q_n$.

За використанням дисперсії помилок та залишкової - розраховується значення статистичного коефіцієнту Фішера, який оцінює адекватність отриманої моделі:

$$F_p = S_3^2 / S_n^2 \quad (2.17)$$

Розрахункове значення критерію Фішера порівнюється з табличним F_T - обирається за таблицями розподілення Фішера, або розраховується через відповідну функцію (ФРАСПОБР) в MS Excel. Розрахунок виконується для заданого рівня значущості у відповідності з довіреною вірогідністю P та кількістю ступенів свободи чисельника ($v_3 = n - 2$) та знаменника ($v_n = \sum(p - n)$). Розмір довіреної вірогідності для досліджень була прийнята $P = 0,95$.

Якісне визначення статистичної міри збігу показників розширення (випередження) різних заготовок при відповідних ступенях деформації (ступеня лінійної та нелінійної залежності) між показниками розширення, визначається за ступенем наближення модуля коефіцієнту кореляції Пірсона (r) до одиниці [130], [131] та розраховується за функцією (КОРРЕЛ) в MS Excel.

2.4 Загальна методика дослідження впливу позаконтактних зон на поперечну деформацію під час вальцювання заготовок

2.4.1 Вплив форми і розмірів позаконтактних зон на розширення при вальцюванні прямокутних заготовок в гладких валках

Методика розрахунку заснована на експериментальних дослідженнях [1] за визначенням лінійного показника розширення ПЗ $(\Delta b'/\Delta h)_{ПЗ}$. Для розрахунку використовувалися заготовки, у яких бічні ПЗ мають різну форму (прямокутну, трапецієподібну і трикутну) (рис. 2.6) та розміри (B) (рис. 1.8).

Моделювання процесу прокатування в QForm3D здійснювалось за наступними даними процесу: діаметр гладких валків $\varnothing 260\text{мм}$; частота обертання валків 26 хв^{-1} ; температура навколишнього середовища 20°C ; коефіцієнт тертя $\mu = 0,35$; ступені деформування заготовки $\varepsilon = 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60\%$. Дані розраховуються для заготовок з чотирма різними поперечними розмірами позаконтактних зон прямокутної, трапецієподібної і трикутної форм з рівними площами перерізів (табл. 2.1, рис. 2.6).

Таблиця 2.1 – Ширина (B) позаконтактних зон прямокутної, трапецієподібної і трикутної форм з рівними площами перерізів (рис. 2.7)

Площа перерізу, мм^2	Прямокутна ПЗ, мм	Трапецієподібна ПЗ, мм	Трикутна ПЗ, мм
50	5	6,25	10
100	10	12,5	20
150	15	17,5	30
200	20	25	40

Лінійні розміри перерізів прокатаних заготовок в системі AutoCad: h_0, b'_0, h_1, b'_1 (рис. 2.6), порівнюються їх з початковими розмірами для розрахунку показника розширення $(\Delta b'/\Delta h)_{ПЗ}$ для ПЗ, де $\Delta b'$ - зміна ширини ПЗ зразка до і після вальцювання:

$$\Delta b' = b'_1 - b'_0, \quad (2.18)$$

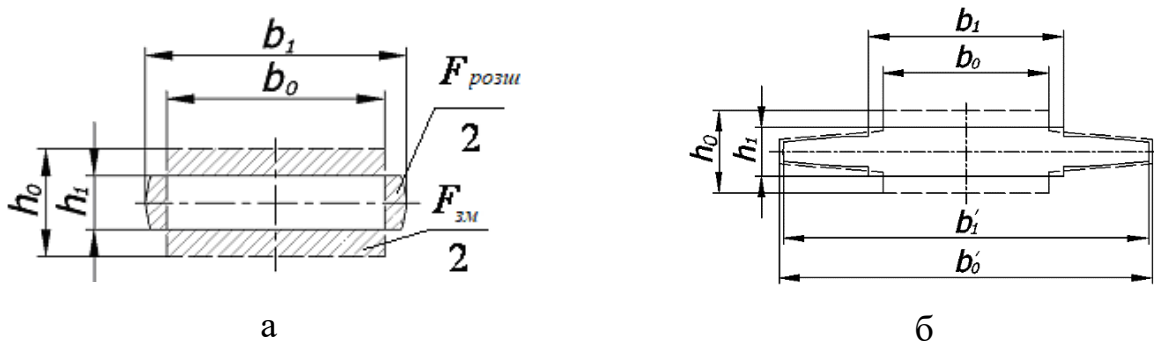


Рисунок 2.6 – Схеми для визначення розмірів і площ під час вальцювання зразків прямокутного без ПЗ (а) і трапецієподібного з ПЗ (б) перерізів

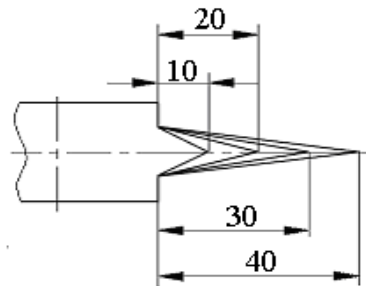


Рисунок 2.7 – Схема для визначення розширення для різної ширини позаконтактних зон

2.4.2 Визначення впливу позаконтактних зон на розширення при вальцюванні циліндричних заготовок в гладких валках та калібрах

Для моделювання процесу прокатування циліндричних заготовок в гладких валках, система QForm3D отримує наступні дані: діаметр валків $\varnothing 260$ мм; частота обертання валків 26 хв^{-1} ; розміри заготовок (D_0) $\varnothing 20, 25, 30, 35, 40 \times 150$ мм; температура навколишнього середовища 20°C ; коефіцієнт тертя $\mu = 0,35$; моделюються ступені деформації заготовки $\varepsilon = 10 \dots 80\%$; поперечний переріз циліндричних заготовок: з ПЗ та без ПЗ (рис. 2.8).

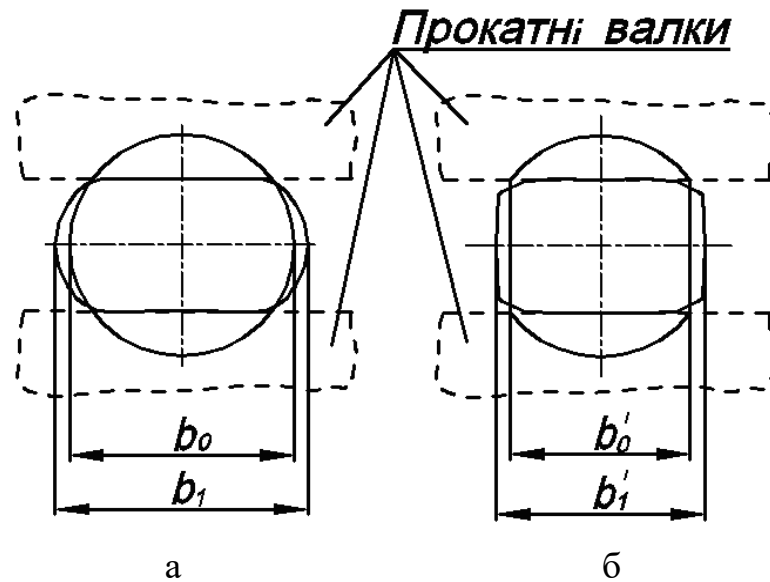


Рисунок 2.8 – Схеми поперечних перерізів за прокатування циліндричних заготовок в гладких валках: з ПЗ (а) та без ПЗ (б)

Поперечні перерізи заготовок, що прокочуються – експортуються в формат DXF, та вимірюються в системі AutoCad. Розширення при відповідних ступенях деформації ε (1.19), для заготовок з ПЗ вимірюється за відомою залежністю: $\Delta b = b_1 - b_0 = b_1 - D_0$, а для заготовок без ПЗ – за формулою (2.18).

Вальцювання, коли овальний ривчак є проміжним та остаточним калібром – найпоширеніший тип вальцювальних операцій. Підвищення точності обчислення розмірів калібрів можливо за рахунок оптимізації методу розрахунку розширення, від якого залежать параметри технологічного процесу виготовлення калібрів: встановлення розмірів і форми калібрів; вибір необхідних значень коефіцієнту витягування за переходами; кількість післяопераційних переходів; визначення можливості вальцювання в кожному наступному ривчаку; енергосилові параметри; якість поверхні заготовки, що вальцюються та ін.

Зміна найбільш істотних факторів, що впливають на розширення в процесі вальцювання заготовок в овальному калібрі (обтиснення $\Delta h/h_0$, катаючий діаметр калібру D_K та показник кривизни калібру i), призводить до існуючого перерозподілу сил, що діють на метал в зоні деформації, і зміни значень розширення. На відміну від вальцювання на гладкій бочці, існуюча нерівномірність деформації за шириною

та висотою заготовки, викликана кривизною овального калібру в поперечному перерізі, суттєво ускладнює вирішення завдання за визначенням переміщення металу в осередку деформування.

Графіки для визначення розширення при вальцюванні заготовок в різних системах калібрів, були отримані С.А. Скрябіним на підставі експериментальних даних та розрахунку коефіцієнтів, що враховують вплив нерівномірності деформації за шириною та висотою заготовки, що вальцюються [132]. Розширення під час вальцювання заготовок круглого перерізу в овальних калібрах, визначається за емпіричною формулою (табл. 1.3):

$$\Delta b_{ов} = K_{розши}^{ов} \cdot \sqrt{(d - h_{ов}) \cdot \frac{D_{\kappa}^{ов}}{2} \cdot \frac{d - h_{ов}}{d}}, \quad (2.19)$$

де $K_{розши}^{ов}$ - коефіцієнт, що враховує вплив на розширення нерівномірності деформації за шириною та висотою заготовки в залежності від кривизни овального калібру [10]; $h_{ов}$ - висота овального калібру, мм; d - діаметр заготовки, що деформується, мм; $D_{\kappa}^{ов}$ - катаючий діаметр овального калібру, мм: $D_{\kappa}^{ов} = A - (2/3) \cdot h_{ов}$, де A - міжцентрова відстань валків, мм.

Для різних систем калібрів, що входять до формули розрахунку розширення (табл. 1.3) – коефіцієнти, що враховують вплив на розширення (Δb) та випередження (S) нерівномірності деформації за шириною та висотою заготовок, експериментально визначені С.О. Скрябіним [15, 25]. У праці за допомогою апроксимації відповідних графіків методами математичної статистики [133], розроблено формульні залежності (табл. 2.2) за існуючими експериментальними. Графіки, що були побудовані за отриманими формулами (рис. 2.9), показали повний збіг з експериментальними даними, які розроблені для розрахунку коефіцієнтів, які враховували залежність впливу нерівномірності деформації за шириною та висотою заготовки від співвідношення геометричних форм калібру і заготовки, що деформується в ньому [15], [25]. Це говорить про можливість їх застосування для практичних розрахунків.

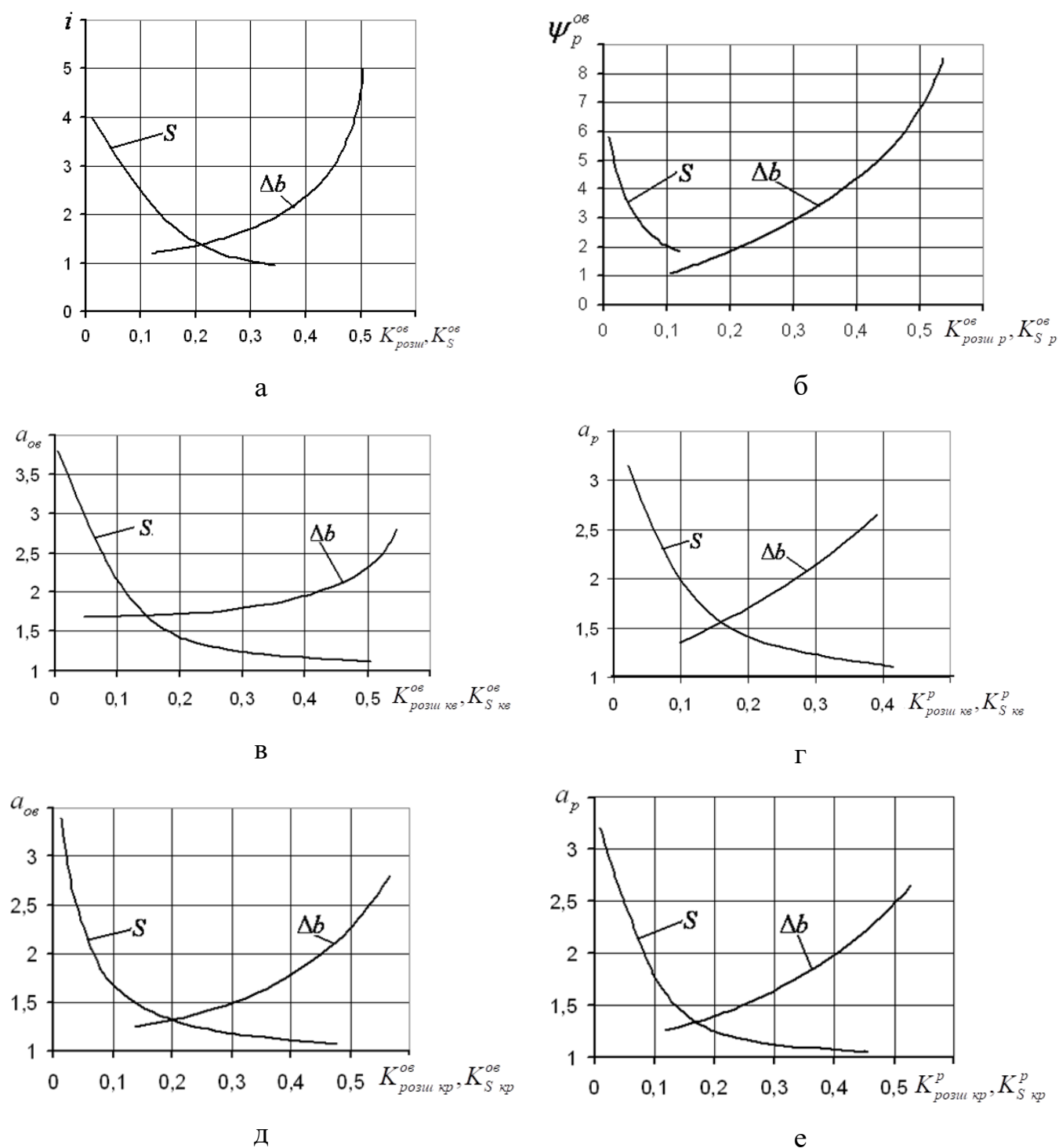


Рисунок 2.9 – Отримані за методом нелінійної апроксимації залежності коефіцієнтів, які враховують вплив на розширення (Δb) та випередження (S) нерівномірності деформації за шириною та висотою заготовки, від співвідношення геометричних форм калібру і заготовки, що деформується в ньому, під час вальцювання алюмінієвих сплавів в системі калібрів: а - круг-овал , б - овал-ромб, в - овал-квадрат, г - ромб-квадрат, д - овал-круг, е - ромб-круг.

Таблиця 2.2 – Формули для визначення значень коефіцієнтів нерівномірності деформації при розширенні (Δb) та випередженні (S)

Система калібрів	Коефіцієнти:
	розширення (Δb)
Круг-овал	$K_{розши}^{ов} = \sqrt{0,102581 \cdot i^2 + 0,515011 \cdot i - 0,611579 - 0,35564 \cdot i + 0,15438}$
Овал-ромб	$K_{розши p}^{ов} = \sqrt{0,141979 \cdot \psi^2 + 5,06241 \cdot \psi + 16,517 - 0,43311 \cdot \psi - 4,13658}$
Овал-квадрат	$K_{розши кв}^{ов} = \sqrt{0,177897 \cdot a_{ов}^2 + 0,328872 \cdot a_{ов} - 1,0544 - 0,54391 \cdot a_{ов} + 0,94579}$
Ромб-квадрат	$K_{розши кв}^p = \sqrt{-0,03401 \cdot a_p^2 + 1,35056 \cdot a_p - 0,047231 - 0,16369 \cdot a_p - 0,98956}$
Овал-круг	$K_{розши кр}^{ов} = \sqrt{0,170558 \cdot a_{ов}^2 + 0,48013 \cdot a_{ов} - 0,77571 - 0,41876 \cdot a_{ов} + 0,358371}$
Ромб-круг	$K_{розши кр}^p = \sqrt{31,1531 \cdot a_p^2 - 8,6494 \cdot a_p - 6,28388 - 5,528 \cdot a_p + 1,4091}$
	випередження (S)
Круг-овал	$K_S^{ов} = \sqrt{3,75055 \cdot i^2 - 5,1356 \cdot i + 2,014 - 1,9846 \cdot i + 1,5086}$
Овал-ромб	$K_{S p}^{ов} = \sqrt{3,77744 \cdot \psi^2 - 5,44374 \cdot \psi + 2,54815 - 1,94627 \cdot \psi + 1,39557}$
Овал-квадрат	$K_{S кв}^{ов} = \sqrt{588,262 \cdot a_{ов}^2 - 1198,7 \cdot a_{ов} + 612,75 - 24,298 a_{ов} + 24,868}$
Ромб-квадрат	$K_{S кв}^{ов} = \sqrt{0,661454 \cdot a_p^2 - 1,5659 \cdot a_p + 0,984675 - 0,859305 a_p + 1,11107}$
Овал-круг	$K_{S кв}^{ов} = \sqrt{435,802 \cdot a_{ов}^2 - 787,2 \cdot a_{ов} + 359,18 - 20,882 a_{ов} + 18,852}$
Ромб-круг	$K_{S кв}^p = \sqrt{161,491 \cdot a_p^2 - 314,16 \cdot a_p + 153,61 - 12,754 a_p + 12,504}$

Розрахунок розмірів овальних калібрів, за результатами досліджень процесу вальцювання алюмінієвих сплавів, виконувався з використанням номограми [15], [25], що визначає висоту, ширину та радіус калібру (рис. 2.10). Для визначення за номограмою відносин осей овального калібру $a_{ов}$, використовуються початкові дані:

а) діаметр заготовки d_0 (визначається за максимальною висотою епюри діаметрів штампованої заготовки);

б) коефіцієнт витягування в овальному рівчаку - визначається за експериментально визначеними рекомендаціям [25], або за формулою:

$$\lambda = \frac{F_0}{F_{ov}} = \frac{L'}{L}, \quad (2.20)$$

де F_0 – площа поперечного перерізу заготовки до вальцювання; F_{ov} – площа поперечного перерізу заготовки після вальцювання в овальному калібрі; L' – довжина заготовки після вальцювання; L – довжина вихідної заготовки;

в) відношення міжцентрової відстані валків A до висоти наведеної заготовки, що розраховується за методом наведеної полоси: $h_{oc} = \sqrt{F_0}$.

Залежність відносини осей овального калібру a_{ov} від коефіцієнту витягування λ для відповідної точки на залежності A/h_{oc} , визначається за допомогою програми Statistika [25]. Для побудови поверхні залежності, в програмі використовуються модуль з побудови тривимірних діаграм розсіювання даних і підгонка точок до поверхні за допомогою полінома другого ступеня:

$$a_{ov} = 3,5384 - 0,5858 \cdot (A/h) - 0,3838 \cdot \lambda + 0,0004 \cdot (A/h)^2 + 0,4666 \cdot (A/h) \cdot \lambda + 0,5301 \cdot \lambda^2 \quad (2.21)$$

Методика розрахунку розмірів овальних калібрів за формулами, розробленими С. О. Скрябіним [1], передбачає подальше їх використання в програмі для автоматизації процесу розроблення ТП вальцювання. Висота овального калібру розраховується за формулою:

$$h_{ov} = \sqrt{F_{ov} / (a_{ov} \cdot q)} \quad (2.22)$$

де F_{ov} – площа поперечного перерізу овального калібру; q – коефіцієнт, що залежить від співвідношення осей овального калібру, визначається за експериментальними даними (рис. 2.11) або за формулою:

$$q = \sqrt{0,0315 \cdot a_{ov}^2 - 0,06 \cdot a_{ov} + 0,045} - 0,178 \cdot a_{ov} + 0,8325.$$

Інші поперечні розміри овального калібру (рис. 2.12) визначаються за наступними формулами:

$$\left. \begin{aligned} b_{ov} &= a_{ov} \cdot h_{ov}, \\ R_{ov} &= \frac{(a_{ov}^2 + 1) \cdot h_{ov}}{4}, \\ r_{ov} &= 0,1 \cdot b_{ov}, \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

де b_{ov} , R_{ov} – ширина та радіус овального калібру; r_{ov} – радіус закруглення кромки овального калібру, що округлюється до найближчої цілої величини.

Визначення теоретичних залежностей впливу ПЗ на розширення Δb під час вальцювання циліндричних заготовок з алюмінієвих сплавів в овальних калібрах за різних коефіцієнтах витягування λ та діаметрах заготовок, здійснювалась у системі QForm3D. Площа та лінійні розміри перерізів вальцьованих заготовок, вимірялися за наведеною в п. 2.2 методикою у системі AutoCad.

Моделювання в QForm3D виконувалося за наступними даними: діаметр валків вальцювальних секторів $\varnothing 320$ мм; частота обертання валків 65 хв^{-1} ; матеріал заготовок - сплав АК6; розміри заготовок (D_0) $\varnothing 25, 35, 50, 65 \times 200$ мм; температура заготовок 450°C ; температура інструменту і навколишнього середовища 20°C ; коефіцієнт тертя $\mu=0,35$; досліджувані коефіцієнти витягування заготовок $\lambda_{ov} = 1,15 \dots 2,35$; поперечний переріз циліндричних заготовок: з ПЗ (рис. 2.13, а) та без ПЗ (рис. 2.13, б).

Як наслідок розрахунків розмірів овальних калібрів – було проведено побудову тривимірних моделей рівчаків вальцювальних секторів (табл. 2.3) та подальше моделювання з метою отримання значень лінійного розширення Δb (рис. 2.14):

- а) для заготовок з ПЗ вимірами $\Delta b = b_1 - b_0$;
- б) для заготовок без ПЗ: $\Delta b = b'_1 - b'_0$ [133, 134].

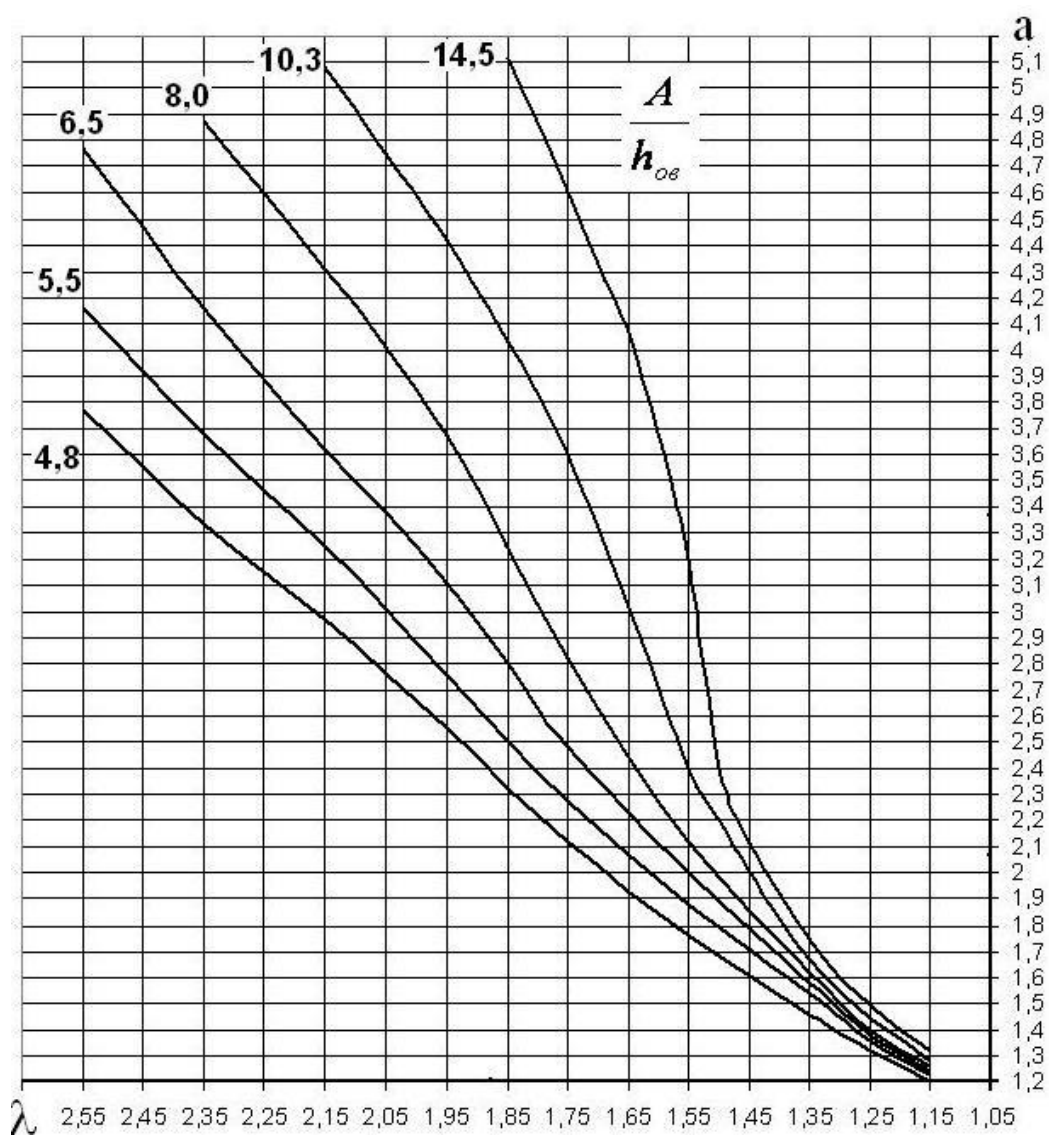


Рисунок 2.10 – Номограма для визначення розмірів овального калібру

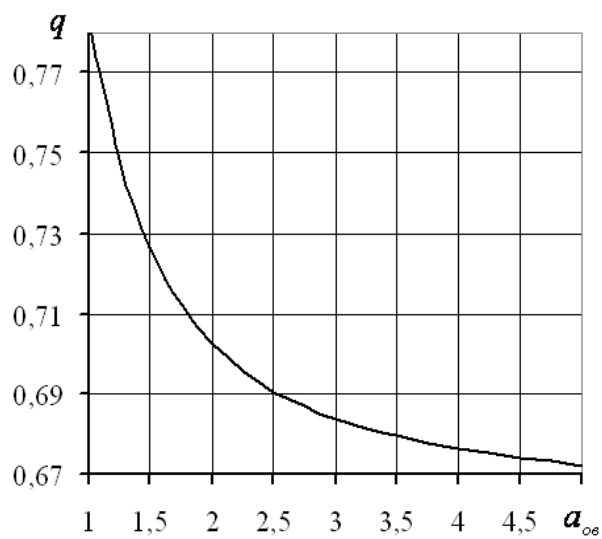


Рисунок 2.11 – Залежність коефіцієнту q від відносин осей овального калібру

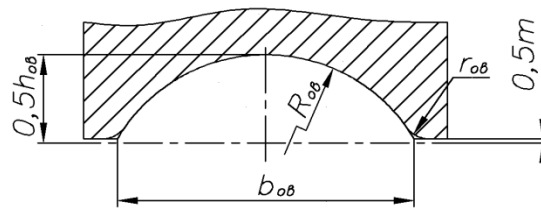


Рисунок 2.13 – Форма поперечного перерізу овального калібру і його загальні розміри

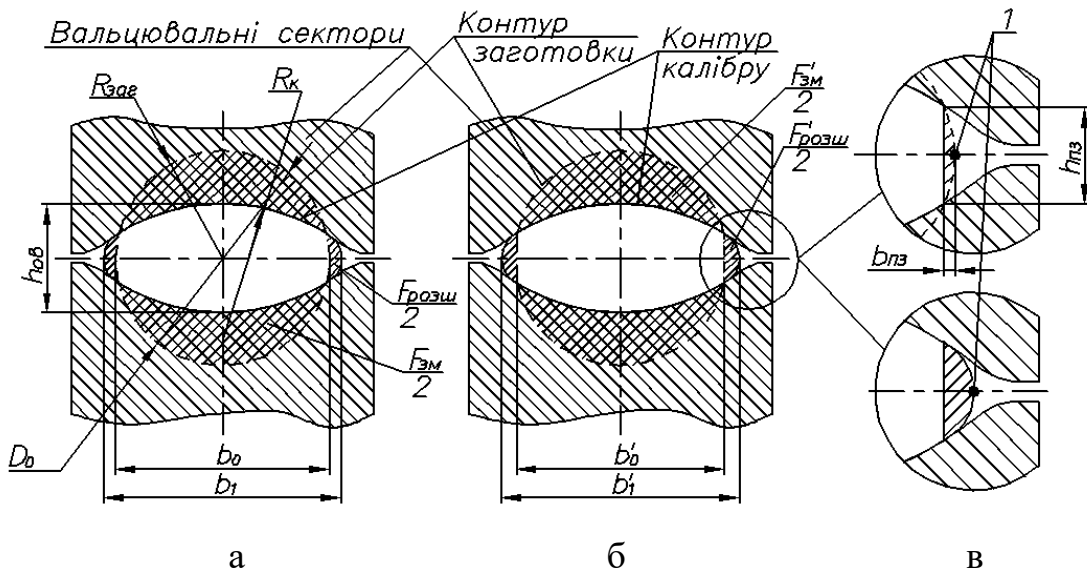


Рисунок 2.14– Схеми перетинів заготовок під час вальцювання в овальному калібрі: без ПЗ (а) та з ПЗ (б); позаконтактна зона до та після вальцювання (в)

Таблиця 2.3 – Розміри овальних калібрів для визначення теоретичних залежностей впливу ПЗ на розширення при вальцюванні циліндричних заготовок

D_0 , мм	$\lambda_{ов}$	$a_{ов}$, мм	$h_{ов}$, мм	$b_{ов}$, мм	$R_{ов}$, мм	$r_{ов}$, мм	i	q	$h_{ПЗ}$, мм	$b_{ПЗ}$, мм
65	1,15	1,22	56,4	68,81	35,19	7	1,08	0,744	18,50	5,38
65	1,25	1,36	51,5	70,04	36,69	7	1,16	0,735	15,56	3,78
65	1,35	1,55	46,9	72	39,89	7	1,23	0,72	15,07	3,54
65	1,45	1,7	43,5	73,95	42,3	7	1,349	0,71	15,13	3,56
65	1,55	1,88	40,2	75,58	45,57	8	1,4	0,703	14,60	3,32
65	1,65	2,08	37,2	77,38	49,54	8	1,52	0,698	14,24	3,16
65	1,75	2,28	34,6	78,89	53,62	8	1,65	0,683	13,76	2,94

Продовження табл. 2.3

65	1,95	2,78	29,9	83,12	65,24	8	2,01	0,684	13,34	2,76
65	2,15	3,28	26,4	86,59	77,61	9	2,405	0,677	12,70	2,5
65	2,35	3,7	23,8	88,06	87,4	9	2,671	0,675	11,69	2,12
50	1,15	1,27	42,6	54,1	27,83	5	1,11	0,74	16,35	5,5
50	1,25	1,38	39,4	54,37	28,61	5	1,14	0,735	12,80	3,34
50	1,35	1,59	35,7	56,76	31,49	6	1,26	0,72	13,23	3,56
50	1,45	1,83	32,2	58,93	35,01	6	1,4	0,71	12,86	3,36
50	1,55	2,08	29,5	61,36	39,28	6	1,57	0,7	12,89	3,38
50	1,65	2,32	27,2	63,1	43,4	6	1,74	0,69	12,63	3,24
50	1,75	2,65	24,9	65,98	49,94	7	2	0,685	12,36	3,1
50	1,95	3,4	20,9	71,06	65,63	7	2,63	0,677	11,55	2,7
50	2,15	3,98	18,5	73,63	77,89	7	3,12	0,674	10,64	2,3
50	2,35	4,65	16,4	76,26	92,75	8	3,71	0,672	9,8	1,94
35	1,15	1,3	29,5	38,35	19,84	4	1,13	0,74	12,07	4,3
35	1,24	1,41	27,4	38,63	20,47	4	1,177	0,73	9,88	2,84
35	1,35	1,67	24,5	40,92	23,21	4	1,33	0,71	10,25	3,06
35	1,45	1,9	22,3	42,37	25,7	4	1,47	0,705	9,8	2,8
35	1,55	2,39	19,4	46,37	32,55	5	1,86	0,691	10,12	2,98
35	1,65	2,95	17	50,5	41,24	5	2,36	0,68	9,96	2,9
35	1,75	3,6	15	54	52,35	5	2,99	0,675	9,43	2,58
35	1,95	4,42	12,9	57,02	66,23	6	3,78	0,673	8,47	2,08
25	1,15	1,32	20,9	27,59	14,33	3	1,15	0,74	8,78	3,18
25	1,25	1,5	19	28,5	15,44	3	1,24	0,72	7,88	2,56
25	1,35	1,75	17,1	29,93	17,37	3	1,395	0,71	7,67	2,42
25	1,45	2,1	15,2	31,92	20,56	3	1,656	0,7	7,6	2,36
25	1,55	3,17	12,1	38,36	33,42	4	2,67	0,68	7,73	2,44
25	1,65	4,06	10,4	42,22	45,46	4	3,64	0,67	7,19	2,12

25	1,75	4,6	9,5	43,7	52,63	4	4,21	0,672	6,71	1,84
----	------	-----	-----	------	-------	---	------	-------	------	------

Об'ємний показник розширення $F_{розш}/F_{зм}$, що визначає справжню площу металу, який змістився у поперечному напрямку, розраховується як відношення площі поперечного перерізу заготовки, що пішла на розширення до зміщеної по висоті площі поперечного перерізу заготовки [1].

У формулі з розрахунку розширення (2.19), всі параметри залишаються однаковими при вальцюванні в одному і тому ж калібрі, окрім коефіцієнту нерівномірності деформації $K_{розш}^{ов}$, який можна розкласти на власне коефіцієнт впливу нерівномірності деформації $K_{розш.ов}^{нд}$ та коефіцієнт впливу ПЗ $K_{розш.ов}^{ПЗ}$.

$$K_{розш}^{ов} = K_{розш.ов}^{нд} + K_{розш.ов}^{ПЗ} \quad (2.24)$$

Розмір лінійного розширення (Δb) і об'ємного показника розширення ($F_{розш}/F_{зм}$) при прокатуванні заготовок без ПЗ за будь-якого діаметру заготовок, відрізняється від розширення при прокатуванні заготовок з ПЗ на величину відносного відхилення, що показує вплив ПЗ на процес вальцювання:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{\Delta b} &= \frac{\Delta b' - \Delta b}{\Delta b'} \cdot 100\% \\ \delta_{F_{розш}/F_{зм}} &= \frac{F'_{розш}/F'_{зм} - F_{розш}/F_{зм}}{F'_{розш}/F'_{зм}} \cdot 100\% \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Коефіцієнт впливу ПЗ ($K_{розш.ов}^{ПЗ}$), визначається з розрахунку співвідношень між коефіцієнтами нерівномірності деформації при вальцюванні заготовок з ПЗ і без ПЗ і дорівнює множенню відносного відхилення розширення (2.25) на коефіцієнт нерівномірності деформації ($K_{розш}^{ов}$):

$$K_{розш.ов}^{ПЗ} = \frac{\Delta b' - \Delta b}{\Delta b'} \cdot K_{розш}^{ов} = \delta_{\Delta b} \cdot K_{розш}^{ов} \quad (2.26)$$

Розкриття механізму впливу ПЗ виконувалось за допомогою аналізу зміни полів температур, швидкості, опору та роботи деформації, середньої напруги, швидкості переміщення металу в поперечному напрямку і зміни координатної сітки (лагранжевих ліній) в залежності від кривизни овальних калібрів і діаметра заготовок.

2.5 Визначення температурного коефіцієнту розширення при вальцюванні в умовах наближених до ізотермічних

Визначення впливу на розширення температури нагріву інструменту виконувалось за експериментальною методикою С.О. Скрябіна [82], розробленою з використанням даних за розмірами заготовок, отриманих під час вальцювання в інтервалі, що визначається постійними значеннями розширення (рис. 2.15) за використанням вальцювальних штампів, які в холодному стані при температурі 20°C так при нагрітих до температур 250...350°C.

Методика визначення температурного коефіцієнту розширення, полягає в моделюванні процесу вальцювання заготовок в ізотермічних умовах (п. 2.2) і теоретичних дослідженнях впливу ступеня деформації та температури нагріву вальцювальних штампів на технологічні параметри процесу вальцювання (п. 2.4). З цією метою, різниця в значеннях розширення для будь-якого ступеня деформації заготовки, визначалась за формулою [135]:

$$\frac{\Delta b_{20}}{b_0} - \frac{\Delta b_{350}}{b_0} = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot (tg\alpha - tg\alpha_1), \quad (2.27)$$

де Δb_{20} , Δb_{350} – розширення, під час вальцювання заготовок в вальцювальних штампах, що мають температуру 20°C та 250...350°C відповідно, мм; $tg\alpha$, $tg\alpha_1$ – кути нахилу, що визначають залежність розширення від ступеня деформації при вальцюванні в штампах, що мають температуру 20°C та 250...350 °C (рис. 2.15).

Для круглої заготовки $b_0 = h_0$, відповідно:

$$\Delta b_{20} - \Delta b_{350} = \Delta h \cdot (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha_1) = \Delta h \cdot K_{розш}^i, \quad (2.28)$$

де $K_{розш}^i$ – температурний коефіцієнт розширення, що залежить від температури нагріву вальцювальних штампів; $\Delta h \cdot K_{розш}^i$ – значення, що визначає різницю між розширенням отриманим за допомогою ізотермічного і традиційного вальцювання.

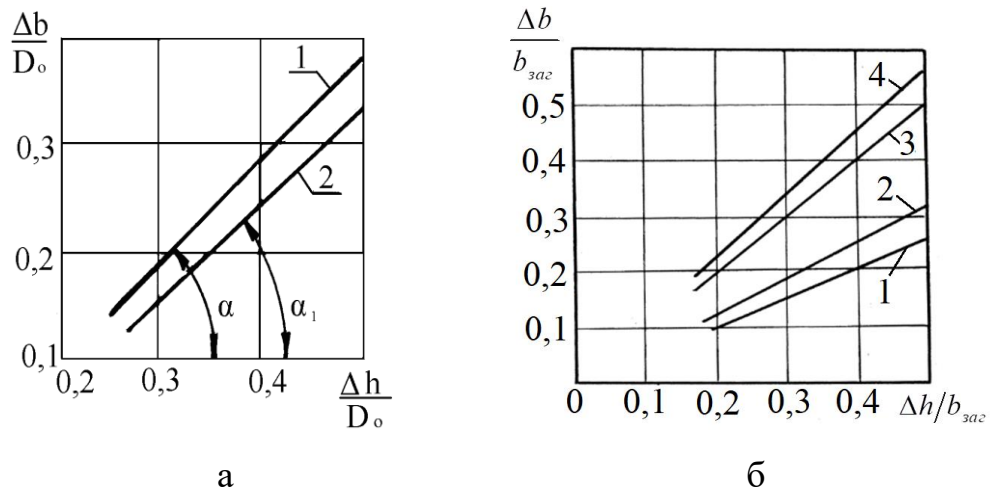


Рисунок 2.15 – Залежність відносного розширення від ступеня деформації при вальцюванні заготовок круглого перерізу в гладких валках (а), овальних калібрах (б, 1, 2) і овальної заготовки в ромбічних калібрах (б, 3, 4), що мають температуру: 1, 3 – 20°C ; 2, 4 – 250...350°C

Таким чином, під час вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів в гладких валках та калібрах, температурний коефіцієнт розширення визначається за формулою:

$$K_{розш}^i = (\Delta b_{20} - \Delta b_{350}) / \Delta h \quad (2.29)$$

Для розрахунку при моделюванні в програмі QForm3D, використовувалися наступні параметри процесу вальцювання: матеріал заготовок АК6, температура валків 20°C та 350°C, температура нагріву заготовок 450°C, ступені деформації, що досліджуються $\varepsilon = 10...80\%$ (1.19). За схеми вальцювання були взяті розрахунки мо-

делювання, які вже використовувалися для дослідження впливу позаконтактних зон на розширення [134], [136]:

а) прокатування в гладких валках $\varnothing 260$ мм, с частотою обертання 26 хв^{-1} (рис. 2.6) прямокутних заготовок з різною формою ПЗ (рис. 1.9) і циліндричних заготовок з розмірами $\varnothing 20, 25, 30, 35, 40 \times 150$ мм (рис. 2.8);

б) вальцювання циліндричних заготовок розмірами $\varnothing 25, 35, 50, 65 \times 200$ мм в овальних калібрах вальцювальних секторів з діаметром валків $\varnothing 320$ мм та частотою обертання 65 хв^{-1} (рис. 2.14).

Формула, що використовується для практичних розрахунків розширення при традиційному вальцюванні циліндричних заготовок в овальних калібрах (2.19), підлягає корегуванню для умов ізотермічного деформування. С.О. Скрябіним була використана математична модель [82], згідно з якою розмір розширення повинен бути зменшений відповідно з температурним коефіцієнтом розширення (2.27...2.29):

$$\Delta b = K_{розш}^{ов} \cdot \sqrt{(d - h_{ов}) \cdot \frac{D_{\kappa}^{ов}}{2} \cdot \left(\frac{d - h_{ов}}{d} \right)} - (d - h_{ов}) \cdot K_{розш.ов}^i \quad (2.30)$$

де $K_{розш}^{ов}$ - коефіцієнт, що враховує вплив на розширення нерівномірності деформації за шириною та висотою заготовки в залежності від кривизни овального калібру [1]; $(d - h_{ов}) \cdot K_{розш.ов}^i$ - значення, що визначає різницю між розширенням, отриманим за допомогою ізотермічного і традиційного вальцювання.

2.6 Оцінка показників пластичності заготовок, що вальцюються

Вальцювання заготовок під штампування являє собою процес, що відбувається з нерівномірними обтисканнями і деформаціями при складній схемі навантаження. Отримання в цих умовах заготовок із заданою формою і розмірами профілю залежить від вірного вибору силових та технологічних параметрів вальцювання [1], а також вимагає точного визначення пластичності - здатності матеріалу пластично

деформуватися при тих чи інших значеннях термомеханічних параметрів, без руйнування у вигляді макроскопічного порушення цілісності.

Найбільш схильними до дефектоутворення областями під час вальцювання є ті, що знаходяться по краях осередку деформування та не контактують з інструментом. В них можливе утворення задирок в випадках невірному розрахунку заповнюваності рівчака металом, що деформується.

Обчислення запасу пластичності сплаву АК6 в області ПЗ і визначення можливості його руйнування за певних ступенів обтиску при вальцюванні вирішується за допомогою аналізу деформовності в цих зонах. Результати дослідження пластичності можуть бути наведені за допомогою параметричних залежностей, що відображають зв'язок граничного ступеня деформації зсуву (накопиченої часткою матеріалу пластичної деформації) (Λ_p) з показником напруженого стану (σ/T), інтенсивністю швидкості деформації зсуву (H), температурою (θ) і показником немонотонності (B) [137].

При використанні методу випробування пластичності прокаткою на клин [138], ступінь деформації зсуву визначається за формулою [139]:

$$\Lambda_p = 2 \sqrt{\left(\ln \frac{a_1}{a_0} \right)^2 + \ln \frac{a_1}{a_0} \ln \frac{b_1}{a_0} + \left(\ln \frac{b_1}{b_0} \right)^2}, \quad (2.31)$$

де a_1 та b_1 - довжина і ширина ланки після деформації; $a_0 = b_0$ - довжина і ширина ланки до деформації (база координатної сітки, рис. 2.16).

За існуючою методикою [140], для моделювання процесу прокатування, на бічні поверхні зразків-моделей наноситься координатна сітка з однаковою базою (стороною квадрата). Після прокатування, виконується фіксація зміни координатної сітки і визначаються середня ступінь деформації та середній показник напруженого стану в будь-якому поперечному перерізі по всій довжині прокатуваного зразка. При цьому передбачається, що ланки сітки деформуються монотонно. За використанням тривимірного моделювання в програмі QForm3D, замість координатної сітки було взято поле «лагранжевих» ліній [128], яке використовується автором для оцінки пе-

реміщення металу в осередку деформування [141]. Зміна положення вертикальних та горизонтальних ліній ділильної (лагранжевої) сітки показує картину течії металу в процесі вальцювання.

Показники напруженого стану показують його вплив на пластичність матеріалу та відображають напруги, що переважають в схемі напруженого стану ($\sigma/T < 0$ – стискаючі, $\sigma/T > 0$ – розтягуючі), а також враховують гідростатичний тиск і величину, що визначає пластичну течію. Розрахунок загального показника напруженого стану для операцій вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах може бути проведений за методом прокатки на клин [53]:

$$\frac{\sigma}{T} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33}}{\sqrt{\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{11}\varepsilon_{33} + \varepsilon_{33}^2}}, \quad (2.32)$$

де $\varepsilon_{11} = \ln(a_1/a_0)$, $\varepsilon_{33} = \ln(b_1/b_0)$ – ступінь обтиску за шириною та довжиною ланки

(рис. 2.16); $T = \sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2}$ – інтенсивність дотичних напружень, де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – напруги за головними осями, $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ – дотичні до головних перерізів напруги.

При вальцюванні з невеликим ступенем обтиску – в напруженому стані заготовки переважають розтягуючі $\sigma/T > 0$, збільшення ступеня проробки металу $l_D/h_{cp} > 3$ призводить до переважання стискаючих напруг, коли показник напруженого стану набуває негативних значень (рис. 2.18).

Шлях деформування для схем вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах, що використовувалися раніше [142] визначався в області ПЗ заготовки через отримання в них даних для трасуючих точок. Після моделювання процесу, виконується імпорт даних деформування з QForm3D до MS Excel, після чого стовпці з даними чисельних значень накопиченої деформації (ε_i), опору деформації (σ_s) і середньої напруги (σ) експортуються в прикладну математичну програму MathCad.

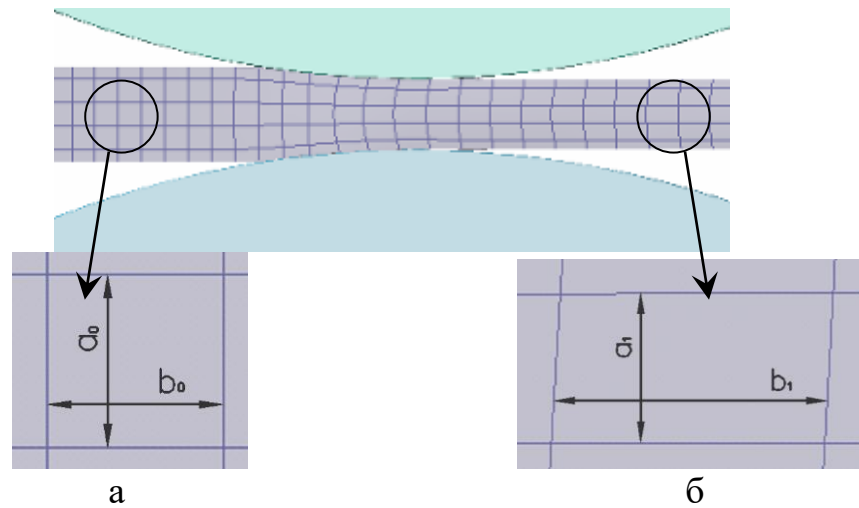


Рисунок 2.16 - Довжина і ширина ланок до (а) і після (б) прокатки

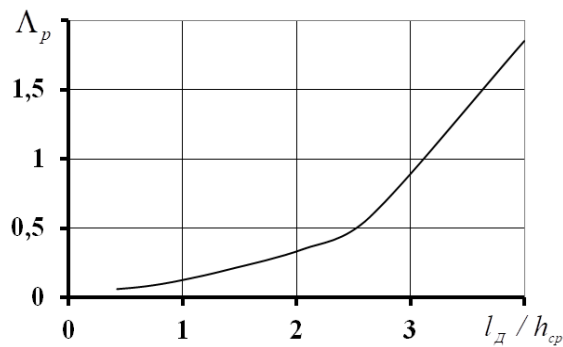


Рисунок 2.17 - Залежність ступеня деформації зсуву Λ_p від коефіцієнту форми l_D / h_{cp} під час вальцювання заготовок зі сплаву АК6 нагрітих до температури 470°C

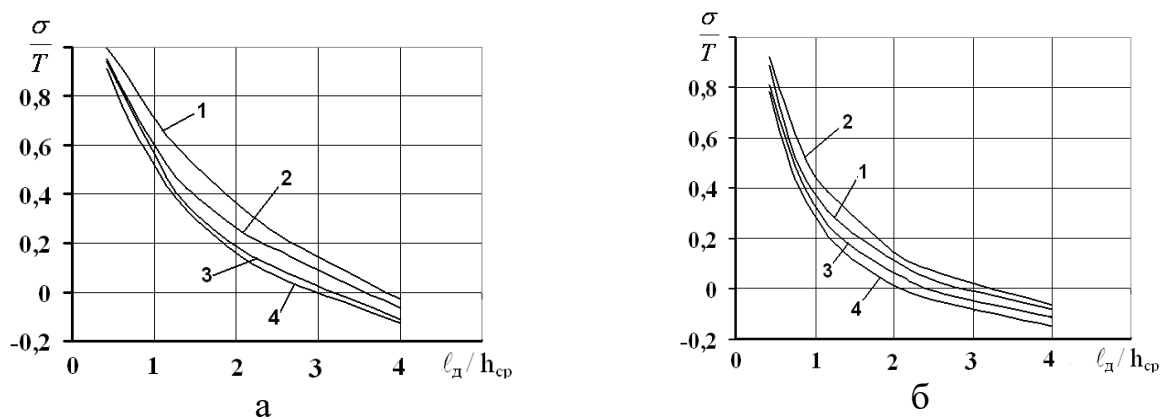


Рисунок 2.18 - Залежність показника напруженого стану σ/T від коефіцієнту форми l_D / h_{cp} під час вальцювання заготовок при температурі 420°C (а) та 470°C (б) зі сплаву: 1 – АМГ; 2 – АК6; 3 – АК8; 4 – АМЦ

Надалі визначається чисельна ознака схеми напруженого стану (показника напруженого стану), який відображає вплив відносного гідростатичного тиску на пластичність та дозволяє розрахувати значення параметра на кожному кроці розрахунку [142]:

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_i}, \quad (2.33)$$

де $\sigma_i = \sigma_s$ - показник інтенсивності напруг, що визначає пластичну течію.

Функціональна залежність даних накопиченого ступеня деформації від параметру η , визначає залежність між поточною накопиченою деформацією ε_i і показником напруженого стану η в точках, що трасуються та визначає історію їх деформування за накопиченим рівнем деформації $\varepsilon_i = \varepsilon_i(\eta)$ (рис. 20). Інтерполюючи для кожного випадку вальцювання цю регресію в MathCad, можна отримати найбільш придатну формулу для опису шляху деформування поліномової залежності.

Оцінювання деформовності металу у ПЗ для розрахунку значень використаного ресурсу пластичності було виконано на підставі лінійного критерію В. Л. Колмогорова [138] та нелінійного модифікованого В. А. Огороднікова [143], [144]. Умова деформування без руйнування записується у вигляді:

лінійного критерію
$$\Psi = \int_0^{E_i} \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{np}(\eta)} < 1, \quad (2.34)$$

нелінійного критерію
$$\Psi = \int_0^{E_i} \left(1 + a \cdot \arctan \left(\frac{d\eta}{d\varepsilon_i} + \frac{d\chi}{d\varepsilon_i} \right) \right) \frac{[\varepsilon_i(\eta, \chi)]^{a \cdot \arctan \left(\frac{d\eta}{d\varepsilon_i} + \frac{d\chi}{d\varepsilon_i} \right)}}{[\varepsilon_p(\eta, \chi)]^{1 + a \cdot \arctan \left(\frac{d\eta}{d\varepsilon_i} + \frac{d\chi}{d\varepsilon_i} \right)}} \leq 1, \quad (2.35)$$

де Ψ - запас ресурсу пластичності; E_i - ступінь деформації в кінці процесу; $\varepsilon_i = \varepsilon_i(\eta)$ – накопичена ступінь деформації (шлях деформування в небезпечній зоні осередку деформування (ПЗ)); $\varepsilon_{np} = \varepsilon_{np}(\eta)$ – гранично припустима ступінь деформації зсуву, що описується діаграмою пластичності; a - константа: ($a = 0,2$); χ – показник напруженого стану, що враховує третій інваріант тензору напружень; ε_p – гранична ступінь деформації, яку може зазнавати матеріал за певного показника жорсткості на-

пруженого стану та певного розміру третього інваріанта тензора напруженого стану (впливом якого при розрахунку нехтують, оскільки в QForm3D відсутня можливість в автоматичному режимі записувати дані, які дозволяють розрахувати коефіцієнти, що враховують його вплив).

Після інтерполяції регресійної залежності графіка шляху деформування за допомогою програмного комплексу MathCad в поліном третього ступеня [112] та прийняття його за аргумент рівняння діаграми пластичності, отримуються в явному вигляді залежність гранично припустимого ступеня деформації зсуву ϵ_p). Для подальшого оцінювання деформовності металу за порівнянням наближення шляху деформування до діаграми пластичності, необхідно приведення до відповідності розмірностей ступеня деформації зсуву Λ_p з гранично припустимим рівнем деформації зсуву $\epsilon_{np} = \sqrt{3} \cdot \Lambda_p$, що перевірялось порівнянням графіків з [112] та [138], а також показника напруженого стану, при якому здійснюється деформація до руйнування σ/T до показника напруженого стану, який відображає вплив відносного гідростатичного тиску на пластичність $\eta = \sqrt{3} \cdot \sigma/T$. Для обраної за коефіцієнтом витягування точки в області ПЗ: $\epsilon_{np}(\eta) = 1,364 - 1,945 \cdot \eta_i(\epsilon) + 1,898 \cdot \eta_i(\epsilon)^2 - 0,699 \cdot \eta_i(\epsilon)^3$, де i – індекс точки, що трасується. У випадку, коли шлях деформування для точок в досліджуваній області – розташовується нижче за діаграму пластичності, то матеріал в даних умовах здатен витримати технологічну операцію без руйнування (рис. 2.20).

Після додання залежності $\epsilon_i = \epsilon_i(\eta)$ до формул (2.34) та (2.35), отримуються залежності для розрахунку використаного ресурсу пластичності для точки в заготовці, яка деформується при обраному для досліджень коефіцієнті витягування. Для формули (2.33), це є функцією інтеграла від верхньої межі інтегрування E , що означає накопичену деформацію до кінця процесу формозміни:

$$\Psi(E) = \int_0^E \left(1 + a \cdot \arctan\left(\frac{\eta(\epsilon)}{\epsilon}\right) \right) \cdot \frac{\epsilon^{a \cdot \arctan\left(\frac{\eta(\epsilon)}{\epsilon}\right)}}{\left(\frac{\epsilon_{np}(\eta)}{\sqrt{3}}\right)^{\left(1 + a \cdot \arctan\left(\frac{\eta(\epsilon)}{\epsilon}\right)\right)}} d\epsilon, \quad (2.36)$$

Умова $\Psi = 1$ на графіках (рис. 2.21), відповідає стадії деформування, на якій необхідно припиняти процес, оскільки подальша формозміна може привести до поя-

ви тріщини в точці, що досліджується. При вальцюванні заготовок $\varnothing 65$ мм і максимально дослідженому коефіцієнті витягування ($\lambda = 1,75$), умова $\Psi = 1$ виконується при $E \approx 0,5$ за теорією Колмогорова (рис. 2.21, 1) та при $E \approx 0,25$ (додаток В) у разі використання критерію деформовності за теорією В. А. Огороднікова (рис. 2.21, 2).

У діапазоні деформувань $\varepsilon_{np} = 0,4 \dots 0,5$ при розрахунку за умовою деформовності за теорією Колмогорова, має розпочатися утворення тріщини, чого насправді не відбувається. Причиною цього є доцільність застосування цього критерію при кривизні шляху деформування $0,25 \leq d^2\eta/d\varepsilon_i^2 \leq 2$ [145].

Зміна кривизни траєкторії деформування при вальцюванні в області ПЗ (додаток В) показує, що позитивна кривизна з'являється тільки в кінці процесу деформування, після чого спостерігається її значне зростання. Вальцювання є технологічним процесом обробки металів тиском, в яких частинки металу зазнають складне навантаження, за якого найбільш ймовірні результати надає розрахунок за модифікованим нелінійним критерієм В. А. Огороднікова (2.35) [145].

Рисунок 2.22 говорить про істотний вплив похідної від шляху деформування (рис. 2.20) на заліковування дефектів, що саме і враховує критерій В. А. Огороднікова (2.35). Наближення до діаграми пластичності не означає початок руйнування як це передбачає критерій Колмогорова, що в свою чергу дозволяє рекомендувати формулу (2.35) для оцінки деформовності та використаного ресурсу пластичності в умовах гарячої вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів.

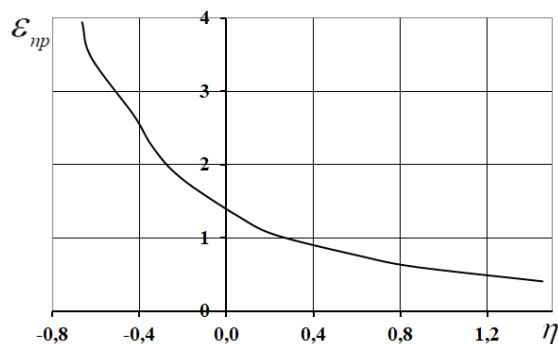


Рисунок 2.19 – Діаграма пластичності сплаву АК6 за температурою деформування $450 \dots 470^\circ\text{C}$

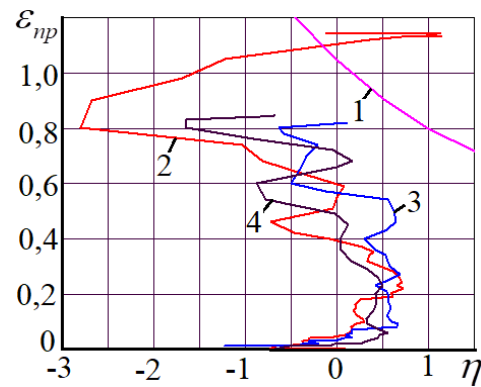


Рисунок 2.20 – Діаграма пластичності сплаву АК6 в холодному стані (1), шляхи деформування для трасуючих точок, що знаходяться в області ПЗ за коефіцієнта витягування $\lambda=1,75$ для сплаву АК6 при гарячому вальцюванні заготовок діаметром: 25 мм (2); 35 мм (3); 65 мм (4)

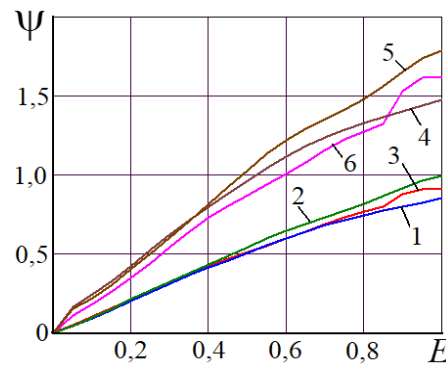


Рисунок 2.21 – Зміна використаного ресурсу пластичності в області ПЗ по ходу деформування при гарячому вальцюванні заготовок зі сплаву АК6 в овальних калібрах (коефіцієнт витягування $\lambda=1,75$) за теорією В. Л. Колмогорова для заготовок \varnothing 25 мм (1), \varnothing 35 мм (2), \varnothing 65 мм (3) та за теорією В. А. Огороднікова для заготовок \varnothing 25 мм (4), \varnothing 35 мм (5), \varnothing 65 мм (6)

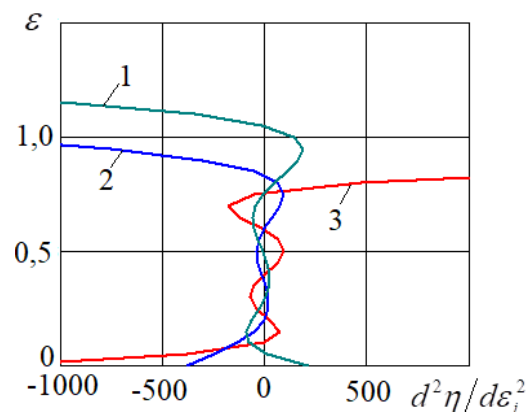


Рисунок 2.22 – Зміна кривизни траєкторії деформування $d^2\eta/d\varepsilon_i^2$ по ходу деформування в області ПЗ під час гарячого вальцювання циліндричних заготовок зі сплаву АК6 в овальних калібрах (коефіцієнт витягування $\lambda=1,75$) для заготовок \varnothing 25 мм (1), \varnothing 35 мм (2), \varnothing 65 мм (3)

2.7 Методика дослідження силових параметрів процесу вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів

Зміна залежності $P_{cp.б.}$ від коефіцієнту форми l_δ/h_{cp} ліворуч від точки мінімуму (рис. 1.12, 1.13), визначається переважно впливом зовнішніх зон, що викликають суттєве підвищення нормальної напруги на протязі дуги захвату [38] та практично не впливають на нормальну напругу. За малих ступенів деформацій, контактна поверхня дотику металу з валком є невеликою, тому для деформації поверхневих шарів металу необхідно докладати велике загальне зусилля. У точці мінімуму спостерігається незначний вплив сил тертя і зовнішніх зон. Тобто при $l_\delta/h_{cp} < 1,4$ та $1,0$ відповідно, можна припустити, що $K_\sigma = n_\sigma'' \cdot n_B$.

Результати використання експериментальних даних при визначенні P_{cp} за методом базисного тиску показали, що при визначенні середнього зусилля вальцювання заготовок можна користуватися даними, які були отримані при розтягуванні на пластометрі (додаток Г) [10]:

$$P_{cp.б.} = \sigma_{o,2} \cdot K_\sigma, \quad (2.37)$$

де $\sigma_{o,2} = \sigma_T$ - межа плинності металу, значення якої отримані за методом розтягування на пластометрі при заданих температурах і швидкостях деформації [25]; $K_{\sigma=n_\sigma n_B}$ - поправний коефіцієнт [15], [25], [146].

Швидкість деформації для розрахунків, визначається за формулою [15]:

$$u = (v_B/h_0)\sqrt{\Delta h/R}, \quad (2.38)$$

де R – радіус валків, мм; $v_B = \pi \cdot d \cdot n / 60$ - окружна швидкість валків, м/с (d – діаметр валків, мм; n – частота обертання валків, xv^{-1}).

На основі теорії подібності щодо визначення опору деформування в пластичній області (праці О. В. Грушко, В. А. Євстратова, Ю. М. Чижикова, Г. Г. Шломчака

та ін.) [170], для алюмінієвих сплавів, що куються, був розрахований поправний коефіцієнт K_{σ} для сплаву АК8 [146]. Подібність виконується з урахуванням даних $\sigma_{0,2}$ та σ_B для сплавів АК6, АК8 [10] та за використанням даних зі середнього базисного тиску ($P_{cp.б.}$) для сплаву АК6 [15] під час вальцювання заготовок, що мають температуру 420 та 470°C (рис. 1.13). Поправний коефіцієнт K_{σ} (2.37), враховує напружений стан деформованого металу та вплив ширини заготовки на питомий тиск. Оскільки, для всіх розрахунків були використані заготовки однакової ширини (60 мм) – для різних сплавів на різницю в розмірі K_{σ} впливає тільки напружений стан. Це стало підставою розроблення емпіричної залежності для розрахунку:

$$K_{\sigma_{AK6}} - K_{\sigma_{AK8}} = \frac{\sigma_B / \sigma_{0,2} AK6}{\sigma_B / \sigma_{0,2} AK8} (tg\alpha - tg\alpha_1), \quad (2.39)$$

де σ_B - межа міцності, $\sigma_{0,2}$ - межа плинності відповідно до залежностей (додаток Г); $tg\alpha$ та $tg\alpha_1$ - кути, що визначають залежність межі текучості від коефіцієнту форми l_{δ}/h_{cp} (рис. 2.22).

Подальші теоретичні дослідження виявили необхідність урахування більшої кількості параметрів, які впливають на напружений стан. Тому формула (2.37), що виведена в роботі [147] потребувала корегування – до неї було додано коефіцієнт пластичної деформації, який показує наскільки напруга руйнування більше за напругу, що спричиняє пластичну деформацію для даного сплаву [146]:

$$K_{nl.} = \sigma_B / \sigma_{0,2}, \quad (2.40)$$

Врахувати напругу руйнування можна, через порівняння межі міцності σ_B для розглянутих матеріалів. Вплив розміру пластичної деформації, був врахований через додавання до формули показника відносного подовження δ .

Розрахунок здійснювалися за використанням даних для сплавів, що досліджуються (АК6, АК8, АМГ і АМЦ) у вигляді графіків залежності межі міцності, плинності та відносного подовження наведених сплавів від швидкості деформації та температури при розтягуванні зразків на пластометрі (додаток Г).

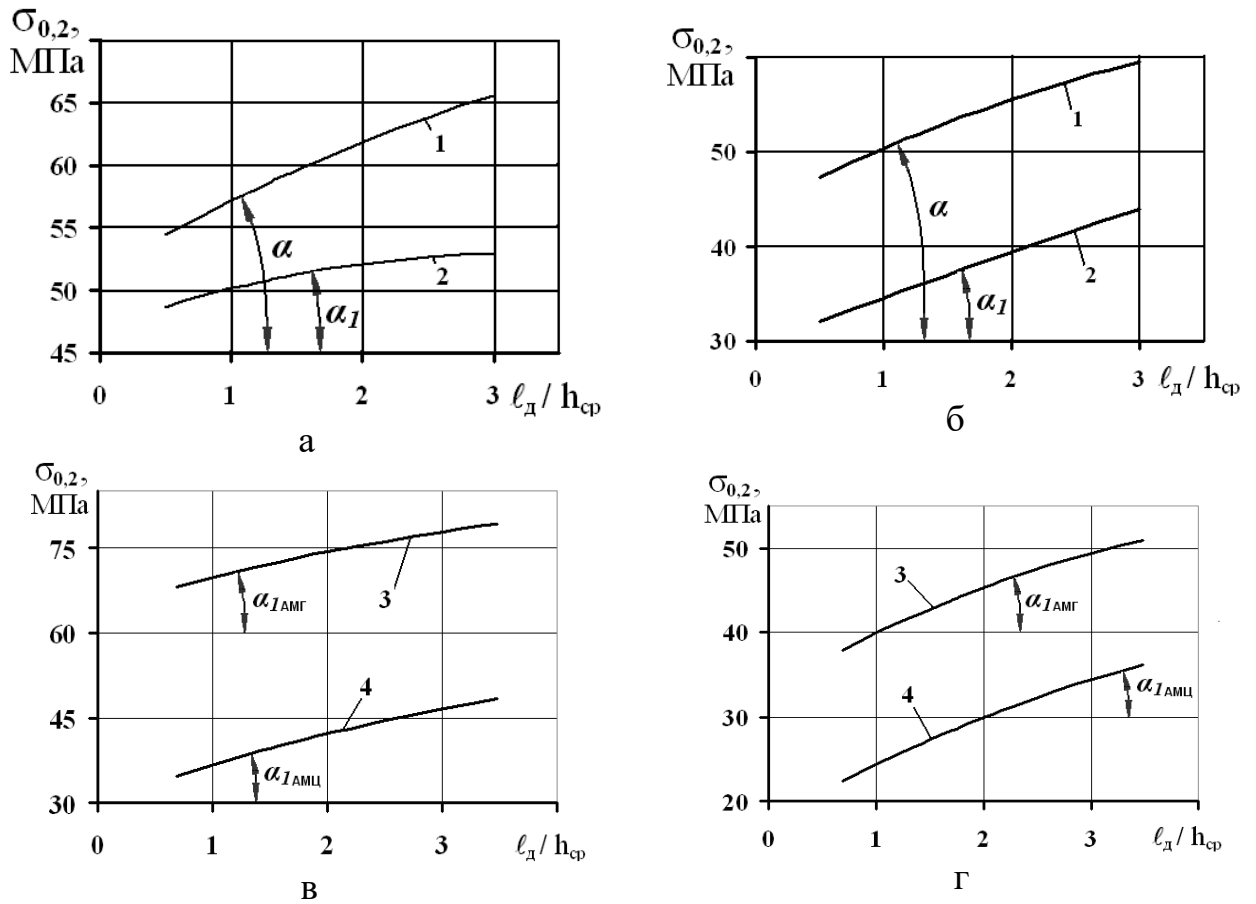


Рисунок 2.22 – Залежність межі текучості $\sigma_{0,2}$ сплавів АК6 (1), АК8 (2), АМГ (3) и АМЦ (4) при температурі вальцювання $t = 420^\circ\text{C}$ (а, в) та $t = 470^\circ\text{C}$ (б, г) від коефіцієнту форми l_d/h_{cp}

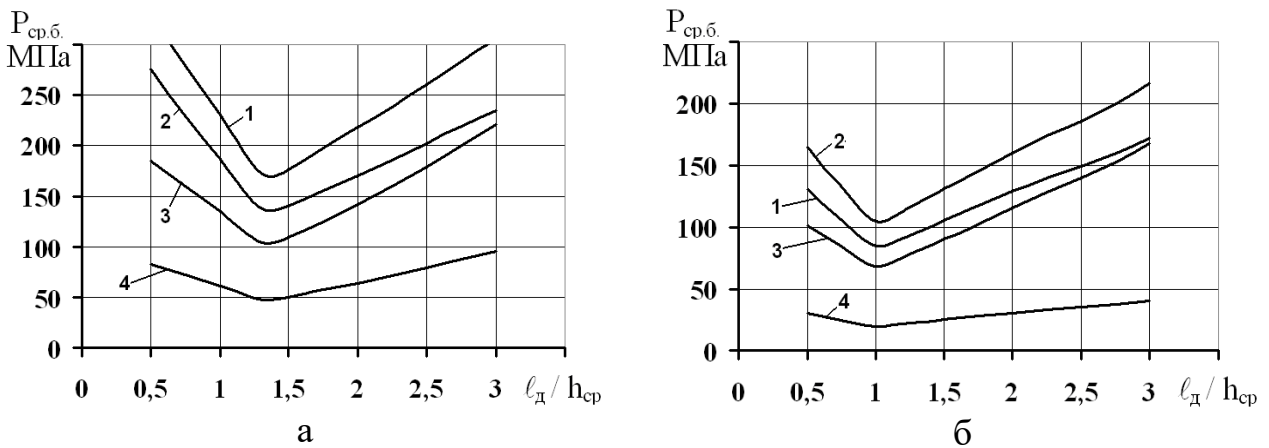


Рисунок 2.23 – Середнє питоме зусилля під час вальцювання заготовок при температурі $t = 420^\circ\text{C}$ (а) та $t = 470^\circ\text{C}$ (б) зі сплавів: 1 – АМГ; 2 – АК6; 3 – АК8; 4 – АМЦ

Співвідношення для розрахунку поправного коефіцієнту K_{σ} для досліджуваних сплавів [148] було визначено з урахуванням використання коефіцієнту пластичного деформування K_{nl} :

$$\frac{K_{\sigma AK6}}{K_{\sigma(сплав)}} = \frac{K_{nl(AK6)} \cdot \sigma_{B(AK6)} \cdot \delta(AK6)}{K_{nl(сплав)} \cdot \sigma_{B(сплав)} \cdot \delta(сплав)} \cdot \left(\frac{tg \alpha(AK6)}{tg \alpha(сплав)} \right), \quad (2.41)$$

Виходячи з формул (2.37 та 2.40), визначається розмір поправного коефіцієнту K_{σ} та розраховується середній базисний тиск для сплавів АК8, АМГ і АМЦ при температурах $t = 420^{\circ}\text{C}$ та 470°C (рис. 2.23).

Розрахунок базисного тиску для сплаву АК8 за скоригованою формулою, показав відхилення розрахункових даних в межах 10% в області мінімального розміру $P_{cp.б.}$ за $l_d/h_{cp} = 0,8 \dots 1,5$.

Розміру середнього питомого зусилля для сплавів (рис. 2.23) має таке саме співвідношення, як і для показника напруженого стану σ/T (рис. 2.18). При температурі нагріву заготовки 420°C , найбільший розмір базисного тиску та показника напруженого стану має сплав АМГ, потім по черзі – зменшується для сплавів АК6, АК8 і АМЦ. При $t = 470^{\circ}\text{C}$, порядок зменшення розміру показника напруженого стану наступний: АК6=>АМГ=>АК8=>АМЦ.

Після розрахунку середнього питомого зусилля P_{cp} , з використанням розроблених залежностей та визначення проекції площі контакту F_k за формулою (1.24), здійснюється розрахунок повного зусилля вальцювання в визначних перерізах заготовки для кожної стадії вальцювання за найбільшим значенням зусилля P . Це надає можливість виконувати автоматизований вибір моделі кувальних вальців [145].

Висновки за розділом 2

Складено та обґрунтовано застосування для теоретичних досліджень процесу гарячого вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів методу скінченних елементів, за рахунок використання спеціалізованих програм, у поєднанні з методами век-

торної графіки, які дозволили розробити методикау визначення геометричних розмірів поперечного перерізу вальцьованої заготовки і фактичного осередку деформації, обчислити показники напружено-деформованого стану та використаного ресурсу пластичності, що дає змогу визначити граничні ступені деформації і технологічні можливості деформування позаконтактних зон.

Для апроксимації залежностей різних параметрів та побудови багатофакторних моделей, що визначають процес вальцювання заготовок, обрані методи нелінійного регресійного аналізу, які використовуються за допомогою програми для статистичної обробки даних Statistika.

Описана загальна методика, яка на базі існуючих методик розрахунку вальцювальних калібрів, за допомогою методів теоретичного дослідження, дозволяє розраховувати вплив форми і розмірів позаконтактної зони, а також температури нагріву вальцювальних секторів на показники розширення при прокатці заготовок в гладких валках, а також циліндричних заготовок в овальних калібрах.

На підставі розрахунків за експериментальними дослідженнями коефіцієнтів, що враховують вплив нерівномірності деформації за шириною та висотою заготовки, що вальцюється в різних системах калібрів, теоретично за допомогою програми для статистичної обробки даних Statistika за методами нелінійного оцінювання, отримано формули залежностей для їх визначення, які показали повну відповідність до графіків експериментальних даних, та підтверджено можливість їх застосування.

Обрано нелінійний критерій Огороднікова, як той, що дає найбільш ймовірні результати для розрахунку значень використаного ресурсу пластичності та оцінюванні деформованості металу в умовах складного навантаження під час вальцювання та враховує істотний вплив похідною від шляху деформування на заліковування дефектів.

Отримав подальший розвиток метод теоретичного дослідження опору деформування в осередку деформації при гарячому об'ємному деформуванні, що включає в себе визначення величини середнього питомого зусилля для випадків вальцювання заготовок з різних марок алюмінієвих сплавів.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ РОЗШИРЕННЯ, ДЕФОРМОВНОСТІ ТА ФАКТИЧНОГО ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ГАРЯЧОМУ ВАЛЬЦЮВАННІ

3.1 Дослідження впливу позаконтактних зон на розширення при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів

3.1.1 Визначення залежностей впливу розміру та форми позаконтактних зон на розширення при вальцюванні заготовок прямокутного перерізу в гладких валках

Аналіз залежності лінійного показника розширення заготовок з прямокутними (рис. 3.1), трапецеїдальними, трикутними ПЗ $(\Delta b/\Delta h)_{ПЗ}$ різної ширини від ступеня деформації (рис. 3.2), яка визначається за формулою (1.19), при вальцюванні заготовок зі сплаву АК6 нагрітих до температури 450°C - показує що зі збільшенням площі поперечних перерізів позаконтактних зон, при прокатці в гладких валках, у позаконтактних зонах прямокутних заготовок зростає негативне розширення. Це відбувається в наслідок того, що за невеликих обтиснень до початку проникнення деформації в центральні зони, поперечна деформація поширюється тільки в поверхневих шарах без розширення центральних. Оскільки витягування зразків присутнє навіть за невеликих обтиснень, це спричиняє появу утягнення у позаконтактних зонах з самого початку деформування. Подальше підвищення ступеня обтиску сприяє проникненню деформації у центральні зони контактних ділянок, викликаючи їх розширення, яке розсуває позаконтактні зони, що утягуються. З цієї причини, зменшення загальної ширини зразків починає згасати. При великих обтисненнях, розширення центральних зон – перевищує утягнення і загальна ширина зразка збільшується по відношенню до вихідної ширини.

Найбільше утягнення зразків з ПЗ трикутної форми поперечного перерізу пояснюється тим, що при однаковому зменшенні площі поперечного перерізу, розміри ПЗ змінюються більше, аніж такі самі у зразків з прямокутними ПЗ [136].

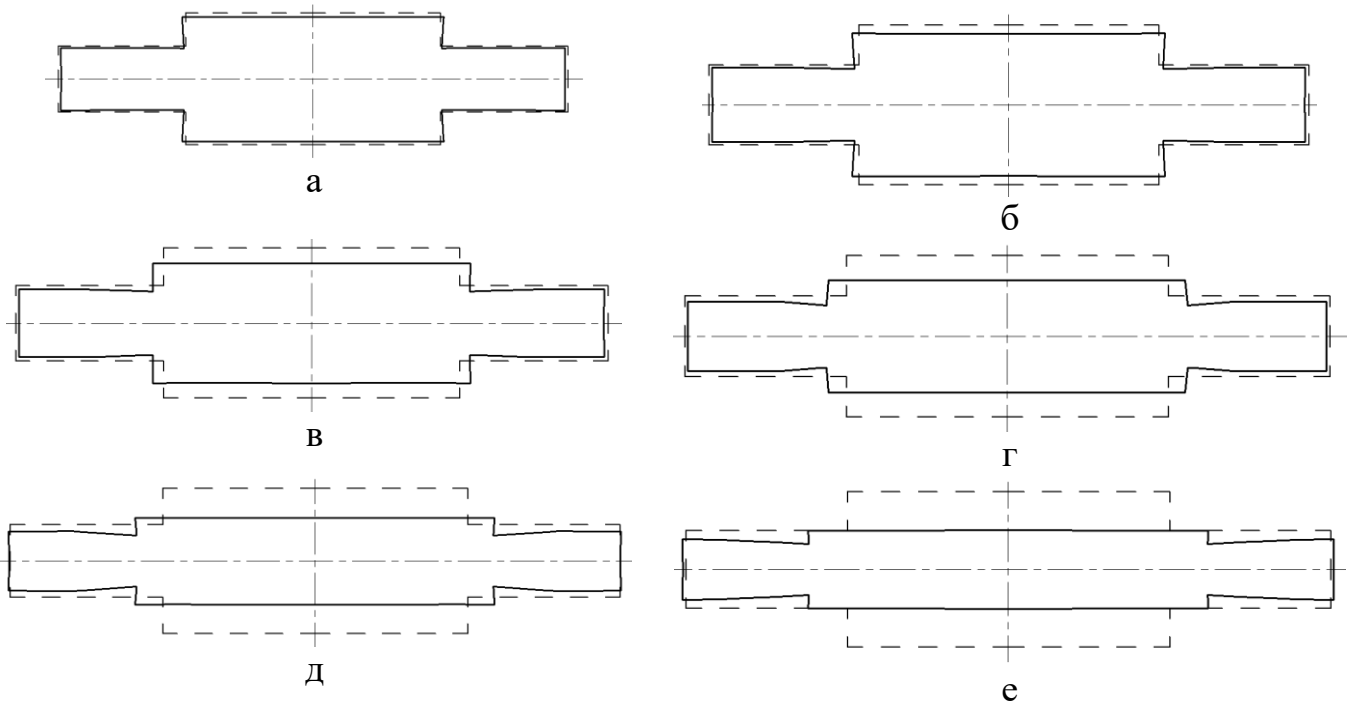


Рисунок 3.1 – Поперечні перерізи заготовок з прямокутною ПЗ до та після прокатування в залежності від ступеня деформації:

а – 5%; б – 10%; в – 20%; г – 30%; д – 40%; е – 50%

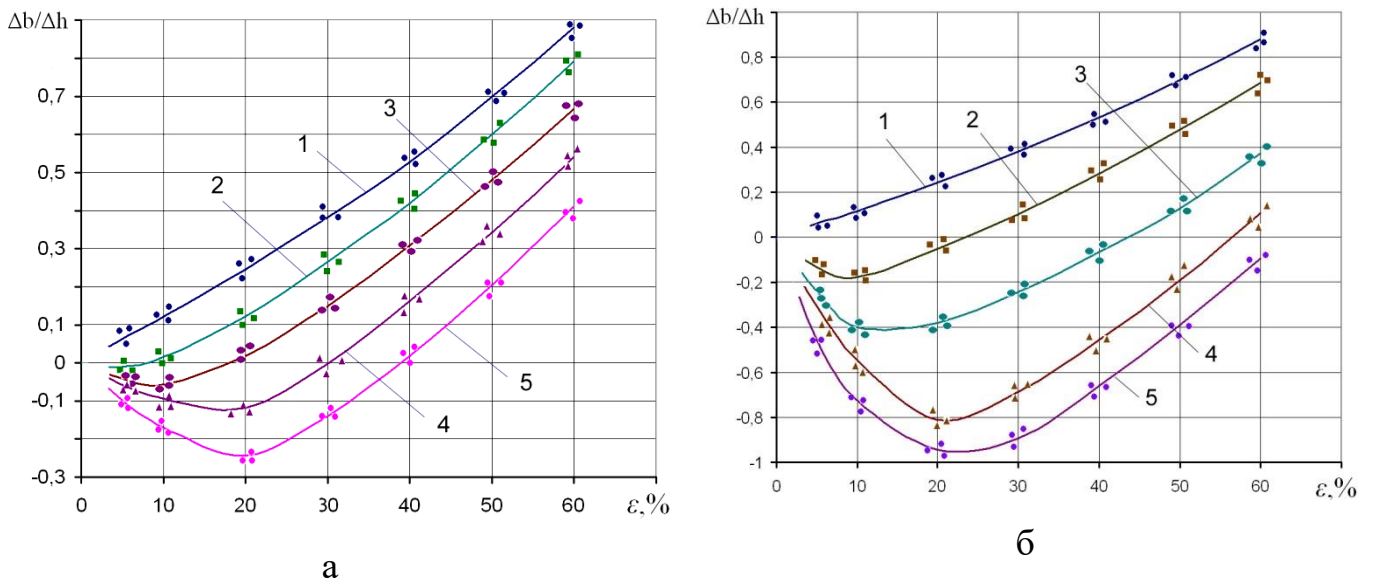


Рисунок 3.2 – Залежність показника розширення прямокутних (а) трикутних (б) ПЗ різної ширини від ступеня деформації, ε : 1 – без ПЗ;

прямокутна ПЗ шириною 2 – 5 мм; 3 – 10 мм; 4 – 15 мм; 5 – 20 мм;

трикутна ПЗ шириною 2 – 10 мм; 3 – 20 мм; 4 – 30 мм; 5 – 40

Найбільше розширення спостерігається у заготовок з прямокутними ПЗ, що говорить про переважний вплив тих ПЗ, обсяг яких рівномірно розподілений по всій ширині позаконтактної зони та знаходяться в максимальній близькості до осередку деформування металу, який безпосередньо контактує з інструментом. Дані показують, що форма ПЗ істотно впливає на поздовжню та поперечну деформації, що викликає необхідність їх врахування при розрахунку калібрів для вальцювання або прокатування фасонних профілів.

Похибка за розрахунковими даними лінійного показника розширення ПЗ $(\Delta b/\Delta h)_{ПЗ}$ в порівнянні з експериментальними даними (рис. 1.9) не перевищує 5%, що свідчить про можливість дослідження параметрів вальцювальних операцій за допомогою розрахунків за методом скінченних елементів у програмі QForm3D.

3.1.2 Визначення залежностей впливу нерівномірності деформації та позаконтактних зон на розширення при вальцюванні заготовок круглого перерізу в гладких валках

Для порівняння теоретичних та експериментальних даних, розрахунки в програмі QForm3D виконувались як продовження досліджень процесу вальцювання циліндричних заготовок в гладких валках, що здійснювались С.О. Скрябіним [15]. У табл. 3.1 наведені розрахункові значення відносного лінійного розширення $\Delta b/D_0$ [134] заготовок, що вальцювались зі сплаву АК6 за температурою 450°C. Візуальний аналіз розширення заготовок з ПЗ та без ПЗ здійснювався за порівнянням поперечних перерізів заготовок Ø40 мм (рис. 3.3) до та після прокатування в залежності від ступеня деформування $\varepsilon = 10...70\%$.

Як наслідок вимірювань за розмірами розширення заготовок з ПЗ і без ПЗ, було побудовано графіки залежності відносного лінійного розширення $\Delta b/D_0$ від ступеня деформації (рис. 3.4). Аналіз графіків, показує що крива 2 залежності розширення від ступеня деформації, має ознаку поведінки схожу до експериментальних ривих (рис. 1.3, 1.4), що наведені в роботі [25].

При ступені деформації $\varepsilon = 43\%$, криві 1 та 2, перетинаються на всіх графіках. Це показує що вплив на розширення ступеня деформації і ПЗ, відбувається внаслідок досягнення рівності осьових стискаючих напруг, що спрямовані уздовж і упоперек осередку деформації, а також рівності обсягів металу, які зміщуються в цих напрямках. Зменшення розміру розширення зі збільшенням діаметру заготовок можна пояснити зростанням сил тертя в поперечному напрямку, оскільки відношення ширини осередку деформації до його довжини збільшується.

Аналіз даних щодо зміни полів температур, швидкостей та опору деформування і переміщення металу в осередку деформації в залежності від ступеня деформації (рис. 3.5...3.8), показав що при невеликих ступенях обтиску (до 30%) – в поверхневих шарах заготовки виникає високий опір деформуванню. Це спричиняє течію загального обсягу металу в поздовжньому напрямку. Зростання опору деформуванню на початкових етапах деформації пояснюється тим, що для початку деформування, необхідно подолати початкові сили зчеплення в заготовці. При цьому, у ПЗ сили зчеплення залишаються великими, а опір деформуванню низьким та металу легше плинути в поперечному напрямку, ніж в поздовжньому.

Таблиця 3.1 – Розрахункові значення відносного лінійного розширення $\Delta b/D_0$ при прокатці циліндричних заготовок в гладких валках

Ступінь деформації $\varepsilon, \%$	Діаметр заготовки, мм									
	20		25		30		35		40	
	Розширення									
	ПЗ	Без ПЗ	ПЗ	Без ПЗ	ПЗ	Без ПЗ	ПЗ	Без ПЗ	ПЗ	Без ПЗ
10	0,015	0,006	0,011	0,002	0,006	0,002	0,004	0,002	0,006	0,001
20	0,052	0,031	0,047	0,030	0,040	0,026	0,038	0,021	0,033	0,016
30	0,111	0,082	0,102	0,074	0,084	0,061	0,082	0,057	0,075	0,048
40	0,191	0,171	0,163	0,146	0,137	0,123	0,131	0,116	0,121	0,102
50	0,292	0,324	0,242	0,264	0,216	0,245	0,190	0,233	0,185	0,220
60	0,396	0,423	0,353	0,382	0,300	0,350	0,263	0,308	0,252	0,295
70									0,334	0,365

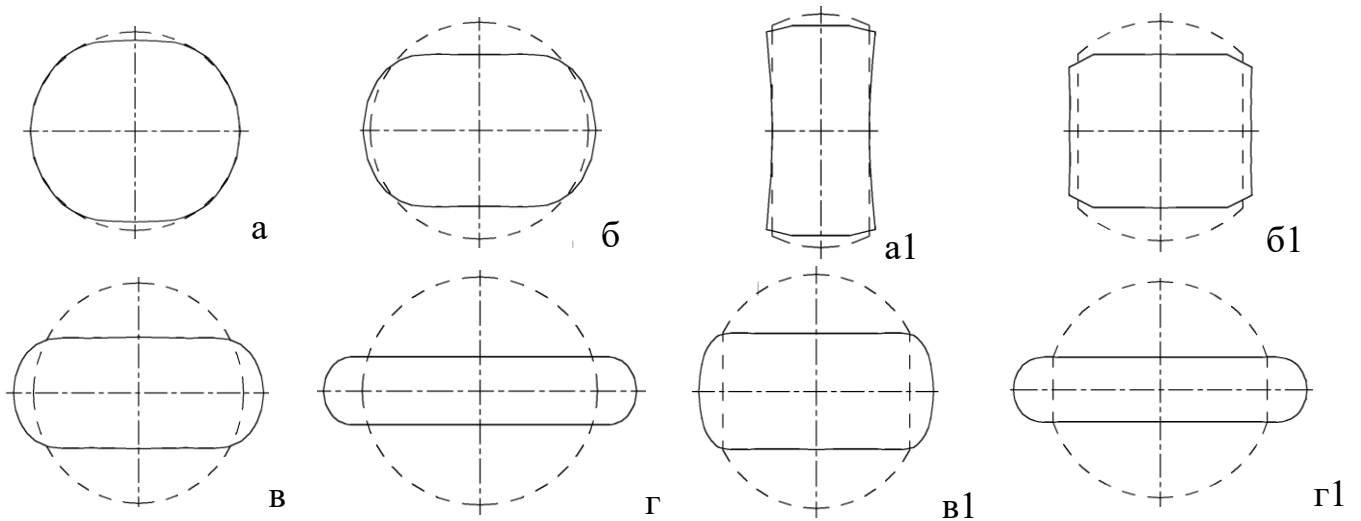


Рисунок 3.3 – Поперечні перерізи заготовок з ПЗ (1) і без ПЗ (2) до і після прокатування в залежності від ступеня деформування: а–10%; б – 30%; в – 50%; г – 70%

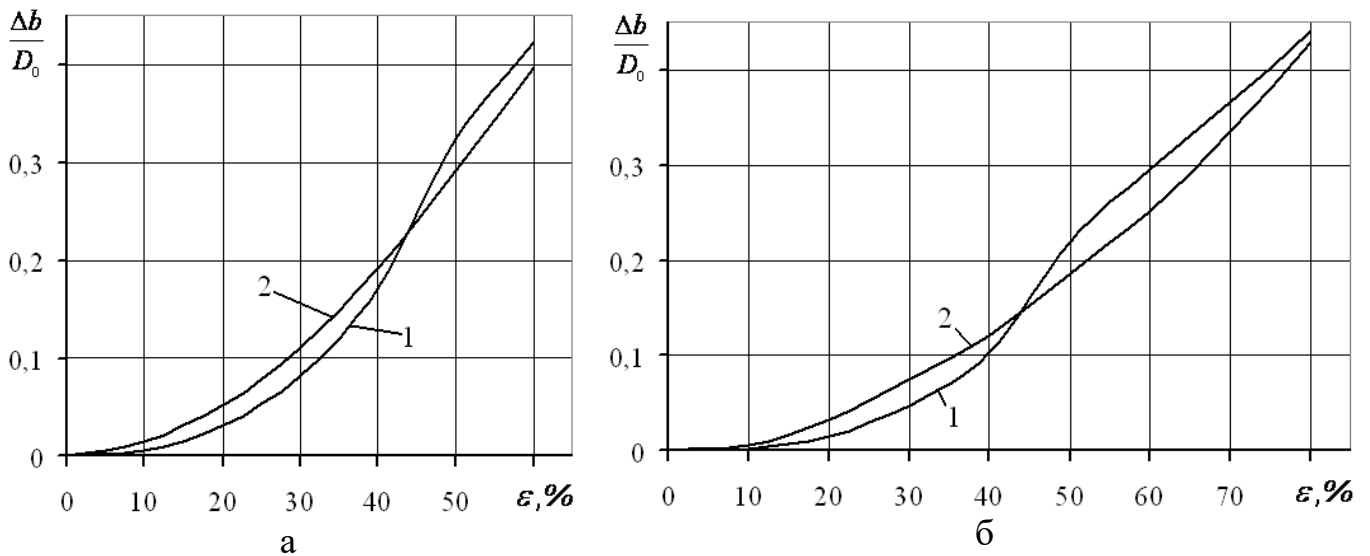


Рисунок 3.4 – Залежності відносного лінійного розширення $\Delta b/D_0$ від ступеня деформації при прокатці циліндричних заготовок (1 – без ПЗ; 2 – з ПЗ) в гладких валах $\varnothing 260\text{мм}$: а – $\varnothing 20\text{мм}$; б - $\varnothing 40\text{мм}$

У перерізі заготовки з ПЗ, при $\varepsilon = 20\%$ в зонах, що не контактують з інструментом, починає формуватися область, в якій швидкість деформації є істотно нижчою за інший переріз (рис. 3.5). Це підтверджує аналіз картини деформації форми волокон прокатної текстури заготовки, яка відображається в розрахунковій програмі QForm3D у вигляді лагранжевих ліній (рис. 3.8). Дані показують, що на початкових

стадіях деформування, у заготовці з ПЗ - ланки в центральній зоні починають деформуватися, а у заготовки без ПЗ в цій же зоні ланки ще не зазнали деформації.

З ростом обтиску, деформація проникає у внутрішні шари заготовки, збільшуючи напруження в металі, які зменшують опір деформуванню та сили зчеплення між частинками металу [15]. По досягненню $\varepsilon \approx 60\%$, метал з позаконтактних зон починає рухатися всередину заготовки і плинати в поздовжньому напрямку. При подальшому збільшенні ступеня деформації - шари, що деформуються в контакті з інструментом, проникають в самий центр осередку деформації, тим самим знову збільшуючи опір деформуванню. Сили зчеплення у позаконтактній зоні залишаються більшими ніж в іншій частині перерізу.

При гарячому прокатуванні заготовок без ПЗ при малих ступенях деформації – поверхневий опір деформуванню проникає глибше. Це відбувається через відсутність ПЗ, в яких високі сили зчеплення стримують розширення деформації, що створює сприятливі умови для течії металу в подовжньому напрямку, вирівнюючи швидкість деформації по всьому перерізу заготовки. По досягненню $\varepsilon = 40...50\%$, утворюється ПЗ, що викликає появу поперечних сил зчеплення, зниження опору деформуванню та збільшує розширення (рис. 3.6, в, г). Подальше деформування призводить до того, гальмування течію металу в поздовжньому напрямку за рахунок ПЗ, що визначається за малим опором деформуванню в цій області.

Процес проникнення деформації в центрі осередку деформування заготовки зі збільшенням ступеня деформації, відображається у вигляді зміни полів швидкостей деформації (рис. 3.7, а...ж). При $\varepsilon = 50\%$, внутрішні шари металу опрацьовуються краще, ніж зовнішні. Це спричиняється тим, що позаконтактна зона гальмує деформацію в поперечному напрямку, змушуючи метал плинати в поздовжньому. При ступенях деформації більше 70% - швидкість деформування вирівнюється по всьому перерізу, залишаючись суттєво меншою в зоні ПЗ. Це підтверджує явище, коли при великій деформації, металу легше плинати в поперечному напрямку, викликаючи суттєве розширення заготовок, що прокочуються.

Порівняння показників відносного лінійного розширення $\Delta b/D_0$ при прокатуванні заготовок з ПЗ та без ПЗ в сукупності з проведеним аналізом полів швидкості і

опору деформації в поперечному перерізі, дає можливість пояснити схему впливу ПЗ на розширення. При малих ступенях деформації, низький опір деформуванню в ПЗ сприяє плинності металу в поперечному напрямку, тому у заготовок з ПЗ – розширення більше, ніж у заготовок без ПЗ (рис. 3.5). По досягненню ступеня обтиску $\varepsilon = 50\%$, у заготовок без ПЗ – деформація глибше проникає (рис. 3.7), що показує в них більш активнішу течію металу в поздовжньому напрямку, ніж у заготовок з ПЗ. При ступенях деформації $\varepsilon \approx 50\%$, в заготовках без ПЗ утворюється позаконтактна зона, яка сприяє течії металу в поперечному напрямку і зростанню розширення. В цей самий час, у заготовок з ПЗ, деформація проникає вглиб осередку деформації і метал з позаконтактної зони починає рухатись в напрямку центра заготовки та плинути в поздовжньому напрямку. Тому, за $\varepsilon = 40...50\%$, у заготовок без ПЗ розширення стає більшим, ніж у заготовок з ПЗ.

По досягненню ступеня деформації $\varepsilon \approx 80\%$, площі поперечного перерізу і розміри позаконтактних зон, у заготовок з ПЗ і без ПЗ – вирівнюються. Заготовка починає рівномірно деформуватися по всій площі поперечного перерізу (рис. 3.6, ж). Це є підставою зближення показників розширення на графіках (рис. 3.4).

Для операцій по вальцюванню заготовок циліндричного перерізу, коли яких заготовки зазнають ступень деформування меншу за $\varepsilon \leq 40...50\%$ – позаконтактні зони будуть істотно впливати на перебіг процесу вальцювання, а відносно лінійне розширення буде визначатися за функцією: $\Delta b/D_0 = f(D_{валка}, \varepsilon \text{ або } l_0/h_{cp}, n, ПЗ)$.

При ступенях деформації $\varepsilon \approx 40...70\%$ – кращі умови прокатування будуть у заготовці з ПЗ, вони гальмують поздовжню деформацію та сприяють поперечному витягуванню. Після досягнення ступеня деформації 70% - вплив ПЗ на розширення можна не враховувати.

Похибка розрахункових даних, в порівнянні з експериментальними не перевищувала 10%, що свідчить про допустимий рівень відхилення і можливості оцінювати вплив різних форм і розмірів позаконтактних зон на параметри прокатування за розрахунковими даними.

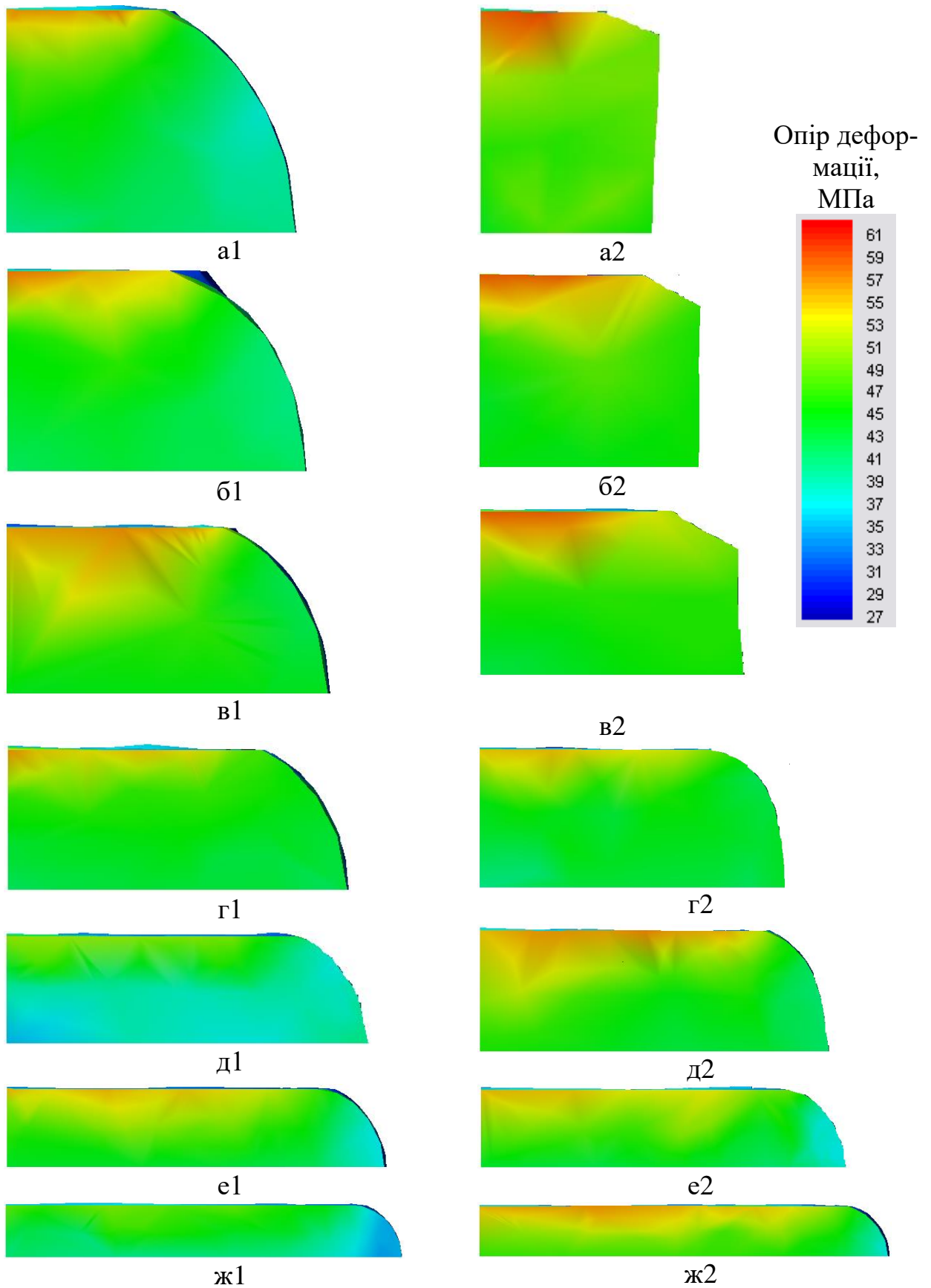


Рисунок 3.5 – Опір деформації в поперечних перерізах циліндричних заготовок діаметром 40 мм – з ПЗ (1) та без ПЗ (2):

а – 20%; б – 30%; в – 40%; г – 50%; д – 60%; е – 70%; ж – 80%

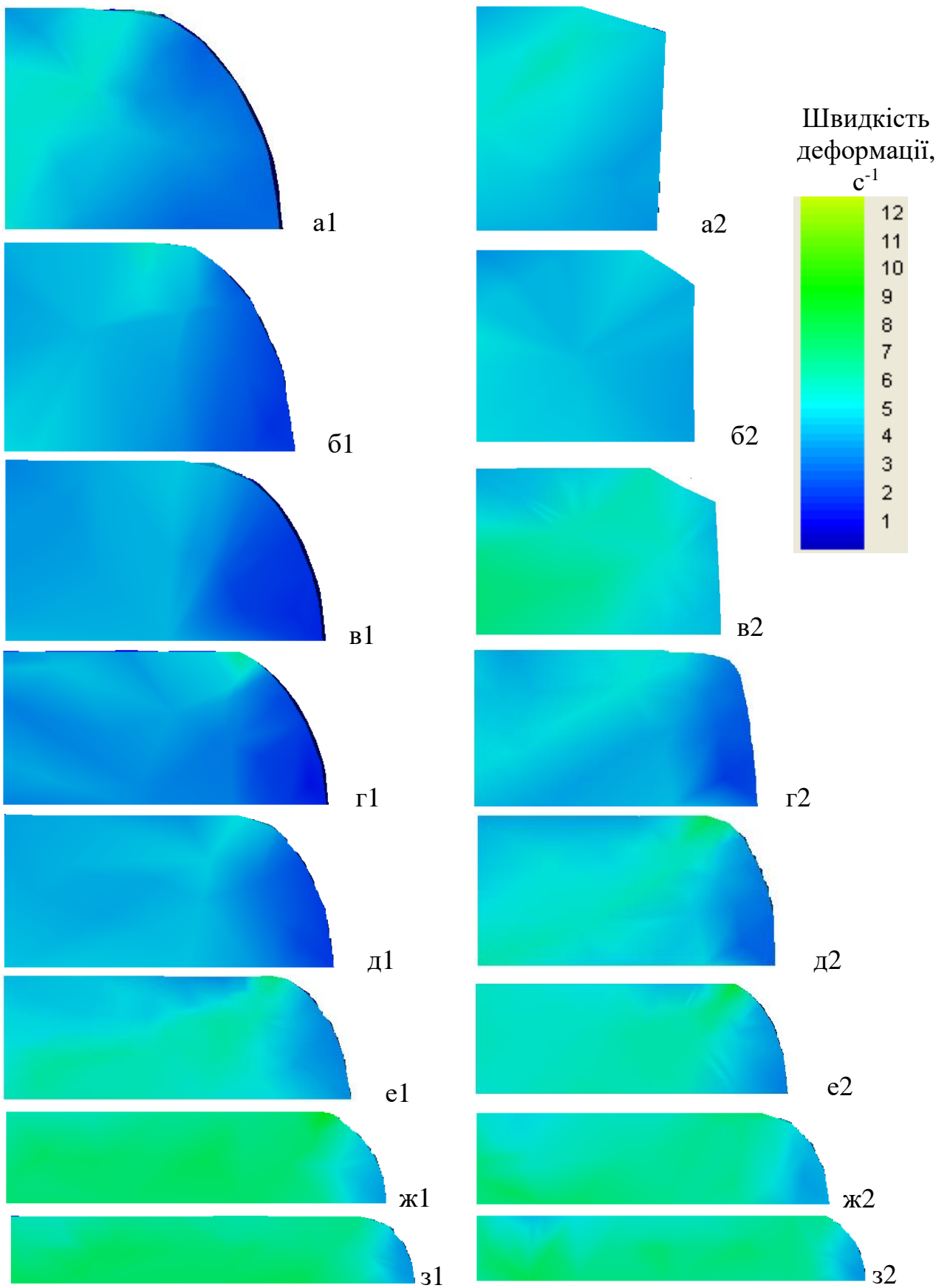


Рисунок 3.6 – Швидкості деформації в поперечних перерізах циліндричних заготовок діаметром 40 мм – з ПЗ(1) та без ПЗ (2):

а – 20%; б – 30%; в – 40%; г – 43%; д – 50%; е – 60%; ж – 70%; з – 80%

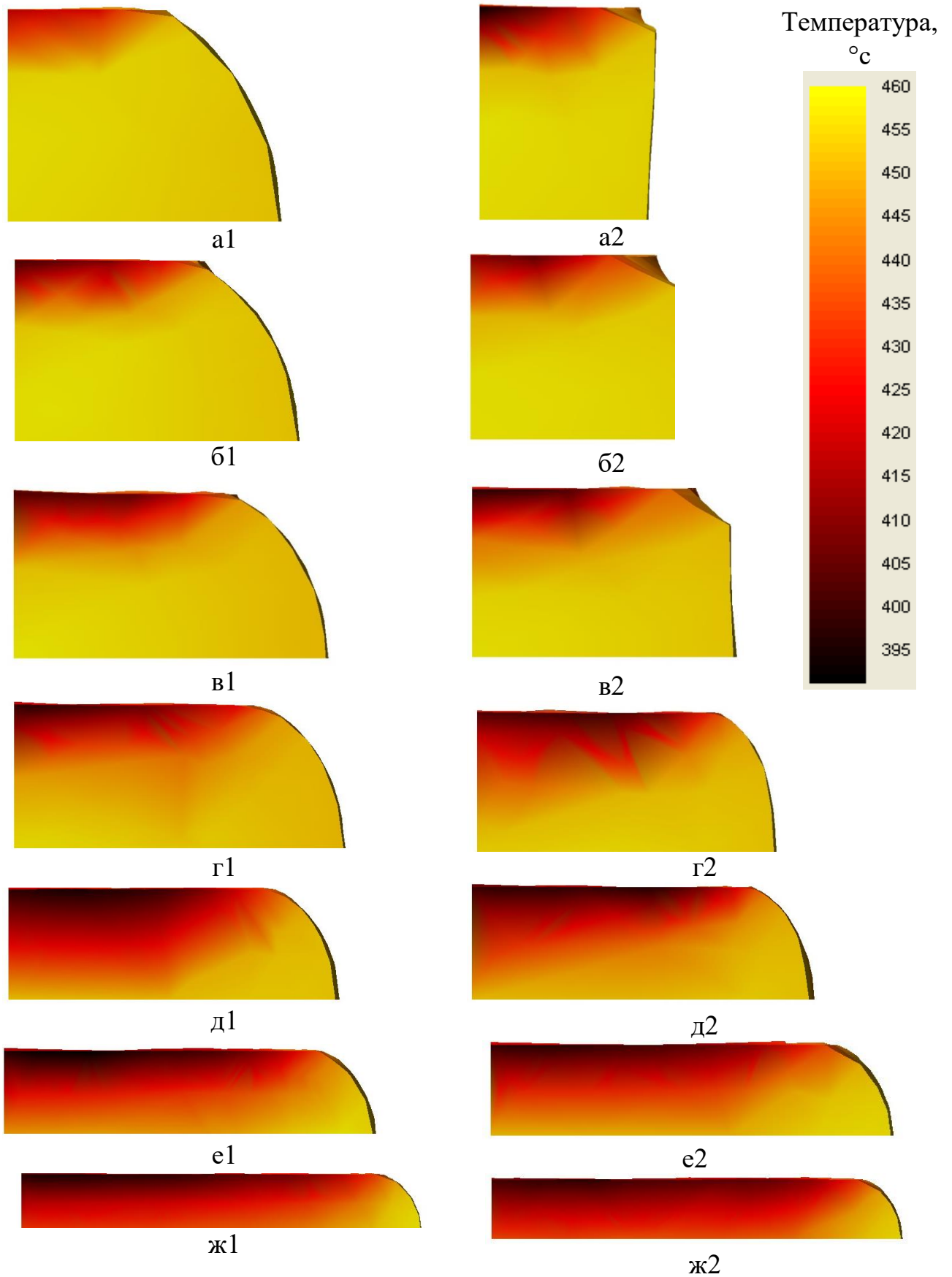


Рисунок 3.7 – Поперечні перерізи циліндричних заготовок діаметром 40 мм з ПЗ (1) та без ПЗ (2) з температурними полями:

а – 20%; б – 30%; в – 40%; г – 50%; д – 60%; е – 70%; ж – 80%

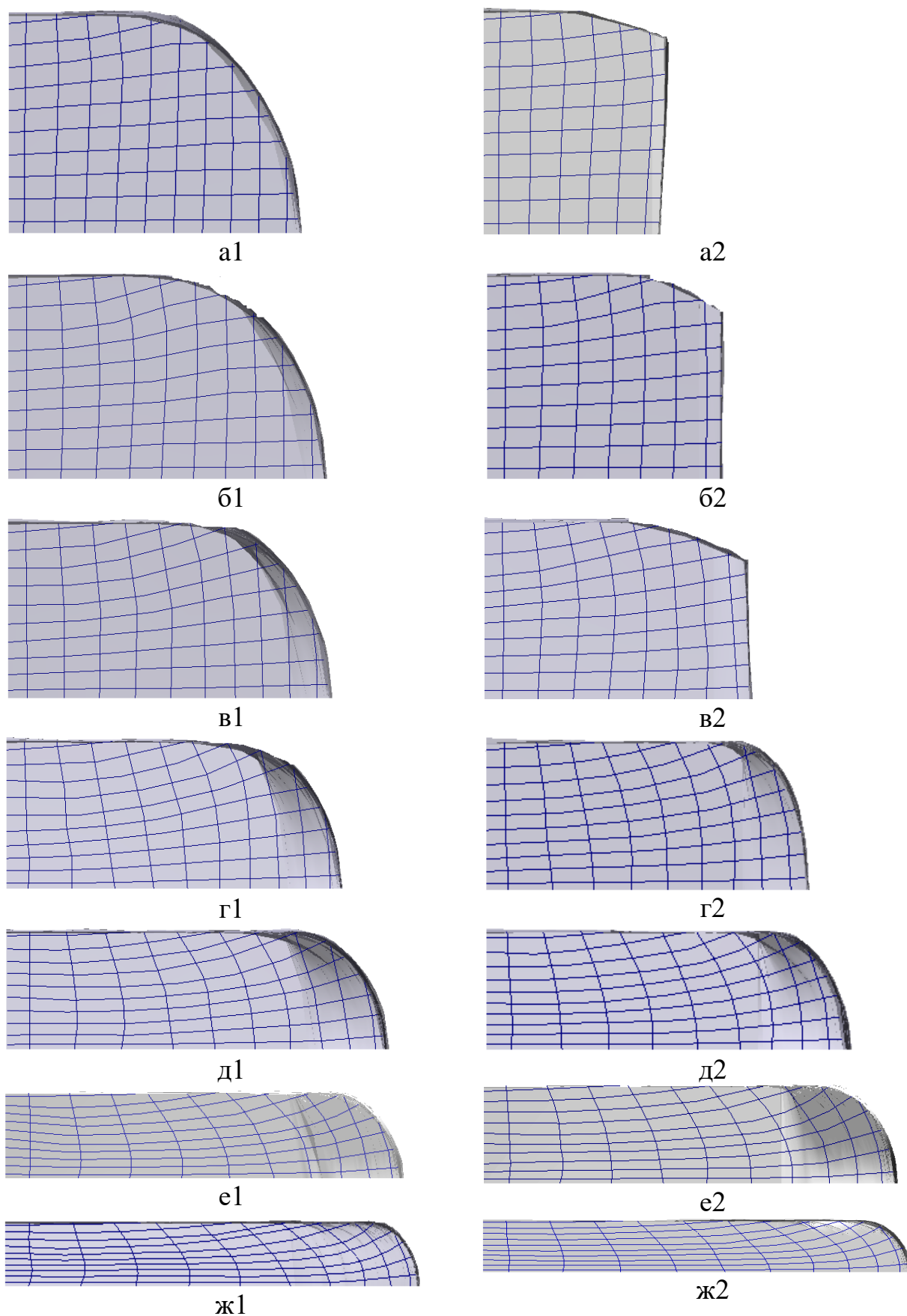


Рисунок 3.8 – Поперечні перерізи циліндричних заготовок діаметром 40 мм з ПЗ (1) та без ПЗ (2) з лагранжевими лініями:

а – 20%; б – 30%; в – 40%; г – 50%; д – 60%; е – 70%; ж – 80%

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

Теоретичні дослідження вальцювання за найбільш поширеною схемою - круговал, виконувались за результатами моделювання в програмі QForm3D заготовок з алюмінієвого сплаву АК6, \varnothing 25, 35, 50 і 65 мм, з ПЗ та без ПЗ (розділ 2.5.2). Розмір розширення при вальцюванні заготовок з ПЗ визначався у відповідності з формулою (табл. 1.3), що була отримана за експериментальними даними. Порівняння результатів моделювання та експериментальних даних, призвело до необхідності внесення коригувань до розміру коефіцієнту тертя, що змінюється в залежності від коефіцієнту обтиснення (рис. 3.9). Збільшення напруги в приконтактних зонах осередку деформування, також викликає зростання коефіцієнту тертя металу та інструменту.

Вимірювання розмірів заготовок після вальцювання (табл. 3.2) показали, що у заготовок без ПЗ лінійне та об'ємне розширення є більшим, ніж у заготовок з ПЗ. Це пояснюється тим, що позаконтактна зона визначається меншою швидкістю та більш високим опором деформування.

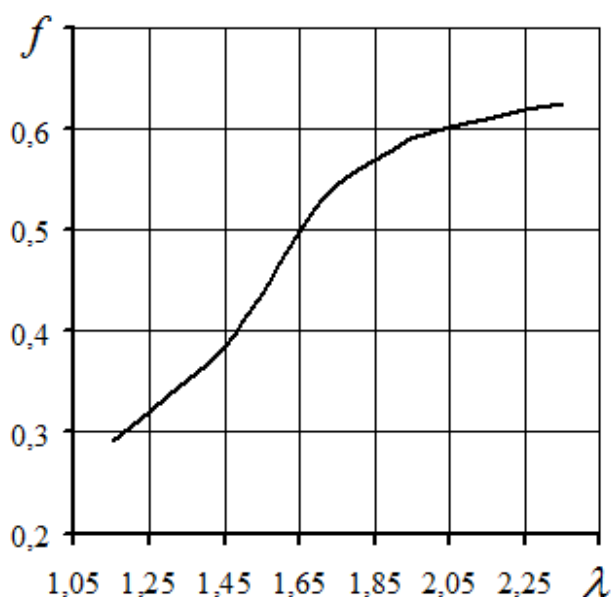


Рисунок 3.9 – Залежність коефіцієнту тертя від коефіцієнту витягування при вальцюванні циліндричних заготовок зі сплаву АК6 в овальних калібрах

Таблиця 3.2 – Результати вимірювань залежності розширення Δb від коефіцієнту витягування λ_{ov} і діаметра заготовки D_0 мм під час вальцювання циліндричних заготовок з ПЗ і без ПЗ в овальних калібрах

D_0 , мм	λ_{ov}	Δb без ПЗ, мм	Δb ПЗ, мм	$\delta_{\Delta b}$, %	D_0 , мм	λ_{ov}	Δb без ПЗ, мм	Δb ПЗ, мм	$\delta_{\Delta b}$, %
65	1,15	0,63	0,12	80,74	50	1,15	0,917	0,29	68,92
	1,25	1,69	0,91	46,20		1,25	1,339	0,70	47,73
	1,35	3,035	2,05	32,56		1,35	3,1	2,11	31,97
	1,45	4,75	3,72	21,73		1,45	5	4,05	19,05
	1,55	5,97	5,06	15,24		1,55	7,16	6,23	13,01
	1,65	7,95	7,10	10,72		1,65	9,25	8,40	9,19
	1,75	10,07	9,21	8,50		1,75	11,89	11,17	6,09
	1,95	14,76	14,16	4,08		1,95	17,29	16,74	3,21
	2,15	18,88	18,53	1,87		2,15	20,63	20,31	1,55
	2,35	22,08	21,82	1,19		2,35	23,7	23,60	0,42
2,55	24,93	24,87	0,23						
35	1,15	1,15	0,35	69,66	25	1,15	1,16	0,38	70,20
	1,25	1,66	0,78	52,69		1,25	1,96	1,10	48,42
	1,35	3,32	2,32	30,13		1,35	3,39	2,43	28,46
	1,45	4,9	3,91	19,99		1,45	5,28	4,47	15,36
	1,55	8,1	7,37	9,40		1,55	10,7	10,08	5,78
	1,65	11,6	11,03	5,20		1,65	14	13,59	2,95
	1,75	15	14,53	3,12		1,75	15,63	15,32	1,98
	1,95	18,4	18,16	1,31					

Як наслідок вимірювання ширини заготовок без ПЗ після вальцювання (табл. 3.2), було побудовано залежність розміру лінійного розширення Δb від кривизни овальних калібрів i (табл. 1.5) та діаметру заготовки D_0 (рис. 3.9, а), яка показала зростання розширення зі збільшенням кривизни калібру та діаметру заготовок.

Залежність об'ємного показника розширення $F_{розш}/F_{зм}$ від кривизни овальних калібрів i та діаметру заготовки D_0 під час вальцювання циліндричних заготовок без ПЗ в овальних калібрах (рис. 3.9, б) показує збільшення впливу ПЗ на розширення зі зростанням кривизни калібру та зменшенням діаметру заготовок.

Таблиця 3.3 – Результати вимірювань залежності об'ємного показника розширення $F_{розш}/F_{зм}$ від коефіцієнту витягування $\lambda_{ов}$ та діаметру заготовки D_0 мм під час вальцювання циліндричних заготовок з ПЗ та без ПЗ в овальних калібрах

D ₀ , мм	$\lambda_{ов}$	Без ПЗ			з ПЗ			$\delta_{F_{розш}/F_{зм}}$
		$F_{розш}$, мм ²	$F_{зм}$, мм ²	$F_{розш}/F_{зм}$	$F_{розш}$, мм ²	$F_{зм}$, мм ²	$F_{розш}/F_{зм}$	
65	1,15	4,76	454,04	0,0105	2,00	480,20	0,0042	60,27
	1,25	15,60	793,36	0,0197	9,20	788,36	0,0117	40,65
	1,35	23,20	998,76	0,0232	17,20	1003,48	0,0171	26,21
	1,45	38,00	1170,84	0,0325	31,60	1175,24	0,0269	17,15
	1,55	58,80	1350,88	0,0435	51,60	1335,56	0,0386	11,24
	1,65	77,16	1479,84	0,0521	69,60	1459,24	0,0477	8,52
	1,75	91,40	1601,32	0,0571	84,40	1599,96	0,0528	7,58
	1,95	116,40	1854,76	0,0628	109,20	1844,00	0,0592	5,64
	2,15	127,20	2044,00	0,0622	123,84	2076,96	0,0596	4,19
2,35	134,00	2131,20	0,0629	135,60	2228,88	0,0608	3,24	
50	1,15	6,80	335,72	0,0203	2,68	336,08	0,0080	60,63
	1,25	14,00	460,80	0,0304	8,64	465,00	0,0186	38,84
	1,35	26,00	601,12	0,0433	19,20	609,48	0,0315	27,17
	1,45	38,80	728,40	0,0533	32,00	732,52	0,0437	17,99
	1,55	57,20	819,04	0,0698	50,04	814,52	0,0614	12,03
	1,65	73,60	909,60	0,0809	67,36	912,72	0,0738	8,79
	1,75	93,20	996,00	0,0936	85,32	980,32	0,0870	6,99
1,95	119,60	1131,44	0,1057	112,40	1125,44	0,0999	5,52	

Продовження табл. 3.3

50	2,15	131,00	1217,92	0,1076	124,80	1219,32	0,1024	4,84
	2,35	137,60	1291,48	0,1065	132,28	1297,00	0,1020	4,28
35	1,15	6,80	162,92	0,0417	2,40	156,08	0,0154	63,16
	1,25	12,28	227,40	0,0540	6,92	229,32	0,0302	44,12
	1,35	18,76	302,32	0,0621	13,56	299,04	0,0453	26,93
	1,45	30,68	359,48	0,0853	24,72	359,80	0,0687	19,50
	1,55	63,00	428,00	0,1472	55,12	422,36	0,1305	11,34
	1,65	80,16	477,00	0,1681	74,48	482,64	0,1543	8,17
	1,75	91,20	526,60	0,1732	85,76	530,56	0,1616	6,67
25	1,95	100,00	585,20	0,1709	94,32	587,24	0,1606	6,01
	1,15	6,80	87,52	0,0777	2,92	87,76	0,0333	57,18
	1,25	13,96	125,32	0,1114	7,56	124,92	0,0605	45,67
	1,35	18,64	157,80	0,1181	13,16	157,68	0,0835	29,35
	1,45	26,40	191,28	0,1380	21,72	191,96	0,1131	18,02
	1,55	54,92	242,16	0,2268	48,76	241,12	0,2022	10,83
	1,65	65,80	272,00	0,2419	60,80	272,68	0,2230	7,83
	1,75	68,32	289,16	0,2363	63,88	289,16	0,2209	6,50

Розрахункові дані (табл. 3.2, 3.3), показали схожу залежність відносного відхилення для лінійних та об'ємних показників розширення ($\delta_{\Delta b}$ та $\delta_{F_{розши}F_{зм}}$) за всіма діаметрами заготовок під час вальцювання заготовок з ПЗ та без ПЗ в залежності з відповідними коефіцієнтами витягування (рис. 3.10). Програмний пакет для статистичної обробки даних Statistika [130], дозволяє визначити ці залежності за використанням автоматизованого алгоритму, що містить методи нелінійного оцінювання, які описані в роботі [133]:

- для лінійного показника розширення:

$$\delta_{\Delta b} = \sqrt{1,91579 \cdot \lambda^2 - 5,3262 \cdot \lambda + 3,73715} - 1,4249 \cdot \lambda + 2,01495; \quad (3.1)$$

- для об'ємного показника розширення:

$$\delta_{F_{\text{розш}}/F_{\text{зм}}} = \sqrt{1,80966 \cdot \lambda^2 - 4,7549 \cdot \lambda + 3,1924 - 1,3683 \cdot \lambda + 1,82729}. \quad (3.2)$$

Коефіцієнт впливу ПЗ – $K_{\text{розш.ов.}}^{\text{ПЗ}}$, визначається за формулою (2.24) як наслідок множення відносного відхилення розширення при вальцюванні заготовок з ПЗ і без ПЗ на коефіцієнт нерівномірності деформації $K_{\text{розш}}^{\text{ов}}$. За допомогою номограми для визначення розмірів овального калібру [15] (рис. 2.13), залежність $K_{\text{розш.ов.}}^{\text{ПЗ}}$ від коефіцієнту витягування λ , була трансформована в залежність від кривизни овальних калібрів i (рис. 3.11). Зменшення $K_{\text{розш.ов.}}^{\text{ПЗ}}$ зі збільшенням діаметру говорить про зниження впливу ПЗ на розширення з використанням заготовок більшого діаметру.

Для всіх діаметрів заготовок характерне спільне зростання коефіцієнту впливу ПЗ ($K_{\text{розш.ов.}}^{\text{ПЗ}}$) з коефіцієнтом нерівномірності деформації ($K_{\text{розш}}^{\text{ов}}$) [15], [140] при $i < 1,25$. В цьому інтервалі, коефіцієнт впливу ПЗ складає від 10 до 60 % відносно розміру коефіцієнту нерівномірності деформації (рис. 3.11, 3.12). Це говорить про переважний вплив позаконтактних зон на нерівномірність деформації при невеликих ступенях деформації. При $i \approx 1,25$, коефіцієнт впливу ПЗ на розширення досягає максимуму для всіх діаметрів заготовок, що досліджуються (25, 35,50 та 65 мм). При $i \geq 1,25$, розмір коефіцієнту впливу ПЗ ($K_{\text{розш.ов.}}^{\text{ПЗ}}$), поступово зменшується.

При коефіцієнті витяжки, який є більшим за рекомендований для розрахунків під час вальцювання по системі круг-овал ($\lambda_{\text{max}} = 1,8$) [15], розмір коефіцієнту впливу ПЗ ($K_{\text{розш.ов.}}^{\text{ПЗ}}$) по відношенню до коефіцієнту нерівномірності деформації ($K_{\text{розш}}^{\text{ов}}$) становить менше за статистичну похибку в 5% (рис. 3.10). Це свідчить про необхідність враховувати вплив позаконтактних зон при розрахунках розширення під час деформування в рекомендованих інтервалах витягування.

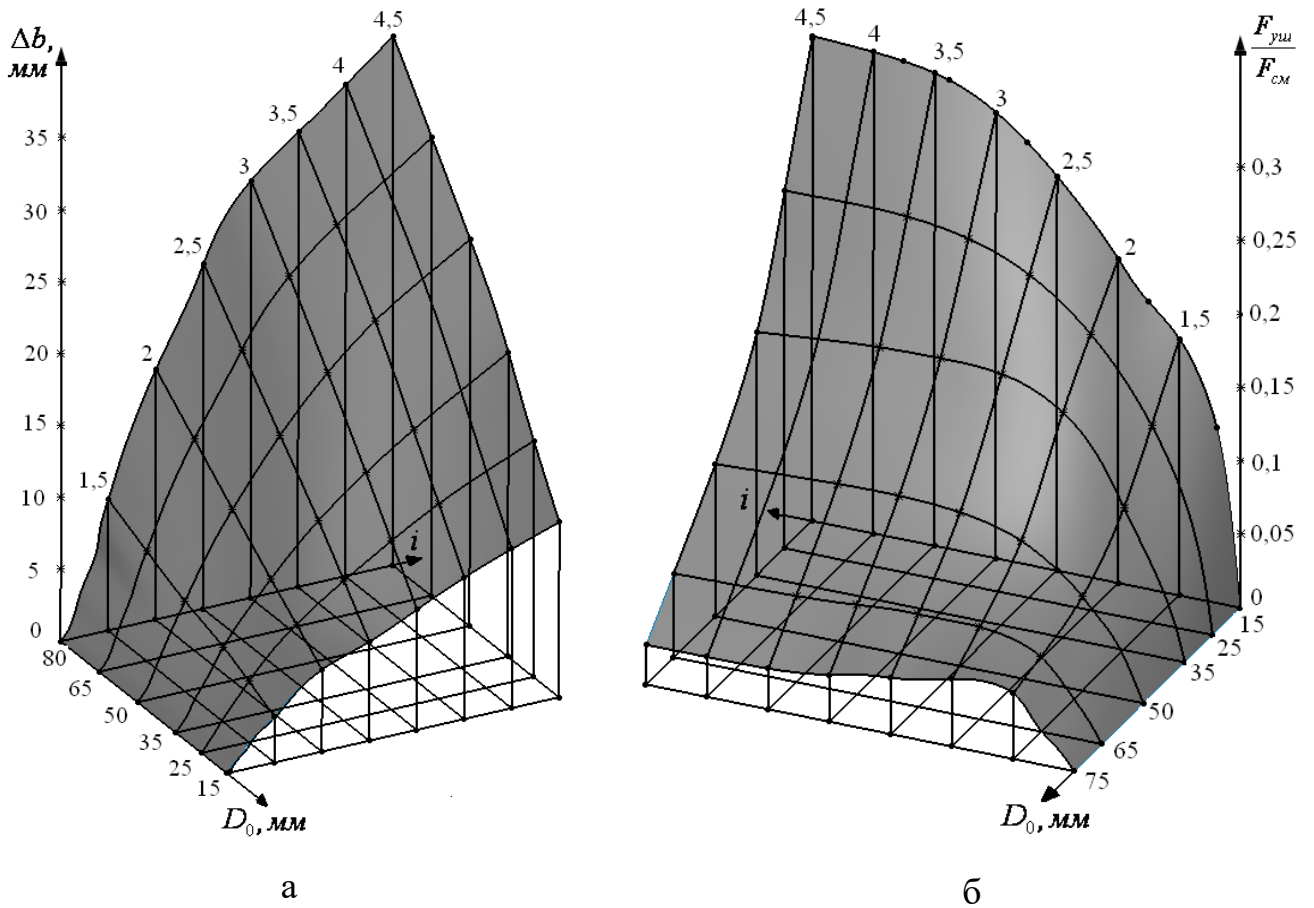


Рисунок 3.9 – Залежність розширення Δb (а) та показника розширення $F_{розш}/F_{зм}$ (б) від кривизни овальних калібрів i та діаметра заготовки D_0 мм під час вальцювання циліндричних заготовок без ПЗ в овальних калібрах

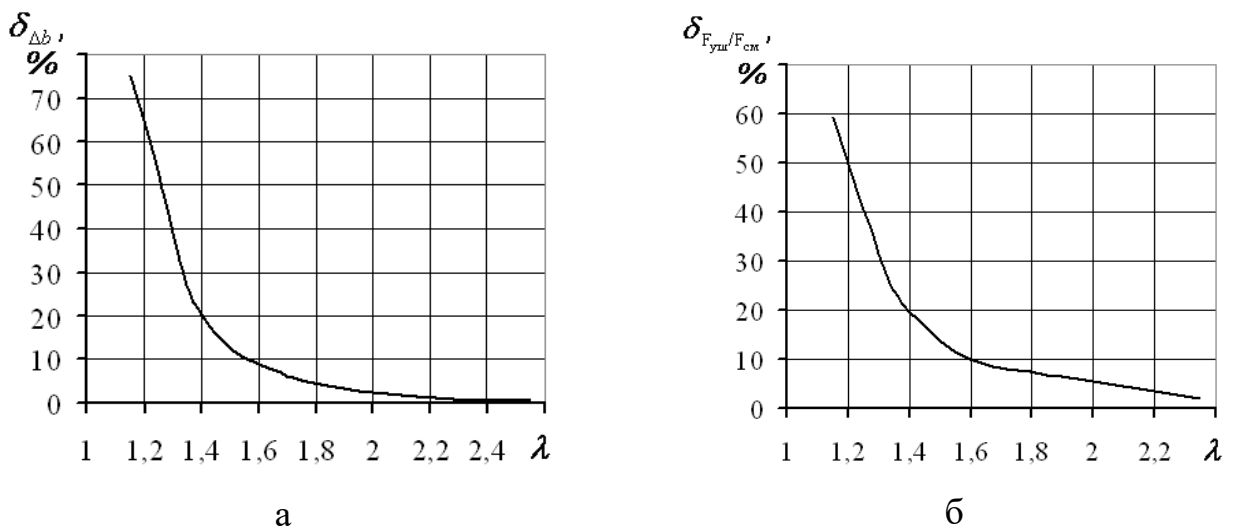


Рисунок 3.10 – Розрахункова залежність відносного відхилення показника розширення (а) та об'ємного показника розширення $F_{розш}/F_{зм}$ (б) під час вальцювання заготовок з ПЗ і без ПЗ в овальних калібрах в залежності від коефіцієнту λ

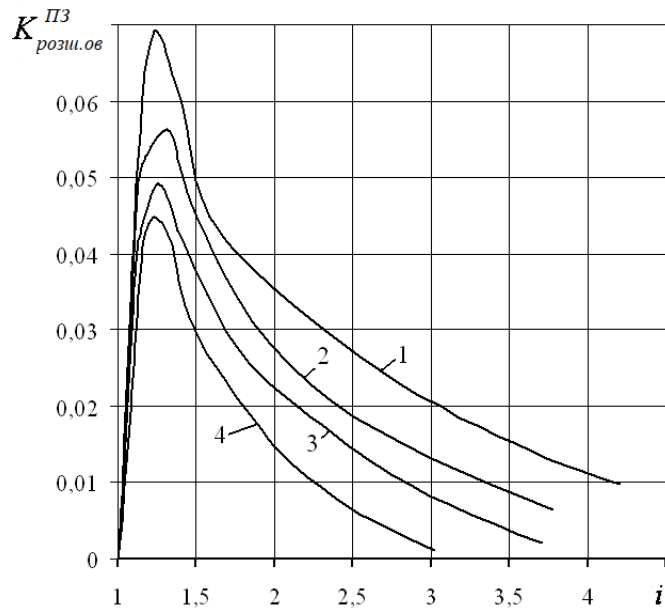


Рисунок 3.11 – Залежність коефіцієнту впливу ПЗ $K_{розш.ов}^{ПЗ}$ від кривизни овальних калібрів $i = R_{ов}/R_{заг}$ та діаметру заготовки D_0 мм під час вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах D_0 :

1 – 25 мм; 2 – 35 мм; 3 – 50 мм; 4 – 65 мм

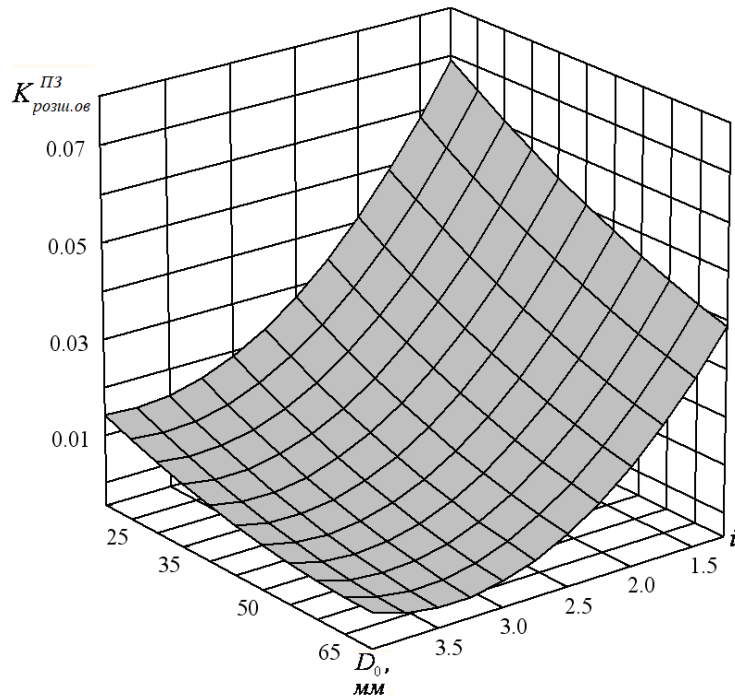


Рисунок 3.12 – Залежність коефіцієнту впливу ПЗ $K_{розш.ов}^{ПЗ}$ від кривизни овальних калібрів $i = R_{ов}/R_{заг}$ та діаметру заготовки D_0 мм під час вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах при $i \geq 1,25$

Залежності коефіцієнту впливу ПЗ $K_{розш.ов.}^{ПЗ}$ від кривизни овальних калібрів i та діаметру заготовки D_0 поділяється максимумом функції на два інтервали: $i < 1,25$ та $i \geq 1,25$. Формули залежності були розроблені за аналітичними методами в програмному комплексі Statistika. Побудова поверхонь залежності (рис. 3.12) відбувається в модулі з побудови тривимірних діаграм розсіювання даних та підгонки точок до поверхні за допомогою полінома другого ступеня [130], [149].

За невеликих коефіцієнтів витягування ($\lambda < 1,25$), форма залежності коефіцієнту впливу ПЗ ($K_{розш.ов.}^{ПЗ}$) у вигляді полінома другого ступеня визначається за формулою:

$$K_{розш.ов.}^{ПЗ} = 2,517 \cdot D_0 + 0,002 \cdot i - 0,9705 \cdot D_0^2 - 0,0024 \cdot D_0 \cdot i + 3,931 \cdot 10^{-6} \cdot i^2 - 1,5354. \quad (3.3)$$

Розрахунки технологічних параметрів вальцювання за схемою круг-овал в більшості випадків виконуються в рекомендованому інтервалі коефіцієнту витягування: $1,25 \leq i \leq 1,8$, для якого за розрахунків коефіцієнту впливу ПЗ ($K_{розш.ов.}^{ПЗ}$) на розширення можна використовувати формулу залежності:

$$K_{розш.ов.}^{ПЗ} = 0,1981 - 0,001 \cdot D_0 - 0,1154 \cdot i + 3,5219 \cdot 10^{-6} \cdot D_0^2 + 9,0888 \cdot 10^{-5} \cdot D_0 \cdot i + 0,0212 \cdot 10^{-6} \cdot i^2. \quad (3.4)$$

Формула (табл. 1.3) для визначення розширення при вальцюванні заготовок круглого перерізу в овальних калібрах, є складовою частиною математичної моделі [81], за якою розширення розраховується з урахуванням впливу позаконтанктних зон. Автором розроблено формулу, за якою визначається вплив ПЗ через множення коефіцієнту впливу ПЗ ($K_{розш.ов.}^{ПЗ}$) на ширину позаконтанктної зони [140]:

$$\Delta b = K_{розш.ов.}^{ПЗ} \cdot \sqrt{(d - h_{об}) \cdot \frac{D_{к}^{об}}{2} \cdot \left(\frac{d - h_{об}}{d} \right)} - (b_0 - b'_0) \cdot K_{розш.ов.}^{ПЗ}, \quad (3.5)$$

де b_0 , b'_0 - ширина заготовки з ПЗ і без ПЗ (рис. 2.16).

У зв'язку з тим, що коефіцієнт нерівномірності деформації $K_{розши}^{об}$ був розділений (2.22) на: коефіцієнт нерівномірності деформації $K_{розши.ов}^{нд}$ та коефіцієнт впливу позаконтактних зон $K_{розши.ов}^{ПЗ}$, формула розрахунку була скорегована за допомогою урахування геометричних розмірів ПЗ та співвідношення геометричних форм калібру і заготовки, що вальцюються в ньому:

$$\Delta b = K_{розши.ов}^{нд} \cdot \sqrt{(d - h_{ов}) \cdot \frac{D_{к}^{об}}{2} \cdot \left(\frac{d - h_{ов}}{d} \right) + \ln \left(\frac{h_{ПЗ}}{b_{ПЗ}} \right) \cdot a^2} \cdot K_{розши.ов}^{ПЗ}, \quad (3.6)$$

де $h_{ПЗ}$ та $b_{ПЗ}$ - висота та ширина позаконтактної зони (рис. 2.16, табл. 2.3).

Розрахунок відносного відхилення розміру розширення циліндричних заготовок, на яку впливає ПЗ від загальної величини розширення Δb (рис. 3.13), виявив необхідність обліку наявності в заготовці ПЗ за деформацій з коефіцієнтом витягування $\lambda < 1,45$. При деформуванні з коефіцієнтом більшим за 1,45, вплив становить менше 10% та може не враховуватись.

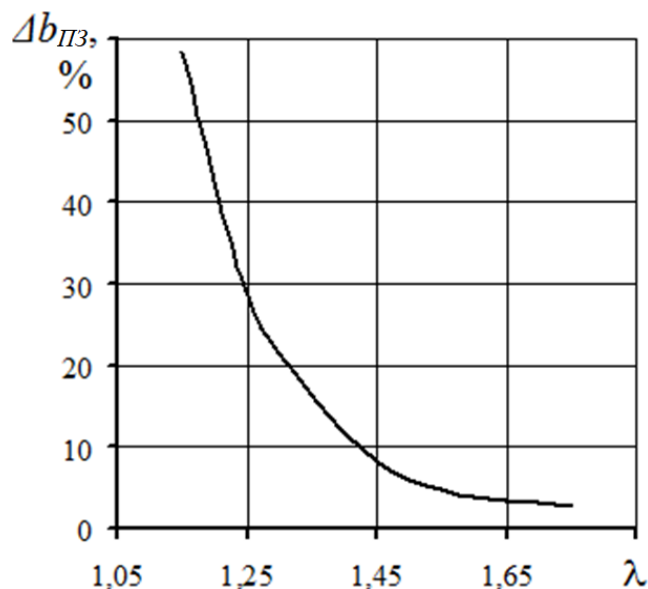


Рисунок 3.13 – Залежність відносного відхилення величини розширення циліндричних заготовок, на яку впливає ПЗ від загальної величини розширення Δb

Поведінка залежностей, що було отримано, пояснюється за допомогою оцінювання різних параметрів, що визначають течію металу в осередку деформування. Для всіх діаметрів, залежності коефіцієнту впливу ПЗ $K_{розш.ов.}^{ПЗ}$ – показують схожі ознаки поведінки, тому оцінка процесу виконувалась для випадку вальцювання заготовок діаметром 65мм (рис. 3.14). Результати розрахунків, за розподілом полів температури, швидкості, опору та роботи деформування, середньої напруги і переміщення металу в меридіональному перерізі (рис. 3.15...3.17) – дозволяють оцінити ознаки формування осередку деформування. Аналіз показує, що загальні зміни у параметрах вальцювання відбуваються після проходження металом 1/3 осередку деформування, після чого метал переходить в усталену стадію перед виходом з калібрів.

Для встановлення місця в осередку деформації, що найбільш підходить для порівняльного аналізу вальцювання заготовок з ПЗ і без ПЗ, визначалися напруги і деформації в декількох поперечних перерізах. Перерізи, в яких були визначені показники результатів моделювання, були розташовані згідно з рис. 3.14. Перерізи умовно позначені літерами: А-А - вхід металу в калібри (початок геометричного ОД), Б-Б – метал пройшов 1/3 довжини ОД (початок зміни параметрів вальцювання), В-В – метал пройшов 2/3 довжини ОД (формування сталого ОД) і Г-Г – вихід металу з калібрів (кінець геометричного ОД).

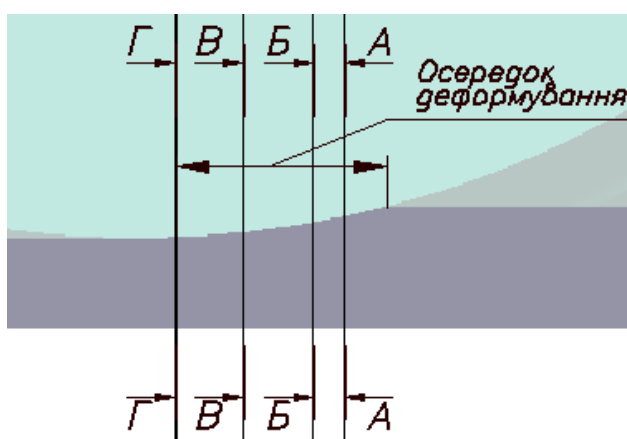


Рисунок 3.14 – Схема розташування досліджуваних поперечних перерізів осередку деформації при вальцюванні заготовок діаметром з ПЗ та без ПЗ в овальних калібрах

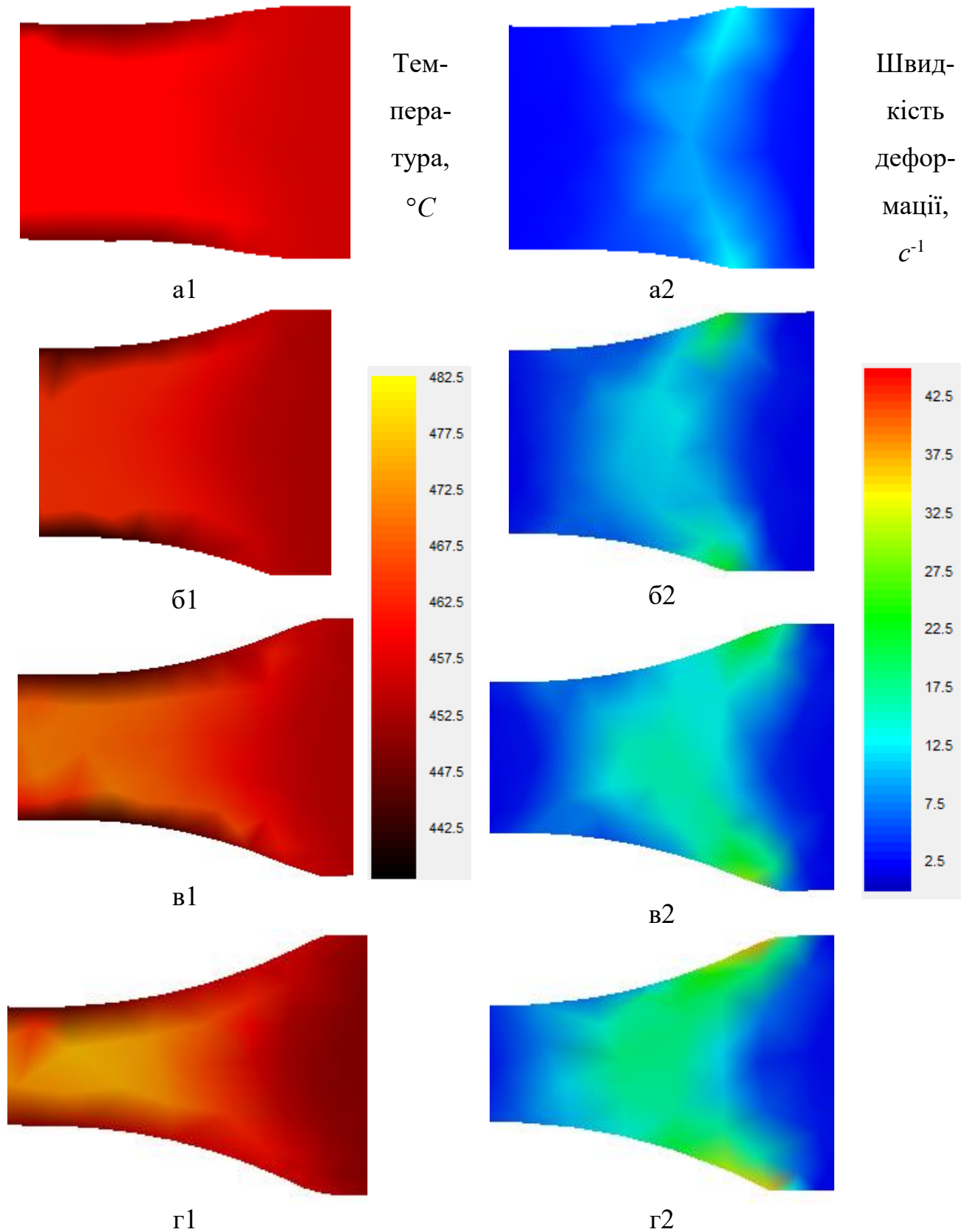


Рисунок 3.15 – Поля температури (1) та швидкості деформації (2) в меридіональному перерізі осередку деформації при вальцюванні циліндричних заготовок $\varnothing 65$ мм з ПЗ при кривизні овальних калібрів i : а – 1,08; б – 1,23; в – 1,52; г – 2,01.

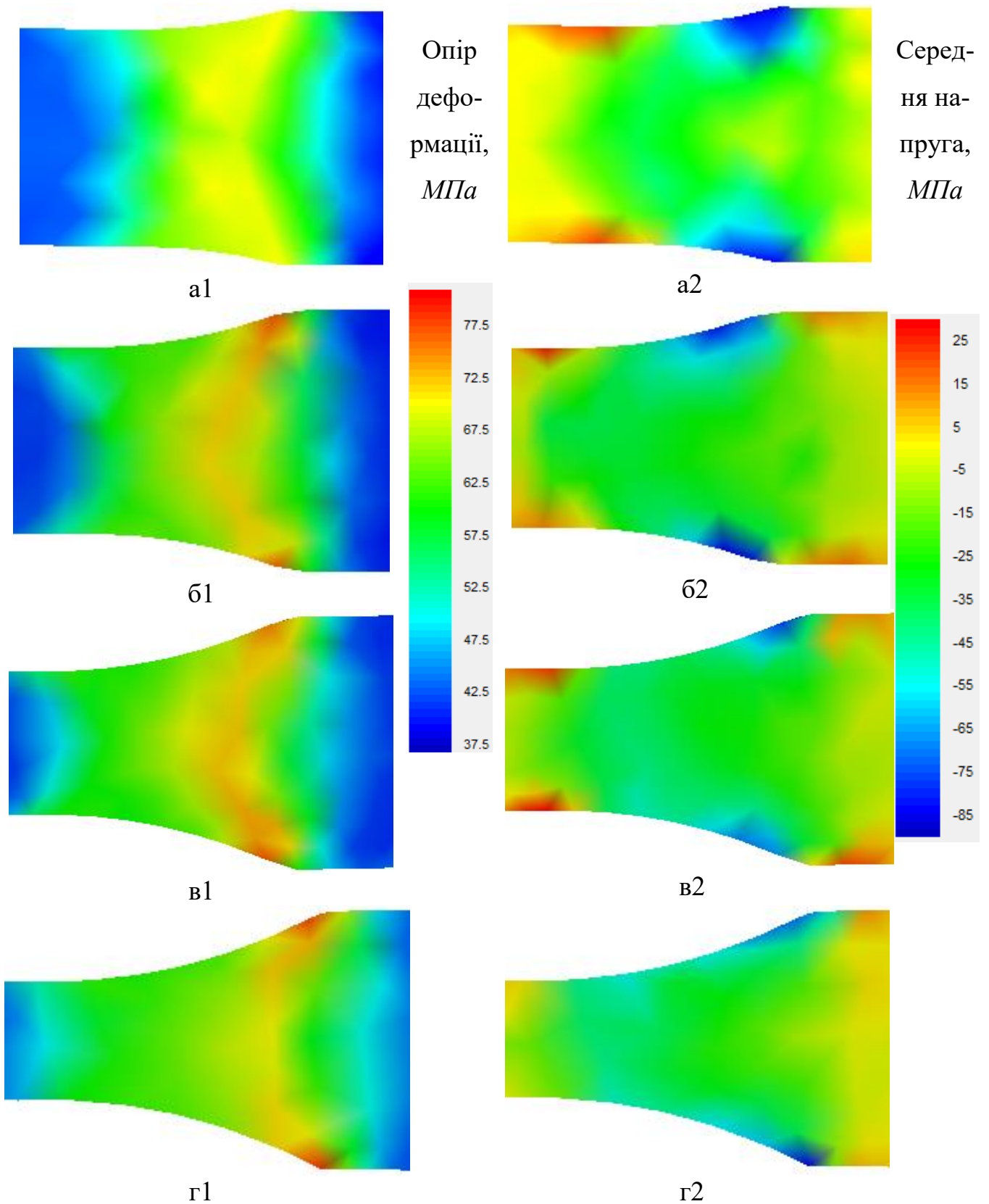


Рисунок 3.16 – Поля опору деформації (1) та середньої напруги (2) в меридіональному перерізі осередку деформації при вальцюванні циліндричних заготовок $\varnothing 65$ мм з ПЗ при кривизні овальних калібрів i : а – 1,08; б – 1,23; в – 1,52; г – 2,01.

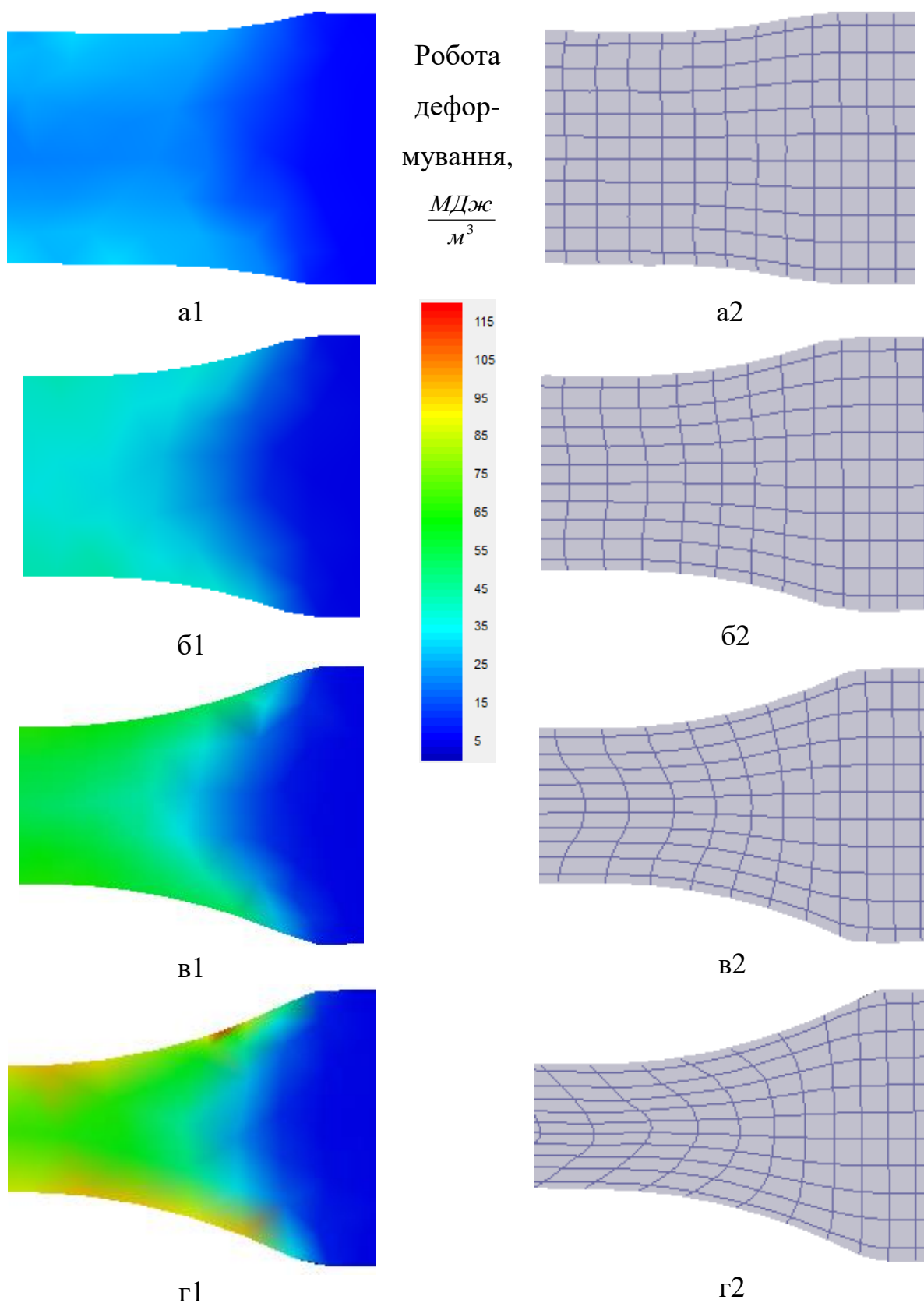


Рисунок 3.17 – Поля роботи деформації (1) та лагранжевих ліній (2) в меридіональному перерізі осередку деформації при вальцюванні циліндричних заготовок $\text{Ø}65$ мм з ПЗ при кривизні овальних калібрів i : а – 1,08; б – 1,23; в – 1,52; г – 2,01.

Аналіз рис. 3.18...3.19 показує, що в процесі деформації зона, яка не контактує з інструментом, має відмінні від решти обсягу металу швидкості деформації та напруги. На початку осередку деформування – швидкість і опір деформації більше в шарах, що контактують з інструментом (рис. 3.18), окрім того в поверхневих шарах виникають високі розтягуючі напруги (рис. 3.19). Зі збільшенням ступеня деформації – суттєво збільшується тиск поверхневих шарів в місці переходу металу від інструменту до позаконтактної зони, що прискорює в ній швидкість деформування. Стискаюча напруга з цих зон (рис. 3.19, б, в) зміщує метал, що належав до позаконтактних зон, у поперечному напрямку шз суттєво більшою швидкістю, ніж в іншій частині перерізу. Позаконтактні зони при утворенні сталої течії в осередку деформування – змушують метал з центру заготовки зміщуватися в бік випередження.

На рис. 3.20 наведені залежності швидкості і опору деформації, середньої напруги та швидкості переміщення металу в поперечному напрямку, при деформуванні циліндричних заготовок в області ПЗ, від довжини осередку деформування. У іншій частині осередку деформування, у позаконтактних зонах спостерігається найвища швидкість деформації та швидкість зсуву ПЗ до центру заготовки (рис. 3.20, а, г). Окрім того, у ПЗ за рахунок максимальної стискаючої напруги до середини осередку деформації, опір деформації набуває максимальних значень (рис. 3.20, б).

Проведені розрахунки, показали що в заготовках без ПЗ – зона, що не контактує з інструментом, утворюється тільки з середини ОД. Порівняння параметрів заготовки у позаконтактній зоні для заготовок з ПЗ (рис. 3.20, 1) та без ПЗ (рис. 3.20, 2), дозволяє зробити висновок, що загальна причина більшого розширення при вальцюванні в овальних калібрах заготовок без ПЗ полягає у відсутності зони, яка перешкоджає переміщенню металу в поперечному напрямку.

Для подальшої оцінки впливу наявності ПЗ на розширення і розміри осередку деформування, були досліджені різноманітні поля параметрів, що визначають процес деформування заготовки в поперечному перерізі В-В (рис. 3.14), які знаходяться в іншій половині ОД, на відстані 15...20 мм від виходу з овальних калібрів.

На рис. 3.21...3.24, наведені залежності полів температури, швидкості і опору деформації, середньої напруги і роботи деформації, швидкості переміщення металу в поперечному напрямку і зміни координатної сітки (лагранжевих ліній) в залежності від кривизни овальних калібрів i . На рис. 3.25 наведені графіки залежності зміни у позаконтактній зоні температури, швидкості деформації, опору деформації, середньої напруги, швидкості переміщення металу в поперечному напрямку і роботи деформації від кривизни овальних калібрів i .

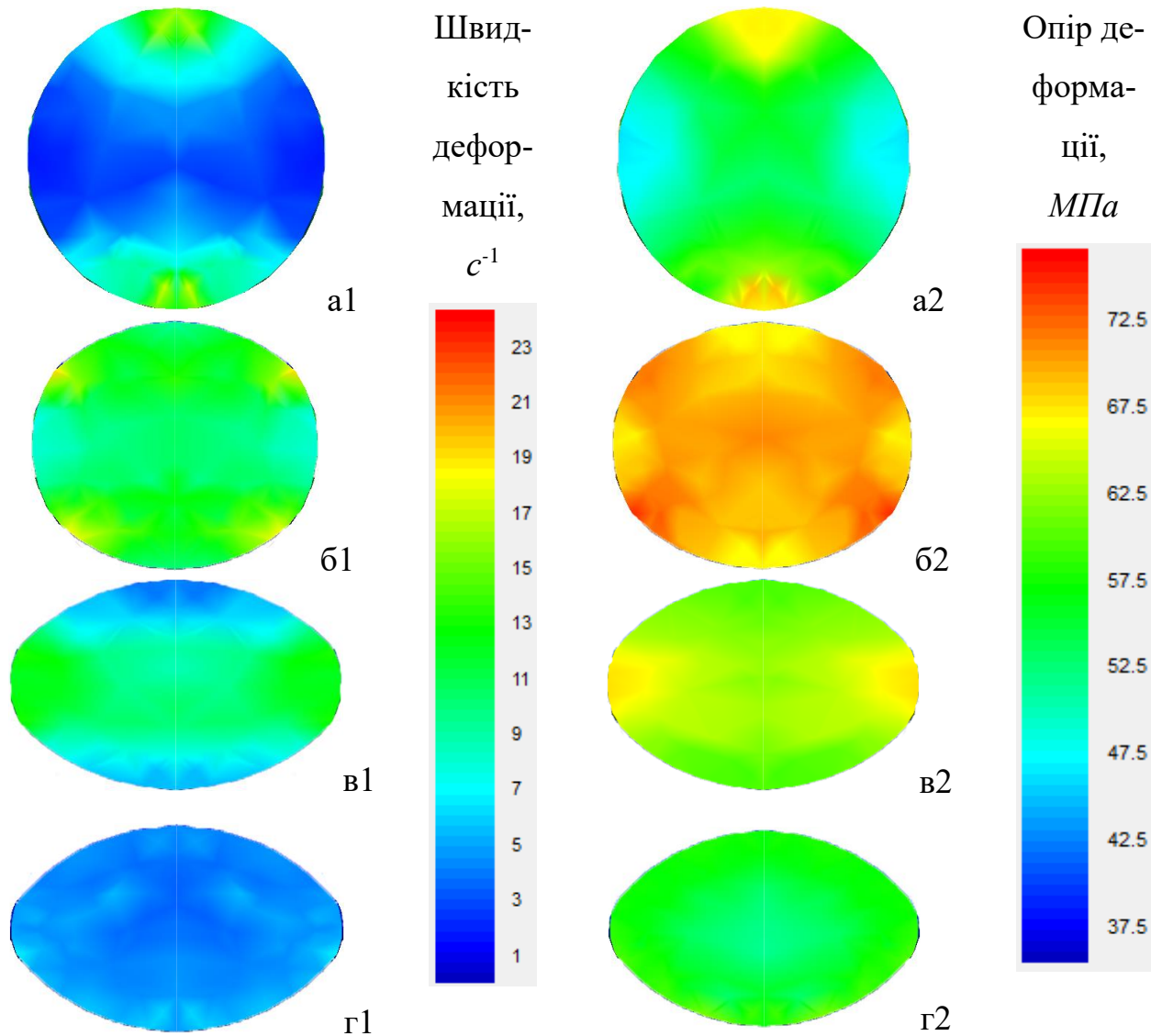


Рисунок 3.18 – Поля швидкості деформації (1) та опору деформації (2) в поперечних перерізах осередку деформації при вальцюванні циліндричних заготовок $\text{Ø}65$ мм з ПЗ при кривизні овальних калібрів $i = 1,35$: а – початок ОД (переріз А-А, рис. 3.17); б – $1/3$ ОД (переріз Б-Б, рис. 3.17); в – $2/3$ ОД (переріз В-В, рис. 3.17); г – кінець ОД (переріз Д-Д, рис. 3.17)

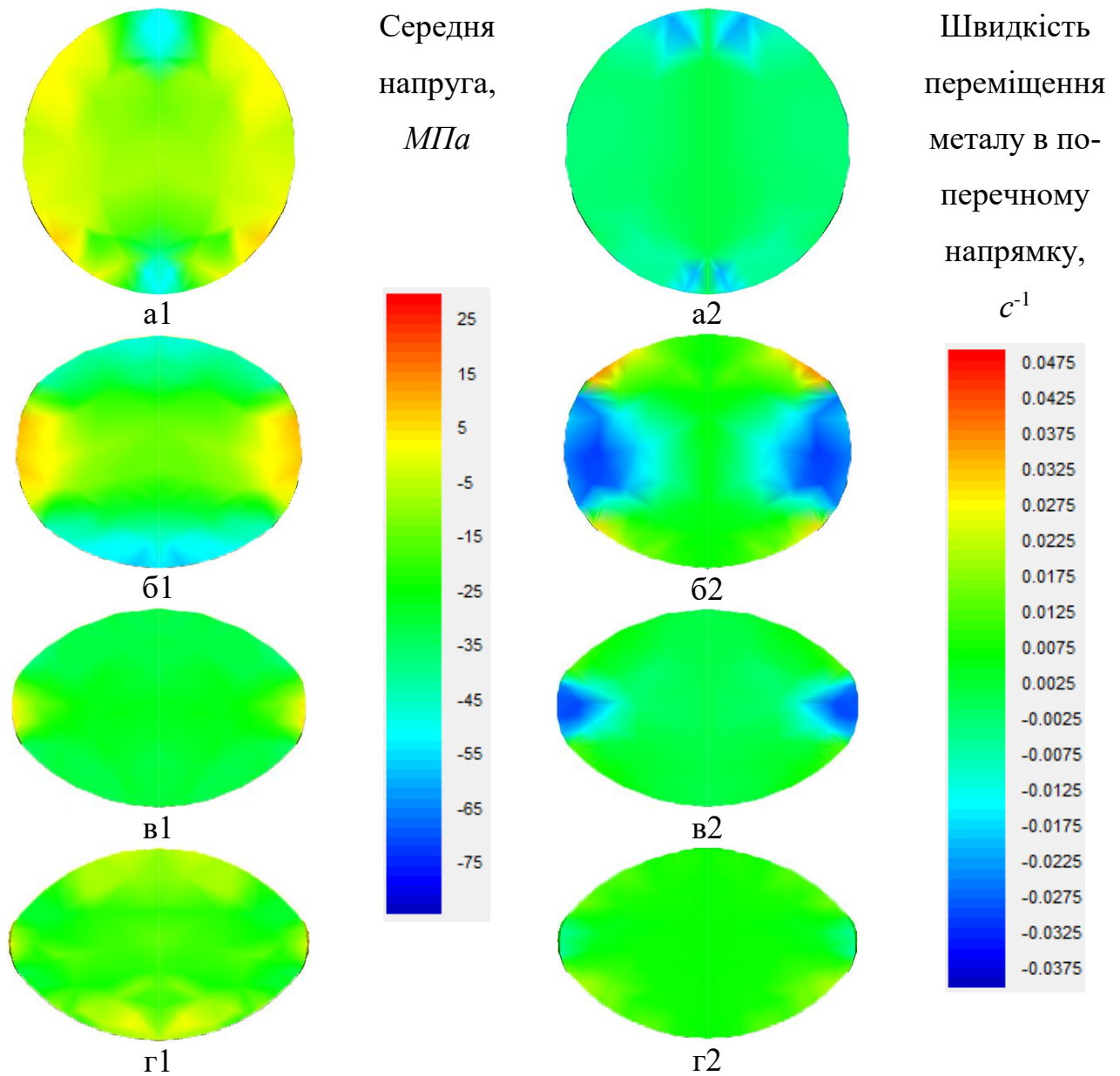


Рисунок 3.19 – Поля середньої напруги (1) і швидкості переміщення металу в поперечному напрямку (2) в поперечних перерізах осередку деформації при вальцюванні циліндричних заготовок $\varnothing 65$ мм з ПЗ при кривизні овальних калібрів $i = 1,35$: а – початок ОД (переріз А-А, рис. 3.17); б – 1/3 ОД (переріз Б-Б, рис. 3.17); в – 2/3 ОД (переріз В-В, рис. 3.17); г – кінець ОД (переріз Д-Д, рис. 3.17)

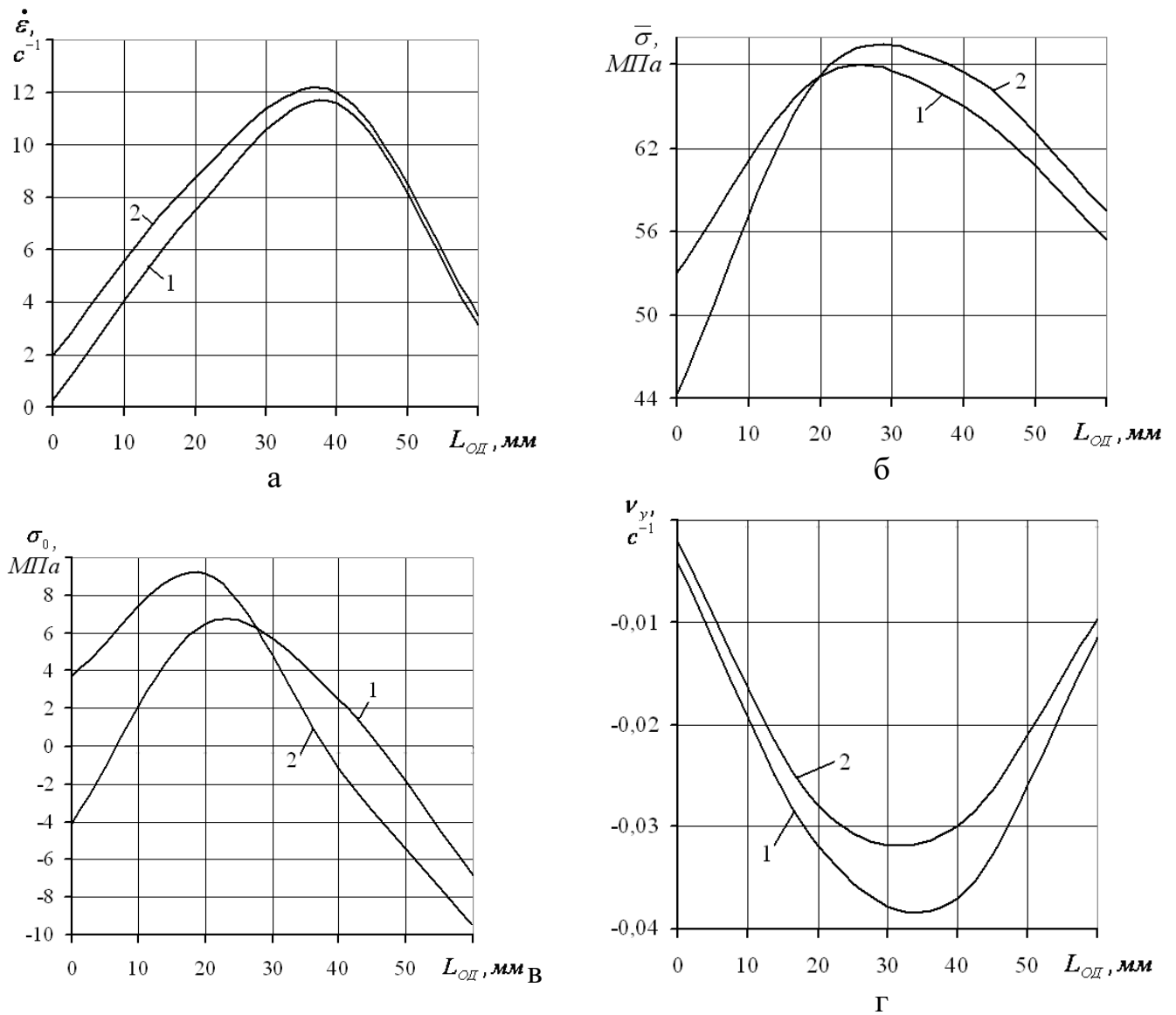


Рисунок 3.20 – Залежності розміру параметрів процесу вальцювання циліндричних заготовок з ПЗ (1) і без ПЗ (2) у позаконтактній зоні по довжині осередку деформування: а) швидкість деформації, б) опір деформації, в) середня напруга, г) швидкість течії металу в поперечному напрямку

Ознака розподілу інтенсивності деформації відповідає до зміни температури в поперечному перерізі за різної кривизни калібрів (рис. 3.21, 1). У місці, де інструмент контактує з заготовкою, спостерігається суттєве зниження температури за рахунок тепловіддачі від заготовки до інструменту. В цей час, температура також знижується і на вільній поверхні металу, що не контактує з інструментом. З іншого боку, зі зростанням кривизни калібрів, спостерігається суттєве збільшення температури заготовки – більш ніж на $20^{\circ}C$ (рис. 3.25, а). Під час вальцювання заготовок з

ПЗ за $i \leq 1,4$ у позаконтактній області спостерігається температура нижчою аніж в заготовках без ПЗ. Це обумовлено меншою інтенсивністю деформацій у позаконтактних зонах та показує, що позаконтактна область остаточно формується тільки при $i \approx 1,4$. Після досягнення коефіцієнта витягування 1,4, у заготовках, що на початку деформування не мали позаконтактних зон, остаточно формується ПЗ, у яких уповільнюється швидкість деформування та спостерігається температура нижча, за наявну в заготовках з позаконтактними зонами (рис. 3.25, а).

Аналіз полів, що визначають процес вальцювання показує, що наявність в заготовках позаконтактних зон найкраще визначати за полями швидкості та опору деформації, середньої напруги, а також швидкості переміщення металу в поперечному напрямку (швидкості по осі Y) (рис 3.23, 3.22).

Залежності (рис. 3.25) пояснюють поведінку коефіцієнту впливу ПЗ (рис. 3.11). В процесі утворення ділянки з позаконтактною зоною в заготовках без ПЗ – швидкість деформації разом з формуванням позаконтактної зони, стає суттєво нижчою в порівнянні зі швидкістю деформації в заготовці, у якій з самого початку деформування була ПЗ (рис. 2.25 б, е). При $i \approx 1,25$, в заготовках з ПЗ та без ПЗ спостерігається однаковий опір деформації, який при подальшому збільшенні кривизни калібру швидше зменшується у заготовок без ПЗ (рис. 2.25, в).

За невеликих деформацій в заготовці з ПЗ, у позаконтактній зоні – зростає напруга стиснення, проте в заготовках без ПЗ при формуванні зони – зростає розтягуюча напруга (рис. 3.25, г). В цей час, в заготовках без ПЗ з'являється ділянка з ПЗ, яка деформується значно повільніше в порівнянні з тими заготовками, в яких позаконтактні зони були в наявності з самого початку деформування (рис. 3.25, б, е). При $i \approx 1,25$, різниця в нарузі досягає максимуму (рис. 3.25, г), при цьому як в заготовках з ПЗ так і без ПЗ – спостерігається однаковий опір деформації, який за рахунок відсутності ПЗ, в подальшому з ростом деформації, інтенсивніше знижується у заготовок без ПЗ (рис. 3.25, в). Для кривизни калібру $i > 1,25$, в заготовці без ПЗ – у позаконтактних зонах напруги також стають стискаючими, що говорить про закінчення процесу формування ПЗ. По досягненню $i \approx 1,65 \dots 2,0$ – розмір та вплив позаконтактних зон в заготовках стає однаковим для обох типів заготовок.

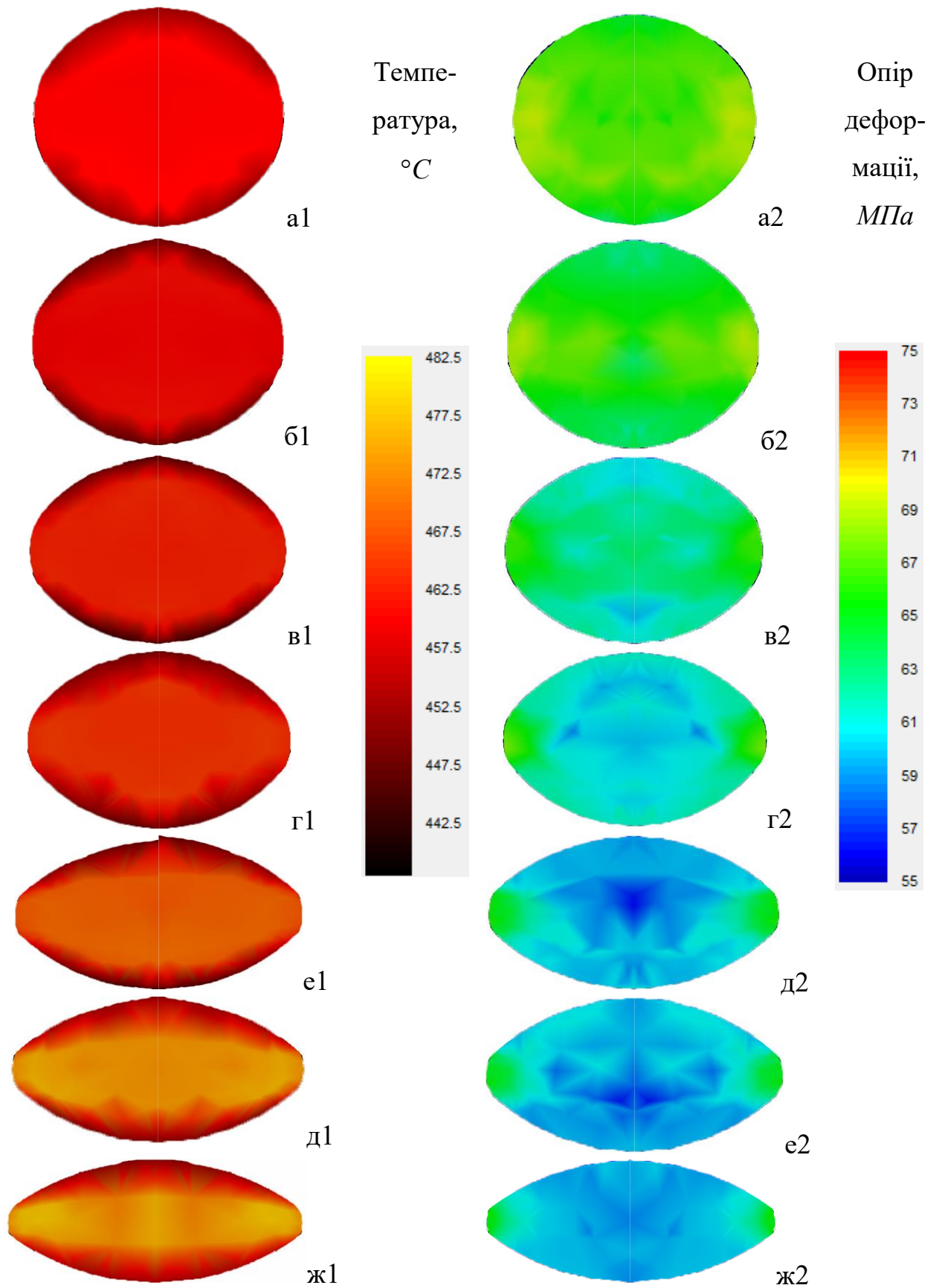


Рисунок 3.21 – Поля температури (1) та опору деформуванню (2) в поперечних перерізах другої половини осередку деформування при вальцюванні циліндричних заготовок $\varnothing 65$ мм з ПЗ (1) і без ПЗ (2) при кривизні овальних калібрів i : а – 1,08; б – 1,16; в – 1,23; г – 1,35; д – 1,52; е – 1,65; ж – 2,01.

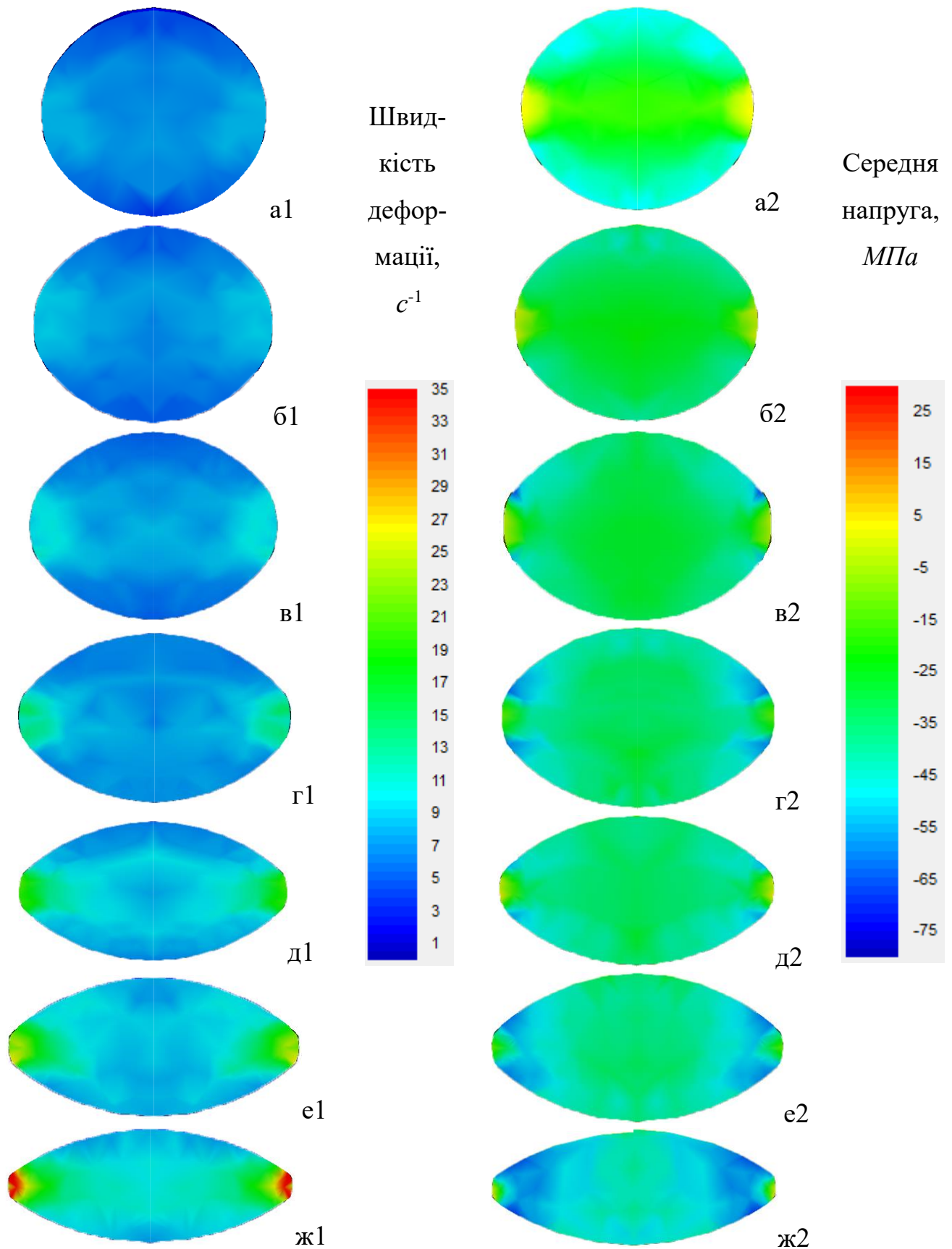


Рисунок 3.22 – Швидкість деформації (1) та середня напруга (2) в поперечних перерізах другої половини осередку деформування при вальцюванні циліндричних заготовок $\varnothing 65$ мм з ПЗ при кривизні овальних калібрів i :

а – 1,08; б – 1,16; в – 1,23; г – 1,35; д – 1,52; е – 1,65; ж – 2,01.

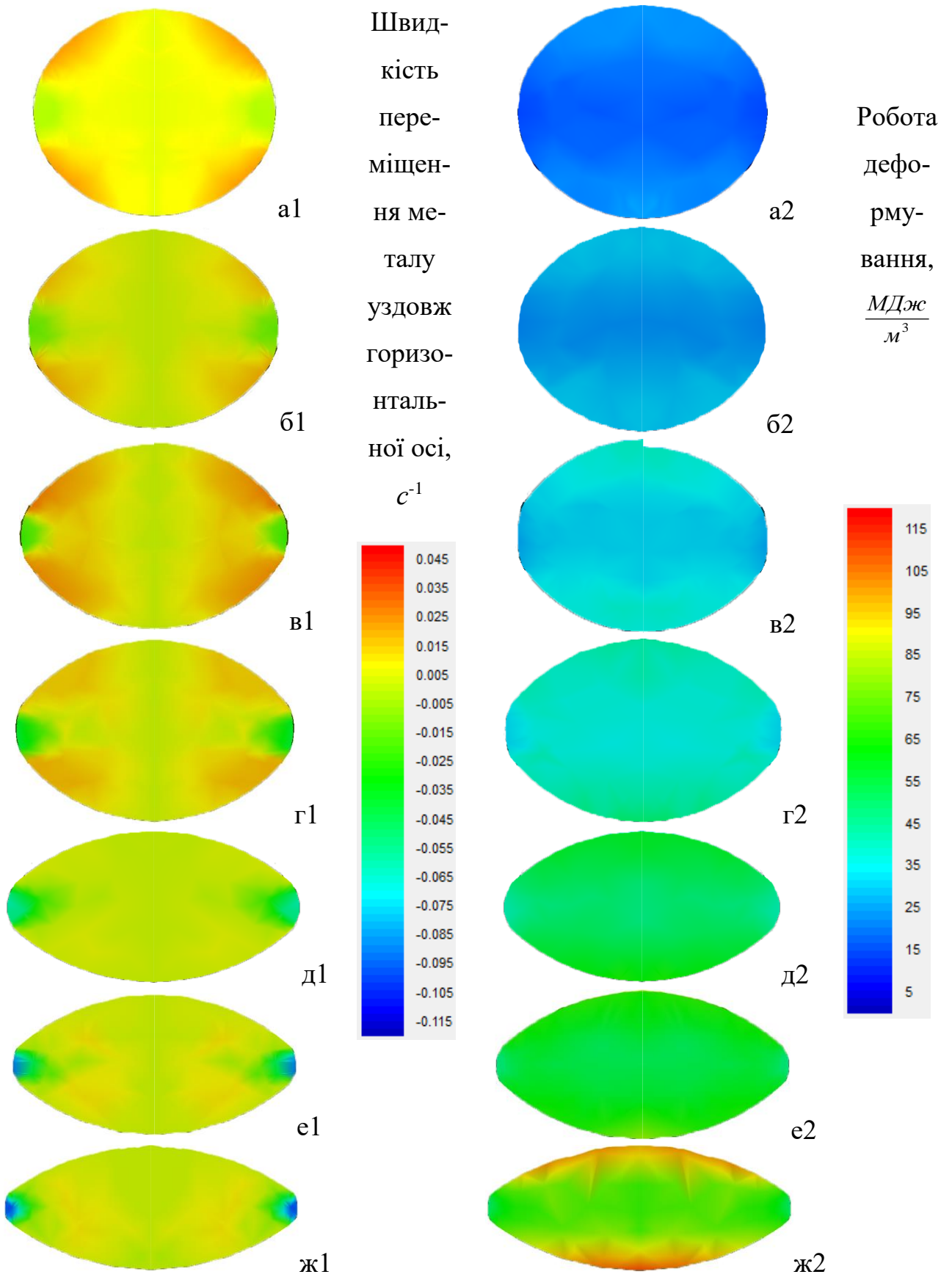


Рисунок 3.23 – Швидкість переміщення металу уздовж горизонтальної осі (1) і робота деформування (2) в поперечних перерізах другої половини осередку дефор-

мування при вальцюванні циліндричних заготовок $\text{Ø}65$ мм з ПЗ при кривизні овальних калібрів i : а – 1,08; б – 1,16; в – 1,23; г – 1,35; д – 1,52; е – 1,65; ж – 2,01.

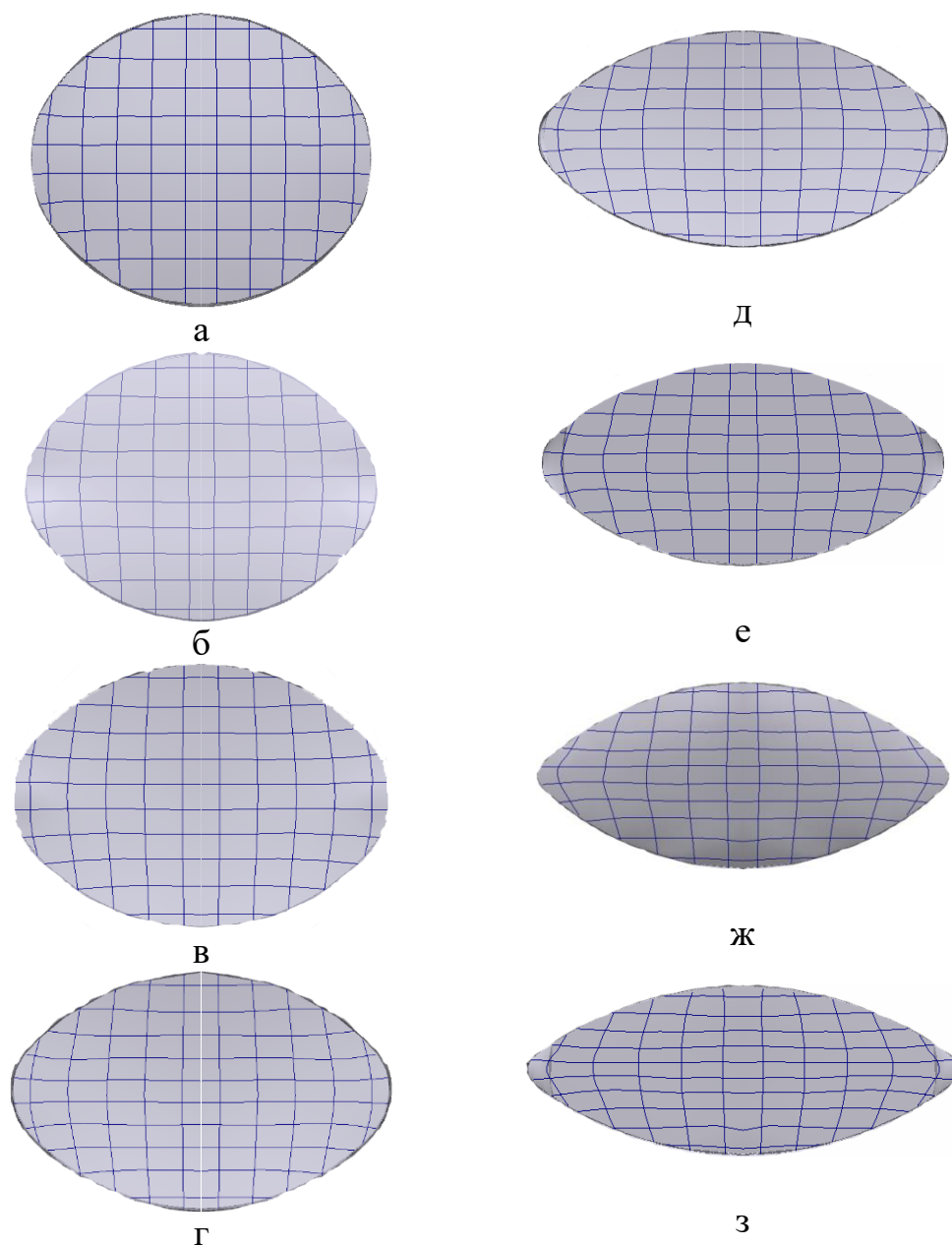


Рисунок 3.24 – Деформація координатної сітки (лагранжевих ліній) в поперечних перерізах кінця осередку деформування при вальцюванні циліндричних заготовок $\text{Ø}65$ мм з ПЗ при кривизні овальних калібрів i :

а – 1,08; б – 1,16; в – 1,23; г – 1,35; д – 1,52; е – 1,65; ж – 2,01.

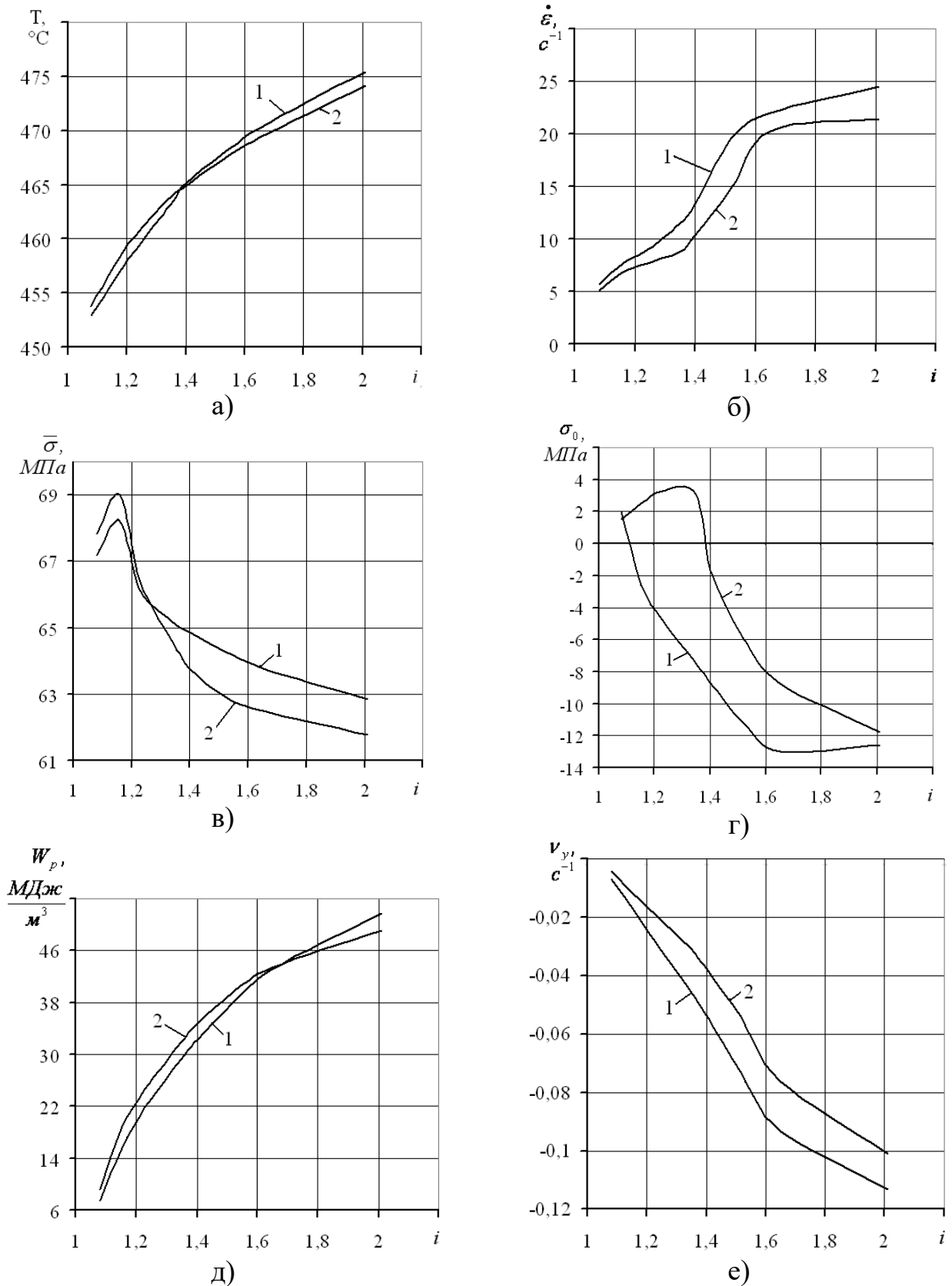


Рисунок 3.25 – Залежності розміру параметрів процесу вальцювання циліндричних заготовок з ПЗ (1) та без ПЗ (2) у позаконтактній зоні в середині довжини осередку деформування: а) температура; б) швидкість деформації, в) опір деформації, г) середня напруга, д) робота деформування, е) швидкість в поперечному напрямку

Якісна оцінка градієнту нерівномірності ступеня деформації виконувалась через використання коефіцієнту відносної нерівномірності [170]:

$$K_H = \frac{\varepsilon_{i\max} - \varepsilon_{i\min}}{\varepsilon_{i\text{ср}}} \cdot 100\% , \quad (3.7)$$

де $\varepsilon_{i\max}, \varepsilon_{i\min}, \varepsilon_{i\text{ср}}$ – максимальна та мінімальна та середня ступінь деформування у розрахунковому перерізі i заготовки, що була отримана за результатом математичного моделювання.

Відносне відхилення співвідношення коефіцієнтів відносної нерівномірності деформації $\delta_H = (K_H - K_H^{ПЗ} / K_H) \cdot 100\%$, де K_H та $K_H^{ПЗ}$ – коефіцієнти відносної нерівномірності градієнту деформації при розрахунках без та з урахуванням впливу ПЗ. Аналіз відхилення для випадків моделювання вальцювання заготовок $\varnothing 65$ мм розширення для яких було розраховано за удосконаленими формулами, показав зменшення градієнту нерівномірності на 25...50% в залежності від ступеня деформування порівняно з тим, що було розраховане за існуючою залежністю (рис. 3.26).

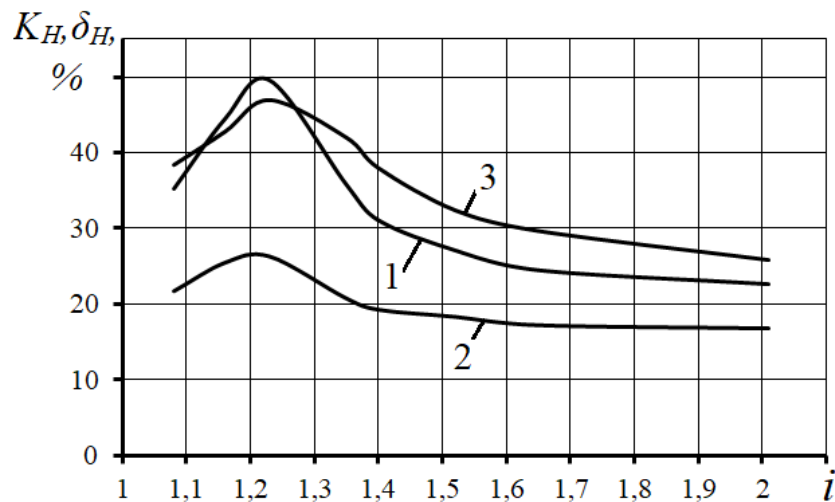


Рисунок 3.26 – Залежності коефіцієнту відносної нерівномірності градієнту деформації при вальцюванні циліндричних заготовок в овальних калібрах, що були розраховані за традиційними залежностями (1) та за удосконаленими залежностями (2), а також відносного відхилення їх співвідношення (3)

3.2 Дослідження раціональних залежностей для визначення впливу умов вальцювання наближених до ізотермічних на розширення при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів

Результати моделювання впливу ступеня деформації та температури нагріву вальцювальних штампів на технологічні параметри процесу вальцювання, показали схожу поведінку температурного коефіцієнту розширення для всіх форм ПЗ при прокатуванні прямокутних заготовок в гладких валках, а також для всіх діаметрів циліндричних заготовок під час їх вальцювання в гладких валках і калібрах.

Пошук моделі для апроксимації, параметрів графіка залежності та визначення коефіцієнтів у формулах за методами нелінійного оцінювання, здійснюється з використанням програмного пакета для статистичної обробки даних Statistika [130]. Графіки залежностей визначалися за допомогою формули регресії, яка вже використовувалася в роботі (2.14) [135].

Розмір коефіцієнту кореляції Пірсона $r = 0,78...0,86$ за розрахунковими даними, що під час вальцювання прямокутних заготовок з різними формами ПЗ в гладких валках, говорить про сильний кореляційний зв'язок показників температурний коефіцієнт розширення для всіх типів заготовок (рис. 1.9), який та не залежить від форми позаконтактної зони [150]. Це дозволяє дані для всіх розмірів прямокутних заготовок об'єднати в загальну залежність температурного коефіцієнту розширення $K_{\text{пощ. гл.кр.}}^i$ від ступеня деформації (рис. 3.27):

$$K_{\text{пощ. гл.кр.}}^i = \sqrt{0,892453 \cdot \varepsilon^2 - 1,695 \cdot \varepsilon + 0,809485 + 0,945866 \cdot \varepsilon - 0,89859} \quad (3.8)$$

Для цієї моделі коефіцієнт детермінації дорівнює $R^2 = 0,752095$, що говорить про достатню статичну значущість розрахованої моделі.

При вальцюванні циліндричних заготовок в гладких валках, для отриманих даних з температурного коефіцієнту розширення для всіх діаметрів (рис. 2.10), коефіцієнт кореляції Пірсона $r = 0,980915...0,994768$. Залежність узагальненого температурного коефіцієнту розширення $K_{\text{пощ. гл.кр.}}^i$ від ступеня деформації (рис. 3.28), для

всіх діаметрів циліндричних заготовок апроксимується в наступну модель з найвищим рівнем значущості за коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,987269$:

$$K_{\text{пош. гл.кр.}}^i = \sqrt{0,409533 \cdot \varepsilon^2 + 0,861813 \cdot \varepsilon + 0,561892} - 0,5574 \cdot \varepsilon - 0,74744 \quad (3.9)$$

Під час вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах (рис. 2.16), побудова точок для обрахунку температурного коефіцієнту розширення за відповідними ступенями деформації, показала високу ступінь кореляції Пірсона для значень коефіцієнта: $r = 0,970930461 \dots 0,991746147$. На цій підставі, був побудований узагальнюючий графік залежності для всіх діаметрів циліндричних заготовок, які були досліджені (рис. 3.29), адекватність якого підтвердилась високим коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,974997621$:

$$K_{\text{пош. ов.}}^i = \sqrt{2,72374 \cdot \varepsilon^2 - 2,1479 \cdot \varepsilon + 0,424271} + 1,71577 \cdot \varepsilon - 0,65091 \quad (3.10)$$

Проведений аналіз зміни розміру розширення показав, що при деформації в умовах, наближених до ізотермічних – збільшується розмір температурного коефіцієнту розширення. Так, значення коефіцієнту, що були отримані при температурі нагріву вальцювальних штампів до $t_B = 350^\circ\text{C}$, з ростом ступеня деформації з 5 до 75%, збільшується на 70% для прямокутних заготовок (рис. 3.27) та на 85% для циліндричних заготовок (рис. 3.28).

Під час вальцювання заготовок в овальних калібрах, великого впливу на течію металу в осередку деформування надає існуюча нерівномірність деформації за шириною та висотою заготовки, що викликана кривизною овального калібру в поперечному перерізі. Тому, для процесу вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах, температурний коефіцієнт розширення збільшується на 80%, при збільшенні ступеню деформації з 5 до 35% (рис. 3.29), що відповідає кривизні овального калібру $i = 3 \dots 4$ для різних діаметрів заготовок.

Залежності для оцінки температурної неравномірності наведені на рис. 3.30.

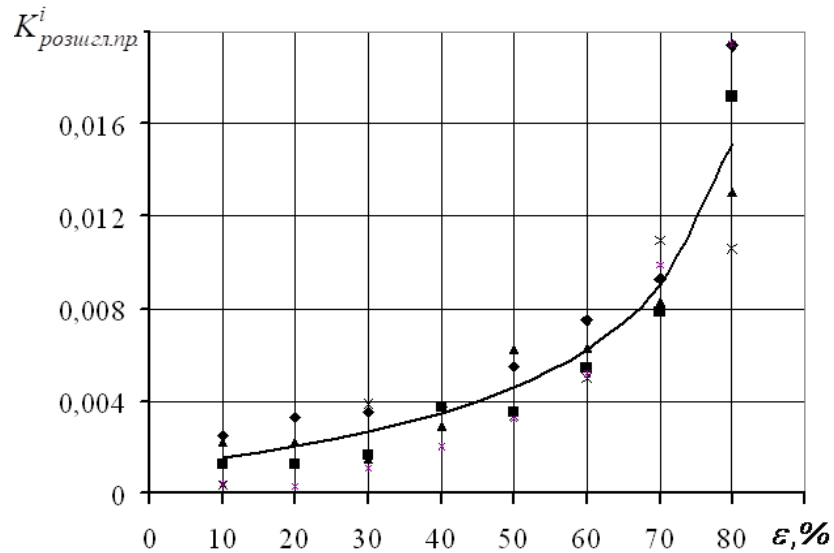


Рисунок 3.27 – Залежність температурного коефіцієнту розширення $K^i_{розшигл.пр.}$ від ступеня деформації при вальцюванні заготовок прямокутного перерізу з різною формою ПЗ (рис. 2.10) в гладких валках: ◆ - без ПЗ; ■ - прямокутна ПЗ; ▲ - трапецеїдальна ПЗ; * - трикутна ПЗ

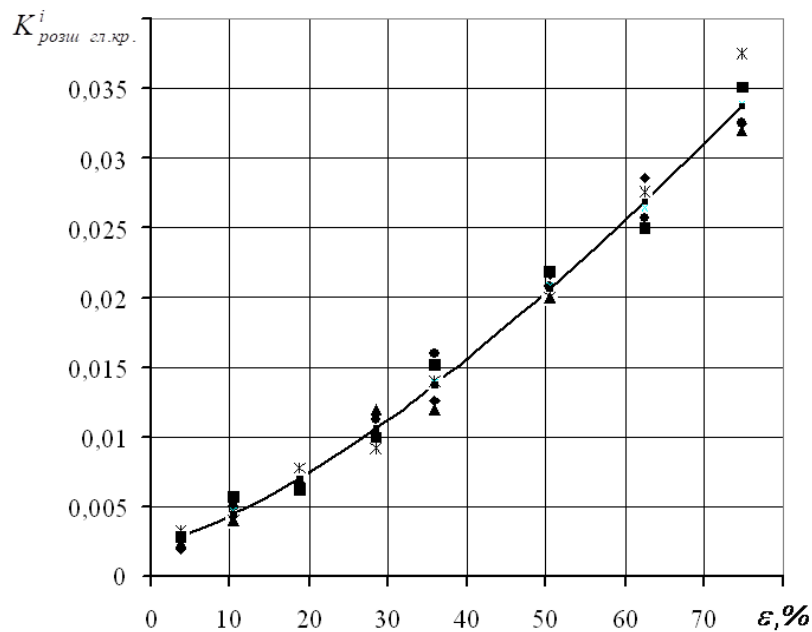


Рисунок 3.28 – Залежність температурного коефіцієнту розширення $K^i_{розшигл.кр.}$ від ступеня деформації і діаметра заготовки D_0 під час вальцювання заготовок круглого перерізу в гладких валках: ◆ - $D_0 = 20$ мм; ▲ - $D_0 = 50$ мм; * - $D_0 = 30$ мм; ■ - $D_0 = 40$ мм; ● - $D_0 = 50$ мм.

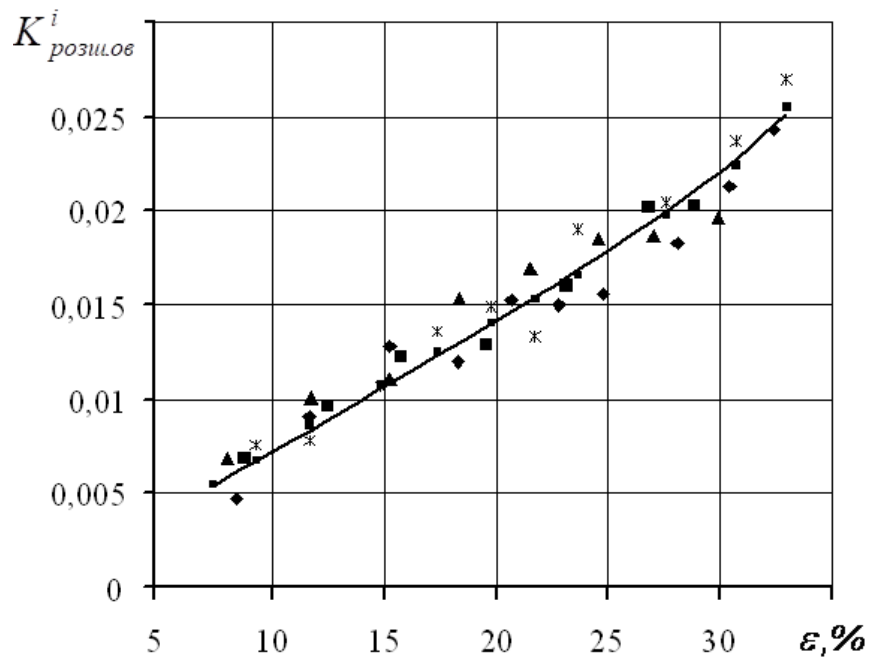


Рисунок 3.29 – Залежність температурного коефіцієнту розширення $K_{розш.ов}^i$ від ступеня деформації і діаметра заготовки D_0 під час вальцювання циліндричних заготовок в калібрах: * - $D_0 = 65$ мм; ♦ - $D_0 = 50$ мм; ▲ - $D_0 = 35$ мм; ■ - $D_0 = 25$ мм.

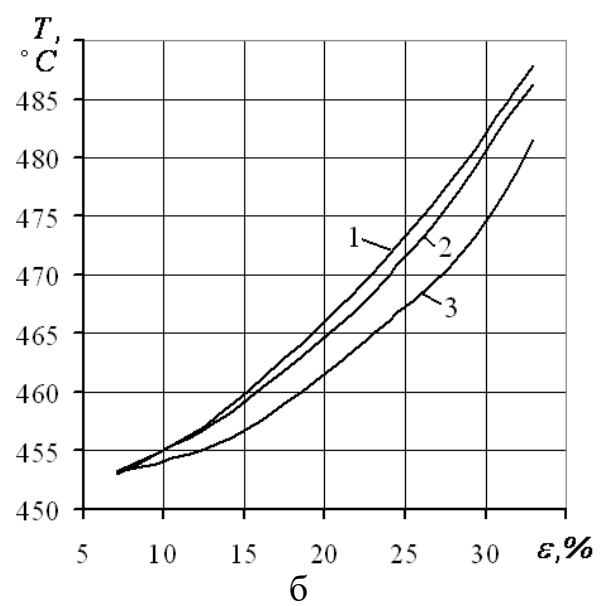
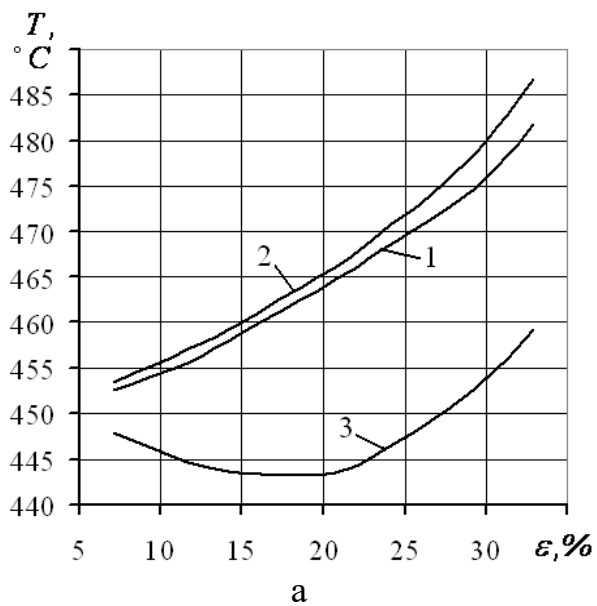


Рисунок 3.30 – Залежності температури заготовки в кінці осередку деформування під час вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах, в звичайних умовах (а) і в умовах наближених до ізотермічних (б): 1 - у позаконтактній зоні; 2 - в середині заготовки; 3 - в місці контакту заготовки з інструментом

Зменшення розміру розширення при вальцюванні в умовах деформування, наближених до ізотермічних, відбувається за рахунок збільшення осьових стискаючих напруг, спрямованих уздовж осередку деформації, більш повного протікання процесів знеміцнення та відсутності зон з ускладненим деформуванням. Це підтверджується порівняльним аналізом залежностей температури заготовки в кінці осередку деформування від ступеня деформації при вальцюванні циліндричних заготовок в овальних калібрах (рис. 3.30).

Під час вальцювання заготовок в вальцювальних секторах, що не були попередньо нагріті (а), температура заготовки в місці контакту з інструментом (рис. 3.30, а, 3) є значно нижчою за температуру в осередку деформування (рис. 3.30, а, 1) та в середині заготовки (рис. 3.30, а, 2). При вальцюванні в умовах, наближених до ізотермічних – вирівнюється температура (рис. 3.30, б) та зменшуються напруги по всьому перерізу заготовки, а також зменшується градієнт нерівномірності деформації по всьому об'єму заготовки. Проте, температура заготовки у позаконтактних зонах все одно лишається вищою за температуру в місці контакту заготовки з інструментом, що свідчить про сприяння зменшенню розширення за рахунок вищої швидкості деформації у позаконтактних зонах.

3.3 Дослідження впливу форми і розмірів фактичного осередку деформування на технологічні параметри процесу вальцювання

3.3.1 Визначення залежностей розміру фактичного осередку деформування від форми позаконтактних зон при вальцюванні заготовок прямокутного перерізу в гладких валках

Проведення досліджень щодо впливу форми і розмірів позаконтактних зон, ступеня деформації та температур нагріву заготовок і вальцювальних штампів, на розміри фактичного осередку деформації та технологічні параметри вальцювання заготовок в гладких валках і калібрах різних систем, є актуальною задачею. Розрахункові розміри фактичного осередку деформування визначалися за розміром поля

швидкості деформації в програмі QForm3D [100] відповідно до методики, наведеної в пункті 2.2. Для дослідження використовувалися наступні параметри процесу [151]: заготовки, нагріті до температури 450 °С, прокочувалися в гладких валках Ø260 мм з частотою обертання 26 хв⁻¹; температура нагріву інструменту 20°С.

Площа фактичного меридіонального перерізу осередку деформування $F_{\phi, m}$ - стає найбільшою при $\varepsilon \approx 30\%$, після чого її розмір починає зменшуватися (рис. 3.31, а). Розмір площі геометричного меридіонального осередку деформації $F_{\phi, m}$ стабілізується після досягнення ступеня деформування 50%. Натомість, найбільший фактичний меридіональний ОД спостерігається у заготовок з прямокутною ПЗ. Аналіз площ фактичного ОД в горизонтальному перерізі (рис. 3.31, б), показує, що під час деформування заготовок з трапецеїдальними та прямокутними формами ПЗ – площа осередку деформування зростає до ступеня обтиснення 30...40%, після чого майже не збільшується. Для заготовок з трикутною формою ПЗ - осередок деформації досягає максимальних розмірів при $\varepsilon \approx 50\%$.

Розмір осередку деформування визначає ступінь рівномірності опрацювання обсягу металу заготовки до його потрапляння до геометричного осередку деформування, в якому відбувається загальна формозміна. Також розмір ОД впливає на ступінь протидії входу металу у валки і витікання з них, зниження або зростання зусиль деформування та поліпшення структури заготовок, що вальцюються.

Аналіз довжини осередку деформації (L_o) за різними ступенями деформування, (рис. 3.32, а), показує суттєву швидкість збільшення довжини фактичного осередку деформації для всіх форм позаконтактних зон до ступеня деформації 30%. Після досягнення $\varepsilon = 30\%$ – розмір ОД практично не змінюється. Відносини довжини фактичного і геометричного ОД L_f / L_e (рис. 3.32, б), при прокатуванні прямокутних заготовок в гладких валках, для різних форм ПЗ і ступенів деформації, знаходяться в проміжку 1,2...2,5.

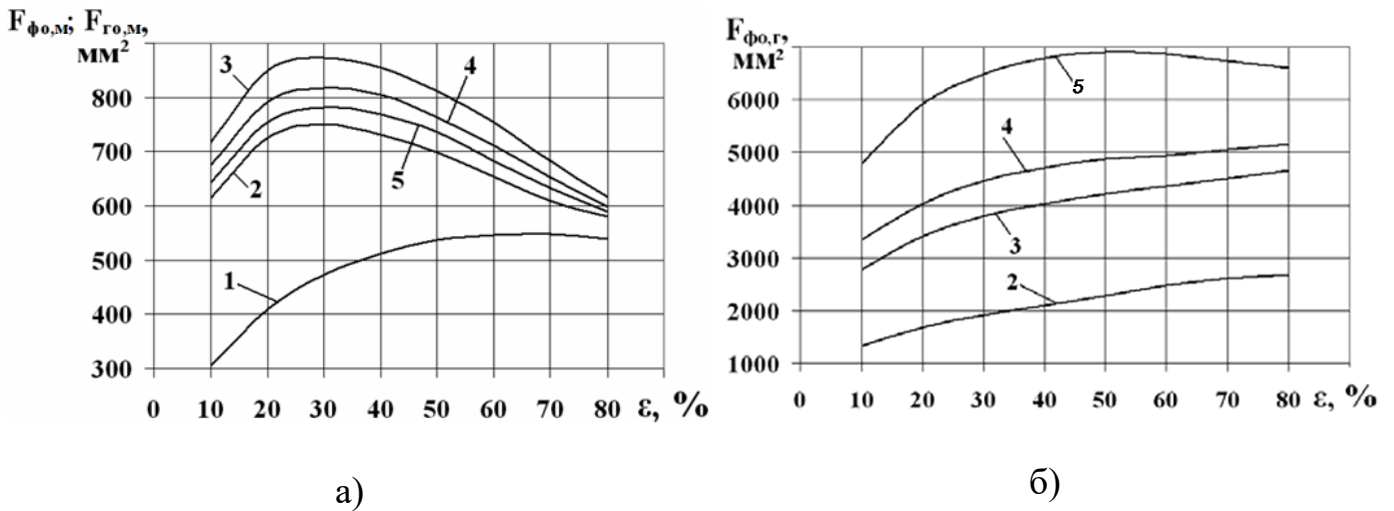


Рисунок 3.31 – Залежності площі перерізу осередку деформації в меридіональній $F_{\phi o, м}$ (а) та горизонтальній $F_{\phi o, г}$ (б) площинах від ступеня деформації при прокатуванні прямокутних заготовок у гладких валках: (1) геометричний ОД ($F_{z o, м}$); фактичний ОД: (2) без ПЗ, (3) прямокутна ПЗ, (4) трапецеїдальна ПЗ, (5) трикутна ПЗ

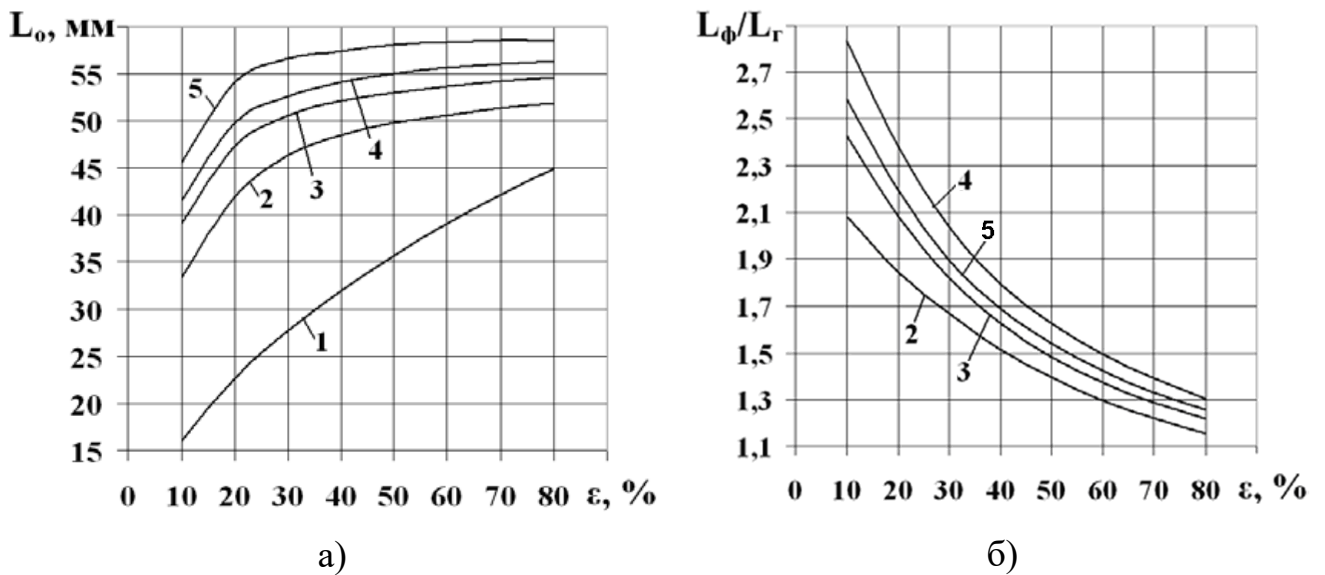


Рисунок 3.32 – Залежності довжини осередку деформації L_o від ступеня деформації (а) і відносин довжин фактичного і геометричного осередку деформації (б) при прокатуванні прямокутних заготовок в гладких валках: (1) геометричний ОД; фактичний ОД: (2) без ПЗ, 3) прямокутна ПЗ, 4) трапецеїдальна ПЗ, 5) трикутна ПЗ

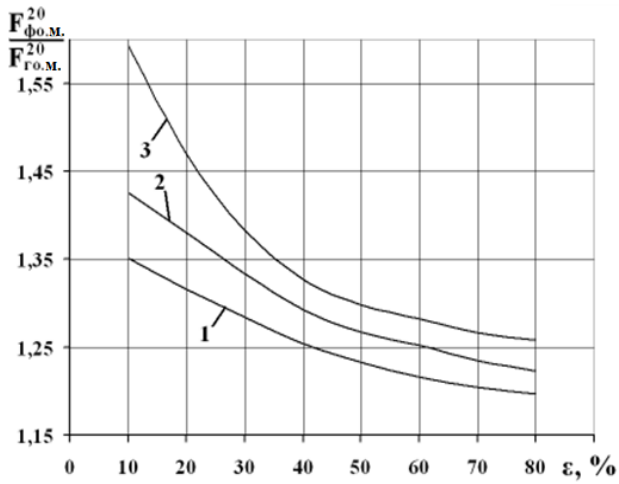
3.3.2 Визначення залежності раціональних технологічних параметрів при вальцюванні циліндричних заготовок в гладких валках від розмірів фактичного осередку деформування

Розміри ОД визначалися моделюванням прокатування заготовок з температурою 450°C та ступенями деформації $\varepsilon = 10...80\%$ в гладких валках $\varnothing 260$ мм, з температурою 20°C та частотою обертання 26 хв⁻¹. [151].

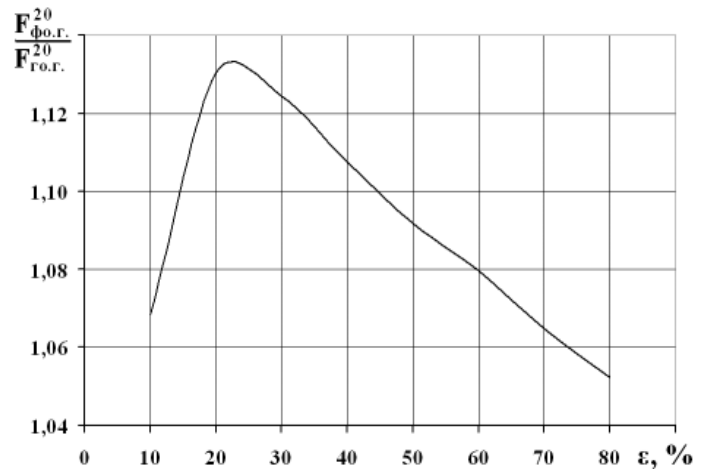
Аналіз відношення площ перерізів меридіонального геометричного і фактичного ОД $F_{\text{фо.м.}}^{20} / F_{\text{го.м.}}^{20}$ (рис. 3.33, а) показує поступове зменшення фактичної площі ОД з ростом ступеня обтиску. Збільшення відношення разом з ростом діаметра заготовки при однакових ступенях обтиску, говорить про зростання обсягу деформованого металу, який збільшує розміри фактичного ОД.

Відношення площ горизонтального перерізу геометричного та фактичного ОД $F_{\text{фо.г.}}^{20} / F_{\text{го.г.}}^{20}$ (рис. 3.33, б) досягає максимального значення при ступені обтиску $\varepsilon \approx 23\%$. Це відбувається через те, що в заготовках починає утворюватися позаконтактна зона (рис. 3.8, 3.9), яка змушує метал інтенсивніше плинути в поздовжньому напрямку. За рахунок цього підвищується пластичність металу та викликається більш інтенсивна деформація в зовнішніх зонах на вході в осередок деформування. Так само, в заготовках спостерігається інтенсивніше збільшення довжини фактичного ОД ($L_{\text{ф}}^{\text{злкр.}}$) до $\varepsilon \approx 15\%$ (рис. 3.34, а), коли починається утворення бічних позаконтактних зон.

Аналіз рис. 3.34 показує що відносини площ меридіонального геометричного та фактичного осередків деформування становить 1,2...1,6, а відношення довжин становить 1,15...1,65. Менша величина відносин довжин та площ фактичного і геометричного ОД при прокатуванні циліндричних заготовок в порівнянні з прямокутними обумовлена меншими розмірами позаконтактної зони, а також порівняно невеликою контактної площею заготовки з інструментом при невеликих ступенях деформації.



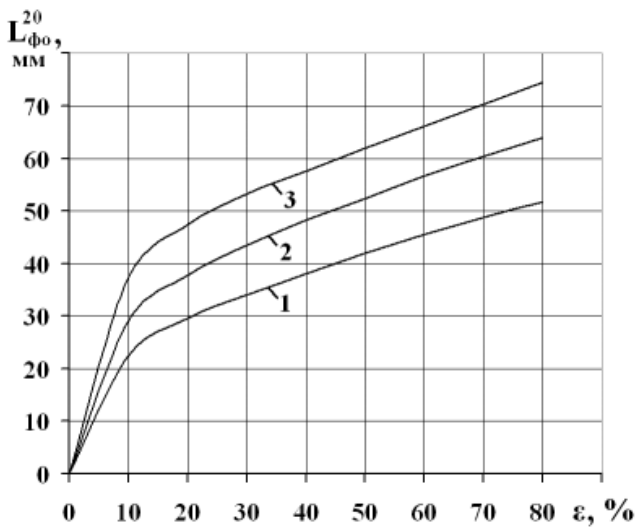
а)



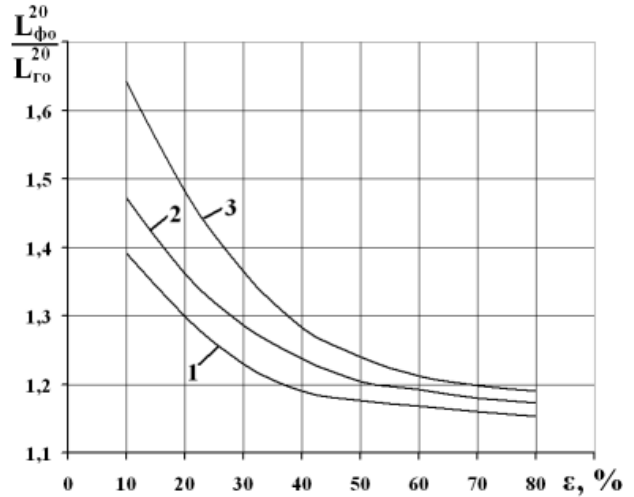
б)

Рисунок 3.33 – Відносини площ меридіонального а) і горизонтального б) перерізів геометричного і фактичного осередку деформації від ступеня деформації при прокатуванні циліндричних заготовок в гладких валках.

Діаметр заготовок: (1) 20мм, (2) 30мм, (3) 40мм



а)



б)

Рисунок 3.34 – Залежності довжини фактичного ОД $L_{\phi}^{2.л.кр.}$ (а) та відносини довжин фактичного і геометричного ОД $L_{\phi}^{2.л.кр.} / L_{г}^{2.л.кр.}$ (б) від ступеня деформації при прокатуванні циліндричних заготовок в гладких валках.

Діаметр заготовок: (1) 20мм, (2) 30мм, (3) 40мм.

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

Дослідження впливу температур нагріву заготовок та вальцювальних штампів на фактичний осередок деформування при вальцюванні заготовок в умовах ізометричного і наближених до нього деформування, дає інформацію для оптимізації параметрів процесу вальцювання та зниження зусиль деформування.

Для завдання в процесі моделювання ізотермічних умов [152], при розрахунку фактичного ОД в меридіональному і горизонтальному перерізах ($F_{\text{фо.м.}}^{350}$ и $F_{\text{фо.г.}}^{350}$), до QForm3D надавалися наступні дані: температура нагріву гладких валків 350°C, циліндричних заготовок Ø 20, 30 та 40 мм – 450°C. Розміри фактичного ОД заготовок, що були прокатані в умовах ізотермічного деформування, порівнювалися з даними замірів фактичного ОД при прокатуванні заготовок в валках, що мають температуру 20°C ($F_{\text{фо.м.}}^{20}$ и $F_{\text{фо.г.}}^{20}$) [153].

Розміри фактичного ОД в меридіональній площині в звичайних ($F_{\text{фо.м.}}^{20}$) та в ізотермічних умовах ($F_{\text{фо.м.}}^{350}$) - інтенсивно збільшуються (рис. 3.35, а) зі зростанням ступеня деформації до $\varepsilon \approx 15\%$ та досягають максимального розміру при обтисненні 30...40%. Ізотермічні умови деформування збільшують площу осередку деформування на 8...12%, в порівнянні з прокатуванням традиційних умовах.

Порівняння площ фактичного ОД в горизонтальній площині ($F_{\text{фо.г.}}^{350}$ и $F_{\text{фо.г.}}^{20}$), також свідчить про інтенсивне зростання площ ОД до ступеня обтиснення 15%, після чого інтенсивність росту розміру площ осередку деформування сповільнюється (рис. 3.35, б).

Відносини площ фактичного ОД в валках, що мають температуру 20°C та в умовах ізотермічного деформування залишаються однаковими за будь-яких діаметрів заготовок (рис. 3.36).

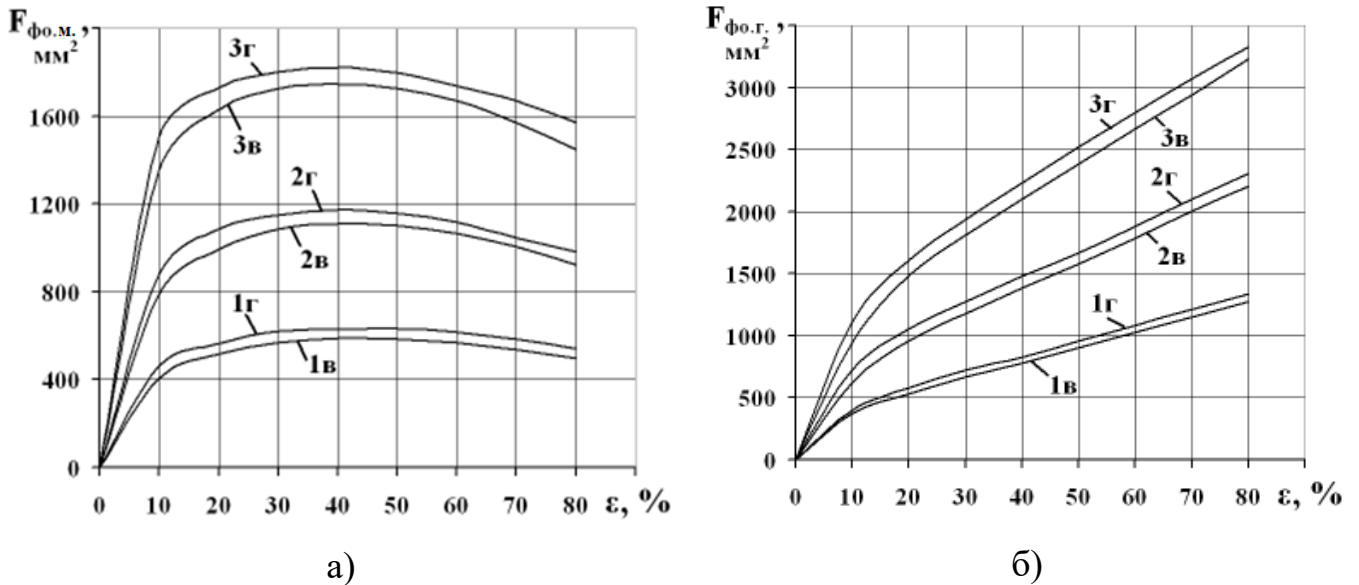


Рисунок 3.35 Площі фактичного ОД в меридіональній (а) та горизонтальній (б) площинах при прокатуванні в валках, що мають температуру 20°C (в) і в умовах ізотермічного і наближених до нього деформування (г) від ступеня деформації при прокатуванні циліндричних заготовок в гладких валках.

Діаметр заготовок: 1) 20мм, 2) 30мм, 3) 40мм

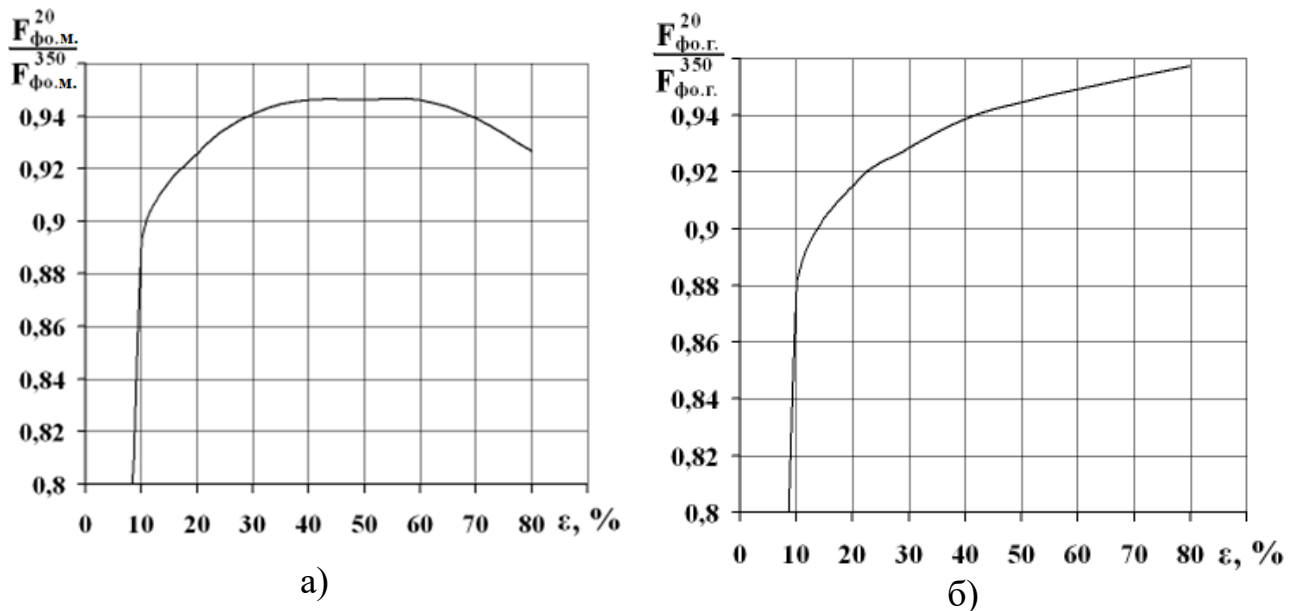


Рисунок 3.36 – Залежності відносини площ фактичного осередку деформування в меридіональній (а) та горизонтальній (б) площині, в валках, що мають температуру 20°C та в умовах ізотермічного деформування від ступеня обтиснення при прокатуванні циліндричних заготовок в гладких валках

Ізотермічні умови деформування здійснюють суттєвий вплив на осередок деформування в меридіональній ($F_{\text{фо.м.}}^{20} / F_{\text{фо.м.}}^{350}$) та горизонтальній площині ($F_{\text{фо.г.}}^{20} / F_{\text{фо.г.}}^{350}$) до $\varepsilon \approx 10\%$. У проміжку $\varepsilon = 20 \dots 40\%$, в зв'язку з початком утворення позаконтактних зон, вплив ізотермічних умов знижується від 12 до 4% та його можна не враховувати.

Висновки за розділом 3

За результатами теоретичних досліджень впливу позаконтактних зон на розширення при прокатуванні прямокутних заготовок в гладких валках з різним розміром ПЗ прямокутного, трапецеїдального і трикутного перерізів, визначено їхній вплив на розширення та пояснена наявність у позаконтактних зонах явища негативного розширення.

На підставі теоретичних досліджень вальцювання циліндричних заготовок в гладких валках виявлено, що до ступеня деформації 43% наявність позаконтактних зон знижує рівномірність напружено-деформованого стану в осередку деформування, та ускладнює течію металу в поперечному напрямку. Аналіз зміни полів температур, швидкості та опору деформації по перерізу заготовок при збільшенні ступеня деформації від 40 до 70%, показав процес утворення позаконтактних зон в заготовках без ПЗ, які викликають появу поперечних сил зчеплення, що гальмують поздовжню деформацію і сприяють поперечному витягуванню.

За даними комп'ютерного моделювання процесу вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах та їх обробці в програмі було описано модель та отримана формула залежності для розрахунку коефіцієнту впливу ПЗ на розширення, який становить 10...60% від розміру загального коефіцієнту нерівномірності деформації за коефіцієнтом витягування $1,25 \leq \lambda \leq 1,8$. Удосконалена залежність для розрахунку розширення з урахуванням поправного коефіцієнту, що враховує вплив геометричних розмірів ПЗ та співвідношення розмірів калібру і заготовки на процес вальцювання. При збільшенні кривизни калібру і діаметру заготовок виявлено нелінійне зростання розміру розширення. Зі зростанням співвідношення геометричних

форм калібру і заготовки (i) з 1,2 до 2, спостерігається для заготовок без ПЗ зменшення швидкості (на $2...3 \text{ c}^{-1}$) та опору деформації (на 1,5 МПа) та середньої напруги (на 4...6 МПа).

Як наслідок дослідження даних з моделювання та нелінійного аналізу, розроблено формули для отримання значень температурного коефіцієнту розширення при вальцюванні прямокутних і циліндричних заготовок з алюмінієвих сплавів в гладких валках і овальних калібрах, в рекомендованому інтервалі температур нагріву вальцювальних штампів $250...350^\circ\text{C}$ та підтверджено їх адекватність за коефіцієнтом детермінації ($r = 0,75...0,98$). Визначено, що за використанням під час вальцювання умов наближених до ізотермічних - відбувається вирівнювання напружено-деформованого стану по всьому об'єму заготовки, збільшення розмірів фактичного осередку деформування на 8...12%, а відповідно підвищення пластичності в зоні деформованого металу та поліпшення умов протікання процесу вальцювання .

При прокатуванні прямокутних та циліндричних заготовок різної форми в гладких валках найбільші розміри осередку деформування, а відповідно і найбільш раціональні умови деформування – спостерігається при ступенях деформації $\varepsilon = 20...40\%$. Теоретичні дослідження впливу форми позаконтактних зон на розміри фактичного осередку деформування при прокатуванні циліндричних заготовок в гладких валках виявило що в заготовках з ПЗ, до ступені обтиску 23% відсутня позаконтактна зона, це говорить про найкращі умови деформування саме в цьому проміжку. Визначено, що для різних форм позаконтактних зон і ступенів деформації, розміри фактичного ОД перевищують геометричний ОД в 1,2...2,5 рази.

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

Експериментальні дослідження виконувалися для підтвердження вірності визначення раціональних геометричних параметрів вальцювання з урахуванням впливу позаконтактних зон та геометричних параметрів підготовчих ривчаків, в процесі виготовлення різних типів заготовок, що вальцюються та штамповок. На виробництві, під час вальцювання на кувальних вальцях, найбільш часто зустрічаються типові представники заготовок під штампування та відповідні їм штамповані поковки (рис. 4.1). Класифікація була розроблена за конфігурацією штампованих поковок та технологічними можливостями з отримання заготовок на кувальних вальцях (підготовча операція, яка використовується для перерозподілу металу заготовки, що отримується) [3].

Дослідження були включені в загальний цикл ковальського виробництва авіаційного заводу ДП КиАЗ «Авіант» та виконувалися в контексті реально існуючих технологій виготовлення партій деталей кількістю від 25 до 30 штук для виробу АН148. Для дослідного виготовлення, використовувалися заготовки зі сплавів АК6, АК4-1 та АК8 розмірами $\varnothing 35$ та 65 мм та довжиною 100...150 мм. Розрахунок поперечних розмірів ривчака овального калібру та заготовки, що отримують в ньому, виконувався за залежностями, які надані у розділі 3.1.3. Обчислення розмірів здійснювалось за допомогою ПМК САПР ТП вальцювання [154]. За результатами розрахунків, інструмент для деформування було обрано з існуючих вальцювальних секторів та виконано корегування геометрії їх ривчака за допомогою переточки на верстаті з числовим програмним управлінням (рис. 4.2).

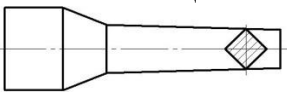
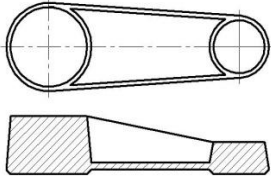
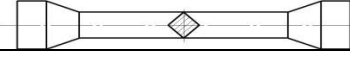
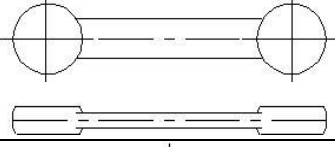
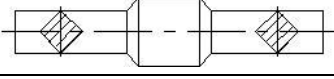
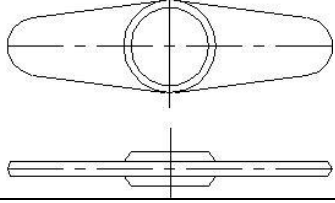
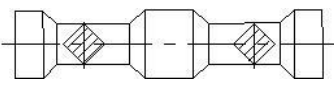
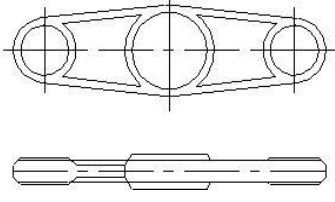
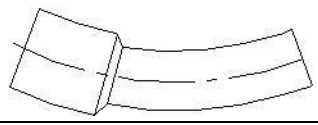
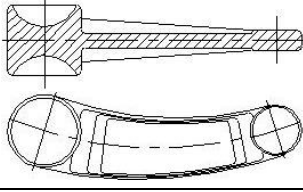
Група	Вальцювальна заготовка	Визначні штампування
I	Заготовки з одним потовщенням на кінці 	
II	Заготовки з двома потовщеннями на кінцях 	
III	Заготовки з одним потовщенням посередині 	
IV	Заготовки з трьома потовщеннями 	
V	Заготовки з криволінійною віссю 	

Рисунок 4.1 – Класифікація типових представників заготовок, що вальцюються під штампування на кувальних вальцях

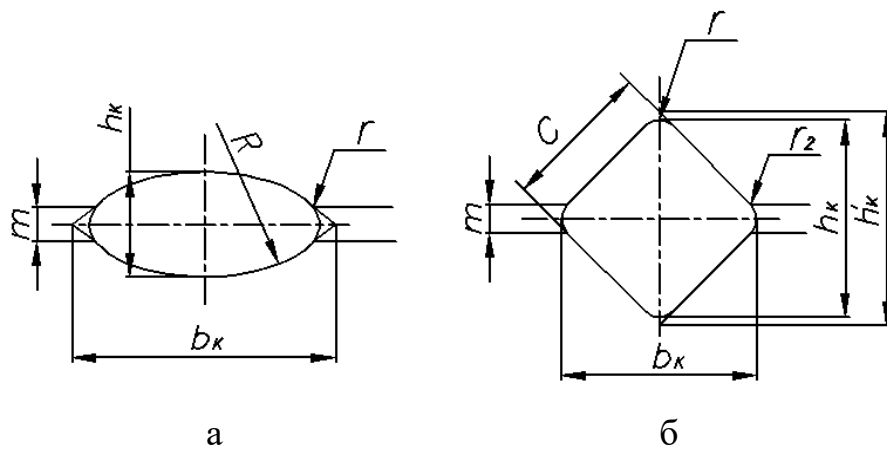


Рисунок 4.2 – Основні параметри калібрів для вальцювання заготовок: овальний (а) та квадратний (б)

Заготовки нагрівалися в камерній печі електроопору з витримкою 35 хв. після підвищення температури в печі до 470°C. Мінімальний час нагріву алюмінієвих заготовок під вальцювання та штампування розраховується як 1 мм максимального перерізу за 1 хвилину. Перед експериментальними дослідженнями здійснювалось градування автоматичного потенціометру печі. Зниження температури зразка під час перенесення від печі до стану, компенсували з його нагріванням до 10°C вище за температуру вальцювання. Температура нагріву штампів та вальцювальних секторів для проведення операцій з деформування алюмінієвих сплавів контролювалась за хромель-алюмелевою термопарою та перебувала в рекомендованих межах 150...250°C.

Вальцювання виконувалось на консольних кувальних вальцях моделі С162А (табл. 4.1) [155]. Заготовки нагрівалися в камерній печі електроопору до температури 450°C [156]. Вимірювання лінійних розмірів заготовок, що вальцювались здійснювалось: лінійкою, радісних шаблонами, штангенциркулем і штангенрейсмусом (похибка вимірювання $\pm 0,05$ мм).

Таблиця 4.1 – Технічне визначення кувальних вальців С162А

Номінальна міжосьова відстань, мм	320	Діаметр вхідної заготовки, не більше, мм	95
Номінальне зусилля, кН	500	Маса вальців, кг	8200
Частота обертів валка, об/хв.	65	Висота вальців над рівнем підлоги, мм	2130
Посадочні місця під інструмент, мм		Габаритні розміри вальців, мм:	
- діаметр	180	- довжина	2590
- довжина	280	- ширина	1930

Штамування деталей здійснювалось на кривошипному горячештампувальному пресі (КГШП) зусиллям 1000 т.с. Для уникнення грубозернистої структури, що спричиняє процеси рекристалізації, штампування алюмінієвих заготовок виконувалось зі ступенем деформування 15...20% за один нагрів з подальшим візуальним контролем якості виробу [157]. Термообробка деталей відбувалась за інструкцією

ВІАМ: гартування при температурі 500°C , охолодження в воді до 250°C протягом 50 хв.; старіння на повітрі за $160\dots175^{\circ}\text{C}$ протягом 3,5...4 годин.

4.2 Визначення методу прогнозування дефектів при виготовленні поковок з алюмінієвих сплавів з попереднім вальцюванням та штампуванням у підготовчому рівчаку

Зазвичай, в штампуваннях, отриманих після операцій вальцювання, утворюються різні типи дефектів, які з'являються внаслідок помилково організованих потоків металу при штампуванні [158]. Покращення умов протікання маловідходного процесу можливо через розробку методики прогнозування появи дефектів при штампуванні поковок із застосуванням процесу вальцювання і підготовчих рівчаків, яка необхідної для визначення шляхів щодо поліпшення пластичності та зниження зусиль деформування.

Наразі, побудова підготовчих рівчаків відбувається за технологічними рекомендаціями [1], що були розроблені з великим запасом та в більшості випадків – викликають перевитрату металу. Однак, порушення технологічного процесу штампування поковок та потрібних рекомендацій (табл. 4.2), може призвести до утворення різних дефектів (простріл, затиск, незаповнення кінцевого рівчака та ін.). Передбачити можливість появи дефектів можливо, змінюючи умови протікання процесу: значення температури штаму та заготовок, ступеня і швидкості деформування, радіусів переходів, товщини і висоти ребер, полотна та ін.

Роботи виконувалися за технічним завданням впровадження технології штампування поковок деталі «Фітинг» першої групи класифікатора (рис. 4.3), V групи складності з відкритими перерізами і тонкими ребрами [1], з метою визначення можливості появи дефектів на стадіях вальцювання (рис. 4.4) та заповнення гравюр при штампуванні, а також внесення змін в рекомендовані для побудови підготовчих рівчаків залежності [159] (табл. 4.2). Технологічний процес, включає вальцювання за системою круг-овал-ромб із загальним коефіцієнтом витягування 3,45 (овал – 2,1, ромб – 1,64), підготовчий, та остаточний штампувальні рівчаки (рис. 4.5).

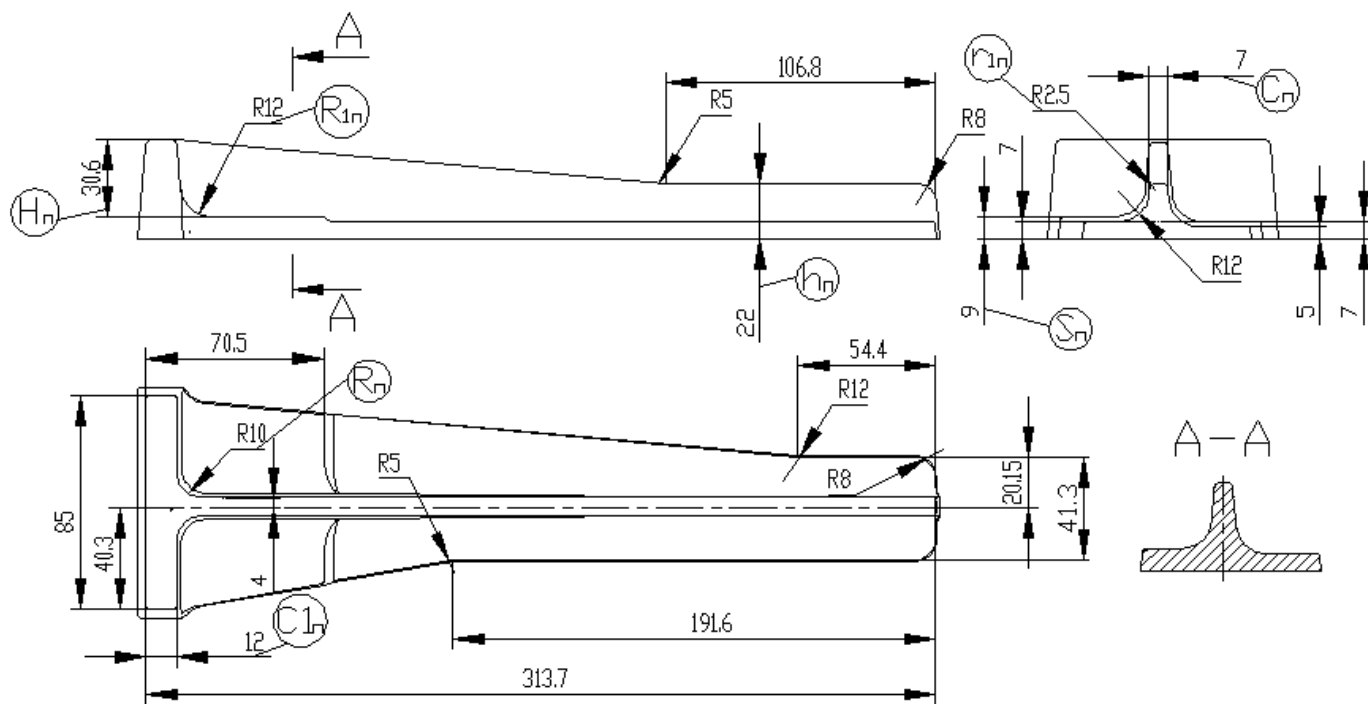


Рисунок 4.3 – Ескіз штампованої поковки «Фітинг»

Таблиця 4.2 – Умови відсутності дефектів при побудові підготовчого рівчака для штампування поковки «Фітинг»

Правила побудови ПР [1]	Перевірка розмірів штампування	Умова наявності дефектів	Рекомендовані ро- зміри ПР
$(H_n - 0,3S_n) \leq (2 \dots 3)C_{1n}$	$(31 - 0,3 \times 9) \leq (2 \dots 3)12$	$28,3 \leq 36$	$25,2 \leq 36$
$R_n \geq 2R$	$R_n \geq 2 \times 10$	$R_n < 20$	$R_n = 10$
$H_n < H$	$H_n < 30,6$	$H_n > 30,6$	$H_n = 31$
$R_{1n} > 0,6(H_n - 0,5S_n)$	$R_{1n} \geq 0,6(31 - 0,5 \times 9)$	$R_{1n} < 15,9$	$R_{1n} = 14$
$r_{1n} \leq 0,33C_n$	$r_{1n} \leq 0,33 \times 7$	$r_{1n} > 2,31$	$r_{1n} = 2,5$
$S_n \geq 1,1S$	$S_n \geq 1,1 \times 9$	$S_n < 9,9$	$S_n = 9$
$C_n > C$	$C_n > 7$	$C_n \leq 7$	$C_n = 7$
$r_n = 0,5R_{1n}$	$r_n \geq 0,5 \times 15$	$r_n < 7,5$	$r_n = 6$
$h_{mn} = (0,8 \dots 0,95)S_n$	$h_{mn} = (0,8 \dots 0,95) \times 9$	$h_{mn} = 8,55$	$h_{mn} = 8,5$
$C_{1n} > C$	$C_{1n} > 12$	$C_{1n} \leq 12$	$C_{1n} = 12$

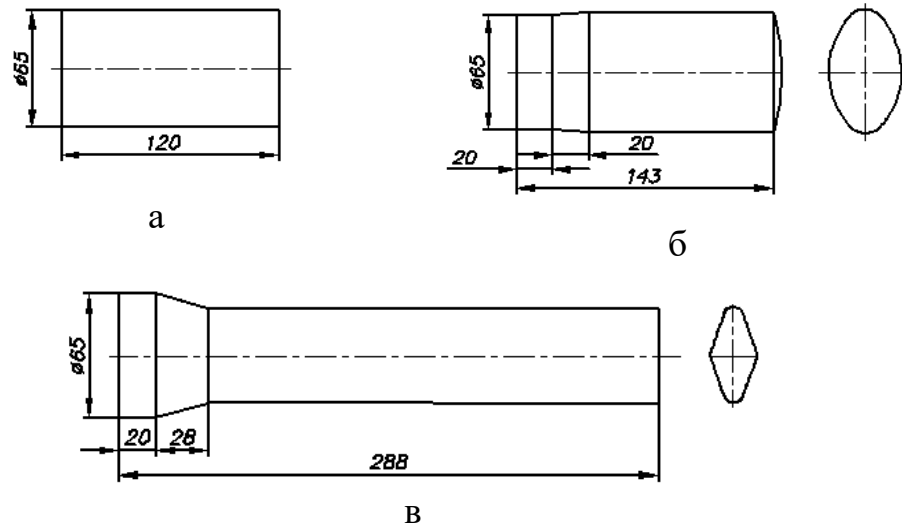


Рисунок 4.4 – Вальцювальні переходи для штампування поковки «Фітинг»:
 а) початкова заготовка; б, в) вальцювальна заготовка після першого і другого переходів

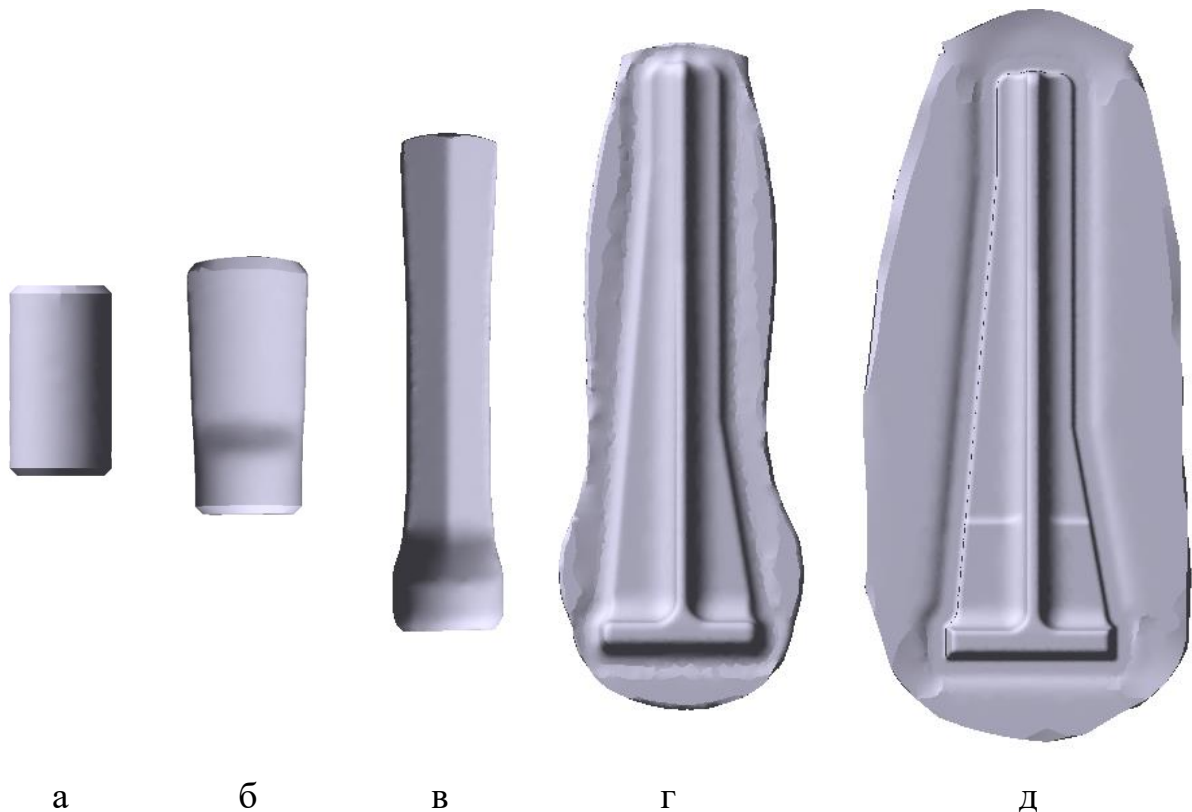


Рисунок 4.5 – Штампована поковка «Фітинг», що отримано моделюванням з мірної заготовки із застосуванням процесу вальцювання і підготовчого рівчака:

а - мірна заготовка; б - вальцювальна заготовка після першого переходу «круг-овал»;
 в - вальцювальна заготовка після другого переходу «овал-ромб»;

г - заготовка після підготовчого рівчака; д - штампована поковка

Таблиця 4.3 – Визначення граничних значень розмірів підготовчого рівчака для штампування деталі «Фітинг»

№ варіанту	Розміри підготовчого рівчака, мм									Наявність дефекту
	H_n	C_{1n}	C_n	h_n	S_n	R_n	R_{1n}	r_n	r_{1n}	
1	41	8	5,5	30	7	3	2,5	6	4	+
2	36	10	5,5	25	7	3	2,5	6	4	+
3	36	10	7	25	7	3	2,5	6	4	+
4	34	10	7	25	9	3	2,5	6	4	+
5	33	11	7	22	9	5	3	6	2,5	+
6	33	11	7	22	9	8	6	6	2,5	+
7	33	11,5	7	22	9	8	6	6	2,5	+
8	37	11,5	7	22	9	15	6	6	3	-
9	37	11,5	7	22	9	15	6	6	3	-
10	35	12	7	22	9	15	6	6	3	-
11	33	11,5	7	22	9	10	6	6	2,5	-
12	33	12	7	22	9	12	6	6	2,5	-
13	32	12	7	22	9	13	2,5	6	4	-
14	31	12	5,5	22	9	8	6	6	3	
15	33	11,5	8	22	7	8	6	6	3	
16	31	11,5	7	22	9	15	3	6	3	-
17	30,6	12	7	22	9	5	5	6	2,5	
18	30,6	12	7	22	9	15	5	6	2,5	-
19	33,6	12	7	22	6	15	5	6	2,5	
20	30	12,5	7	22	9	13	6	6	3	-
21, Рекомендовані розміри ПР	31	12	7	22	10,8	15	10	6	2,5	-

Примітка: (+) - поява дефектів; () – незаповнення кінцевого рівчака;

(-) - відсутність дефектів

Розміри рівчаків для побудови моделей вальцювальних секторів і штампів, були використані за рекомендаціями, що викладені в працях [15], [18], [159], [160]. Аналіз результатів проведення технологічного процесу вальцювання і штампування при одночасному моделюванні процесу формозміни, показав відповідність розмірів підготовчих рівчаків до рекомендацій, що використовуються.

Момент появи дефекту при штампуванні в остаточному рівчаку визначався за допомогою моделювання, коли в розміри підготовчого рівчака вносилися відхилення від рекомендованих розмірів [15], [160] з метою отримання дефекту. Для дослідження моменту виникнення дефекту, зменшувалися радіуси переходів, збільшувалась висота, або зменшувалась ширина тонких ребер (табл. 4.3) Після чого, факт утворення дефекту при даному відхиленні перевірявся на експериментальній деталі.

Наявність дефектів в штампуваннях при перевищенні допустимої висоти і зменшенні товщини ребер та радіусів переходів свідчить про вірність вибору рекомендацій з побудови підготовчих рівчаків. Моделювання процесу та отримання граничних розмірів підготовчих рівчаків після вальцювання, дозволить оптимізувати розміри рівчаків для випадків виготовлення складних деталей.

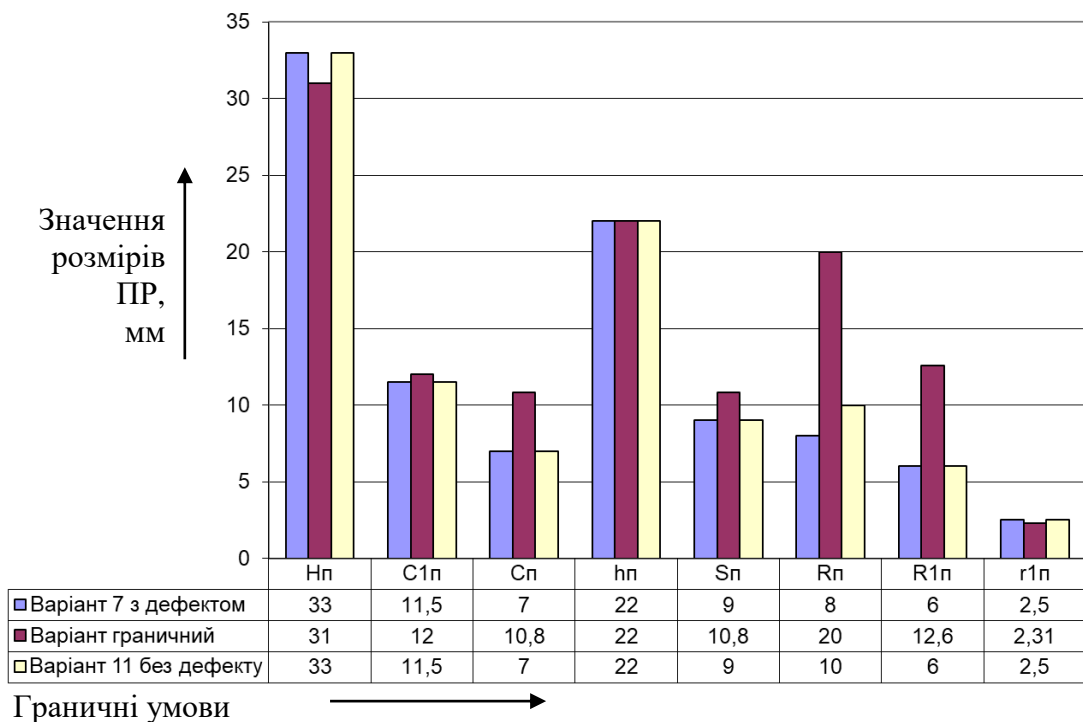


Рисунок 4.6 – Порівняння розмірів підготовчого рівчака при яких утворюються дефекти в кінцевому штампуванні з граничними умовами розмірів при яких дефекти відсутні (табл. 4.3)

Для досліджуваної технології виготовлення, було проведено розрахунки граничних умов побудови ПР (рис. 4.6), в якому визначалися їх максимально припустимі розміри (табл. 4.3, варіант 11). Подальше відхилення у вигляді зменшення радіуса переходу між вертикальними ребрами, призвело до появи дефекту «Зажим» (табл. 4.3, варіант 7). Розміри підготовчих рівчаків для 7 та 11 варіантів суттєво відрізняються від рекомендованих (табл. 4.3, варіант 21), що свідчить про можливість значних відхилень від рекомендованих розмірів і отримання при цьому бездефектних штампвок. Також підтверджується, що рекомендації з побудови розмірів ПР (табл. 4.2) дані з суттєвим запасом та дозволяють гарантувати отримання якісних штампувань при їх виконанні.

Дефект типу «Зажим» під час розрахунку в програмі QForm, ідентифікується за червоними точками на заготовці (рис. 4.7), що показують контакт поверхні заготовки самою з собою [128]. Після чого він збільшується у область контакту.

Пояснення поведінки металу при деформуванні під час застосування граничних умов побудови ПР та за рекомендаціями, що застосовуються на виробництві [159], відбувається за аналізом напружено-деформованого стану в поперечних перерізах під час кінцевого штампування (рис. 4.8). Результати моделювання для аналізу, надаються у вигляді кольорового градієнтного переходу. Місця концентрації переходів за кольорами та розмір розрахованих параметрів в місці переходу на високе ребро – визначають момент початку утворення дефекту в остаточному рівчаку. Дефекти були штучно спричинені за різними граничними умовами для висоти ребер та радіусів переходів, а також за зниженням температури інструменту

З початку утворення дефекту в області навколо нього спостерігається різке зростання опору та швидкості деформування, які відповідно виконують більшу роботу деформування (рис. 4.8, а), на відміну від даних за перерізом бездефектно отриманої штампвки (рис. 4.8, в). Ця кількісна ознака дефекту дозволяє визначити показники напружено деформованого стану при появі яких в місцях переходів та округлень в контурі підготовчого рівчака – можна прогнозувати момент початку утворення дефекту та використовувати її для подальшого аналізу та корегування розмірів рівчака.

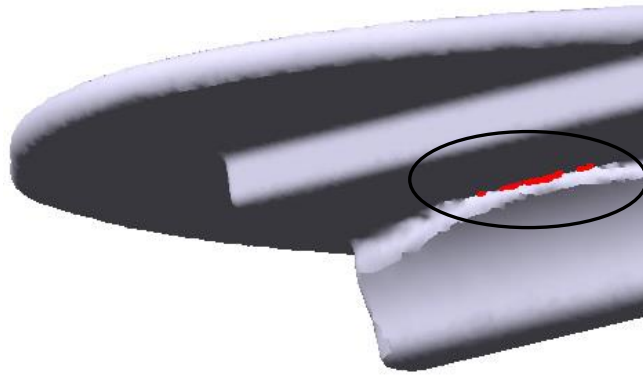


Рисунок 4.7 – Ідентифікація дефектів червоними точками на заготовці під час розрахунку в програмі QForm

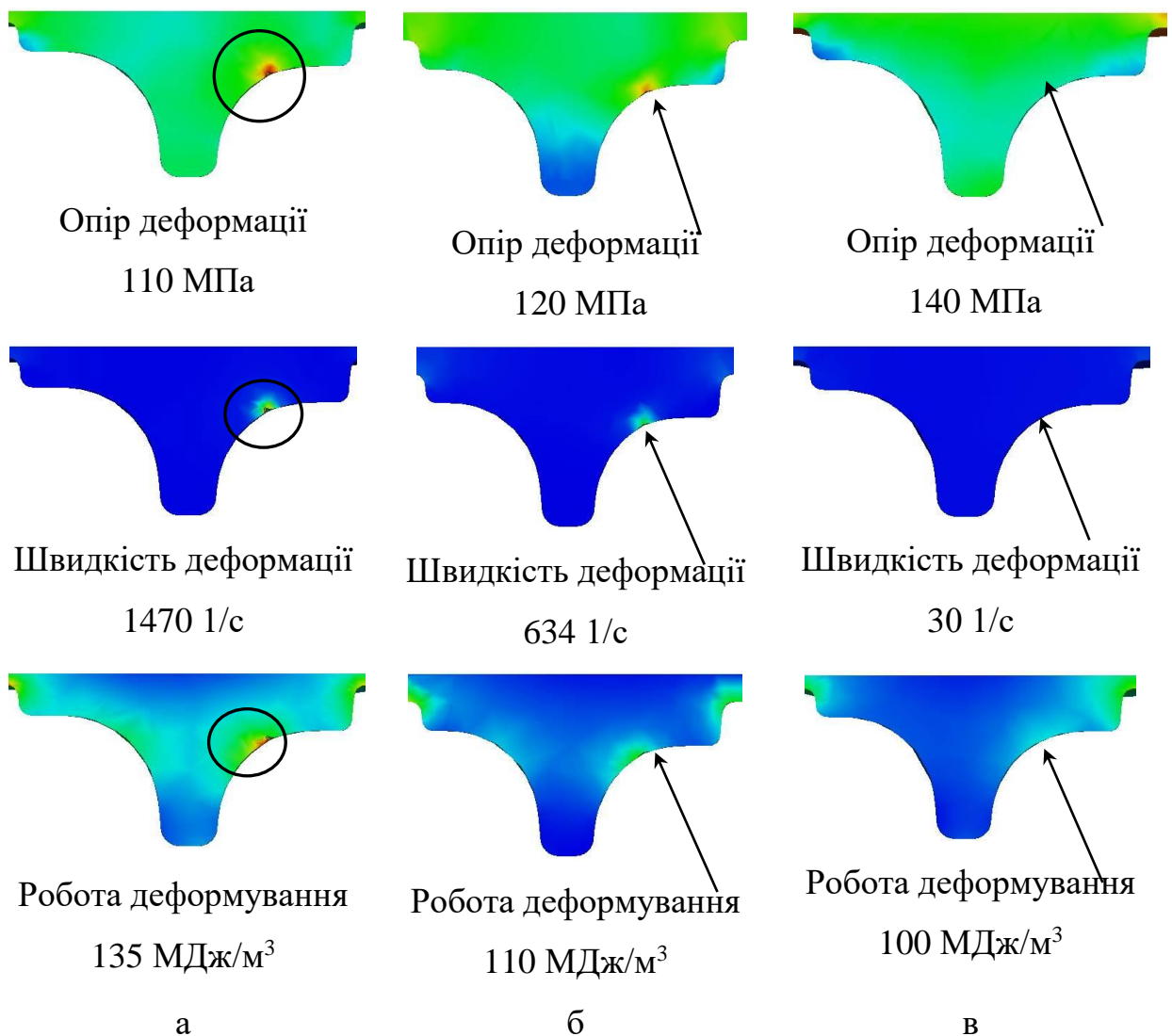


Рисунок 4.8 – Поля в перерізі штампованої поковки після остаточного рівчака, що визначають напружено-деформований стан: а) штампування з дефектом; б) штампування в граничних умовах; в) штампування без дефекту

4.3 Експериментальні дослідження раціональних технологічних параметрів при виготовленні типових представників заготовок з алюмінієвих сплавів, що вальцюються під штампування на кувальних вальцях

4.3.1 Дослідження впливу раціональних технологічних параметрів на процес виготовлення вальцьованих заготовок з одним потовщенням на кінці

Проведені дослідження по визначенню впливу позаконтактних зон вальцювальних заготовок на розширення [134], [136], [141], розміри фактичного осередку деформації [151], [156] та можливості появи дефектів при штампуванні поковок з алюмінієвих сплавів із застосуванням процесу вальцювання і підготовчих рівчаків [158], знайшли застосування при виготовленні деяких видів штампованих поковок з витягнутою віссю і високими ребрами [161].

Зокрема для першої групи класифікатора, у ковальському цеху ДП КиАЗ «Авіант» була виготовлена і випробувана партія штампованих поковок деталі «Фітинг» (рис. 4.9, а) зі сплаву АК6. Технологія виготовлення деталі включає в себе перехід круг-овал з коефіцієнтом витягування $\lambda = 1,65$. Аналіз отриманих після вальцювання заготовок не виявив наявності дефектів в жодній за рахунок зменшення нерівномірності деформації та покращення структури металу. Натомість раніше задирки на торцях заготовки виникали у 5...10% випадків.

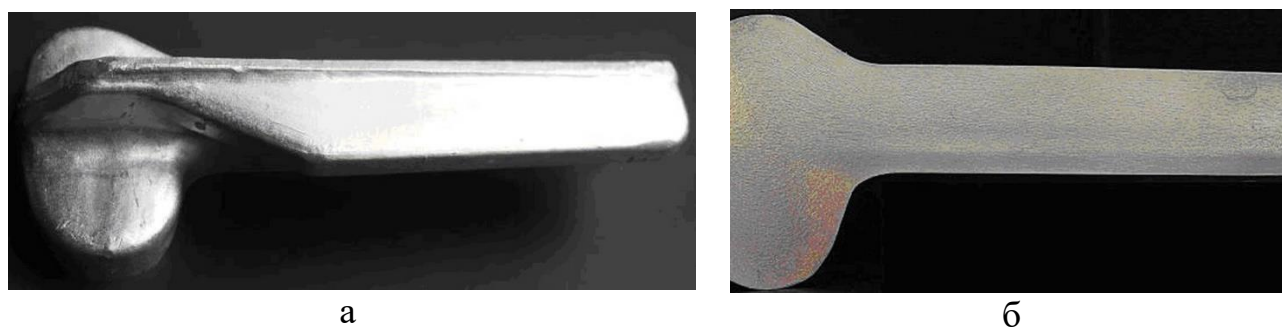


Рисунок 4.9 – Деталь «Кронштейн» першої групи типових представників заготовок, що вальцюються на кувальних вальцях: штампована поковка (а); макроструктура поздовжнього перерізу заготовки, що вальцюється під штампування (б)

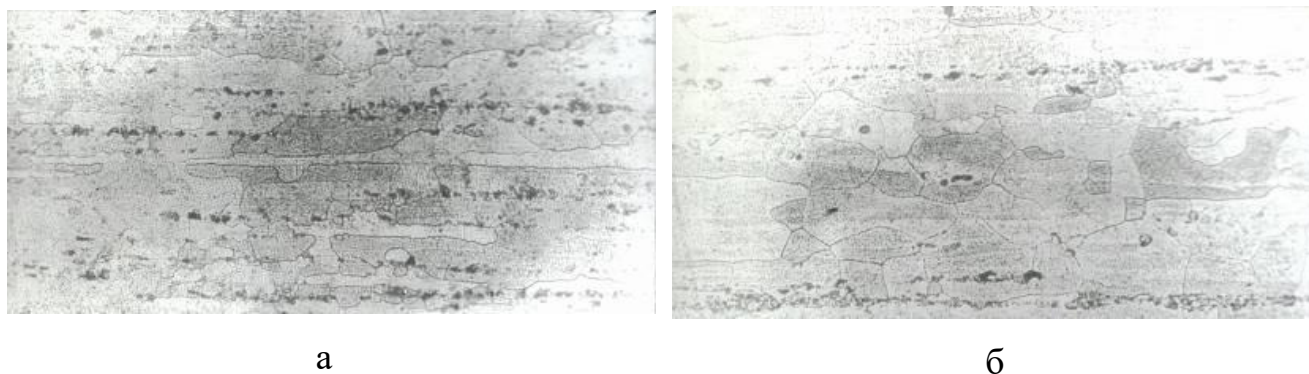


Рисунок 4.10 – Мікроструктура перерізу заготовок зі сплаву АК6 в зоні центральної частини зразка. Загартоване і штучно зостарене. Поздовжній шліф, х.300: а – ступінь обтиску 30%, б – ступінь обтиску 50%

Аналіз -макро (рис. 4.9, б), -мікро і механічних властивостей за результатами механічних випробувань зразків, вирізаних з розмірами за ОСТ - 1.90011-70 [162] з вальцювальних заготовок і штампованих поковок даної деталі, показав відповідність якості вимогам технічної документації [9]. Мікроструктура центральної частини вальцювальних заготовок круглого перерізу в овалному калібрі на різних ступенях обтиску (рис. 4.10), показує що збільшення ступеня обтиснення забезпечує проникнення деформації в центральні зони вальцюються заготовки, викликаючи подрібнення і орієнтує зерна в напрямку руху металу при обробці.

4.3.2 Дослідження технологічних параметрів при виготовленні заготовок з потовщенням посередині, що вальцюються кувальних вальцях з алюмінієвих сплавів під подальше штампування

Заготовки для виготовлення деталі «Фітинг» третьої групи типових представників (рис. 4.11), були без кліщовини, що служить для утримання заготовки в кліщах, а з поворотом заготовки на 180° для отримання другого кінця вальцювальної заготовки [163]. Розрахунок таких заготовок, з урахуванням коефіцієнтів впливу ПЗ та розмірів фактичного ОД, показав, що при штампуванні такої заготовки в ПР, помітно покращився перерозподіл металу по об'єму поковки (рис. 4.11), що підвищило якість та надійність виробу, що отримується після подальшої механічної обробки.

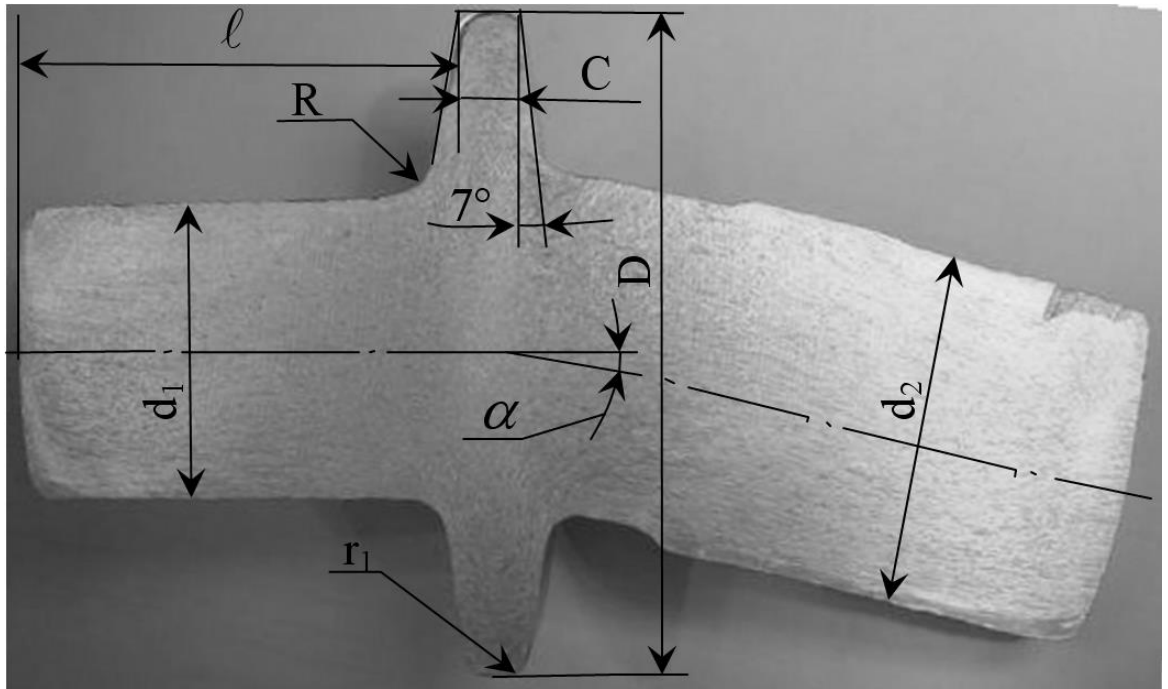


Рисунок 4.11 – Макроструктура поздовжнього перерізу штампованої поковки, що відноситься до третьої групи класифікатора і його загальні розміри

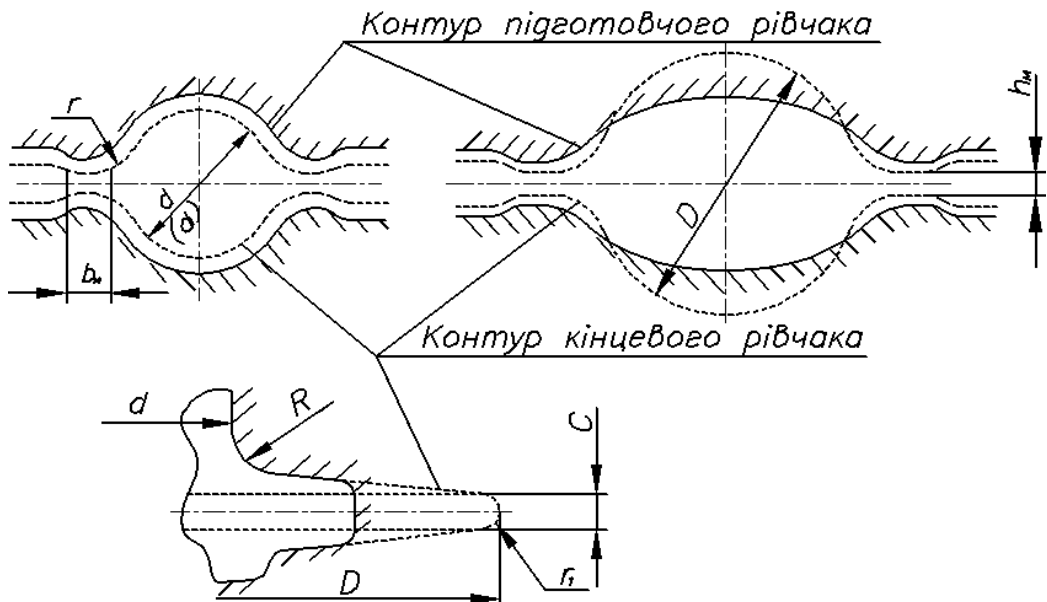


Рисунок 4.12 – Поперечні перерізи кінцевого та підготовчого ривчаків штампованих поковок третьої групи класифікатора [1]

Побудова підготовчого рівчака (рис. 4.12) виконувалась за рекомендованими співвідношеннями геометричних розмірів підготовчого і остаточних рівчаків [10], які були перевірені за допомогою метода прогнозування появи дефектів [155]:

$$C_{II} > C; \quad D_{II}/2 - d_{II}/2 \leq (3-5) \cdot C; \quad r_{II} \geq 2r; \quad r_{1II} \leq 0,33 \cdot C_{II};$$

$$d_{II} > 1,1 \cdot d; \quad R_{II} = (1,0 \div 1,1) \cdot R; \quad d_{1II} > 1,1d_1; \quad h_M = d_{II} - d_1.$$

Заготовки, що вальцюються та штамповані поковки, були перевірені в центральній заводській лабораторії (ЦЗЛ) за всіма видами показників випробувань, які зазначені в технічній документації до креслення деталі «Фітинг» [9], мають властивості, що знаходяться в межах припустимих норм для відповідних груп контролю.

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

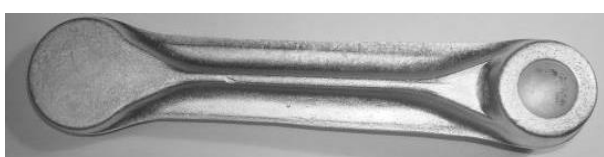
Досліджувані штамповані поковки другої групи класифікатора відрізнялися конструктивною складністю (рис. 4.13...4.15) [3]: тонке полотно; малі радіуси переходів та поєднань; два потовщення на осі штампованої поковки з суттєвою відстанню між ними, отримання якого залежить від вірного розрахунку технологічних параметрів розширення. Для покращення рівномірності структури металу деталі, необхідно було провести підвищення точності розрахунку контуру підготовчого рівчака (рис. 4.16).

Зокрема, для виготовлення деталі з подовженою віссю (рис. 4.13) Ш / 24- 5109-10-3 «Качалка» (рис. 4.17, а) – використовувалися заготовки розмірами $\varnothing 35 \times 125$ мм зі сплаву АК4-1 (рис. 4.17, б).

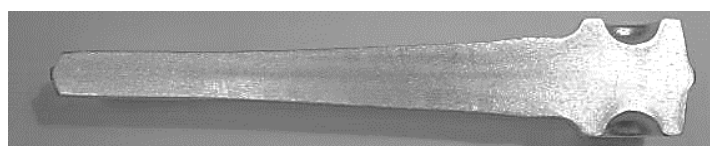
Відповідно до технічного завдання в ковальському цеху ДП КиАЗ «Авіант», дослідна технологія включала наступні технологічні переходи: двоперехідне вальцювання (рис. 4.18, б, в), штампування в чорновому і чистовому рівчаках (рис. 4.17, г, д). Для цього використовувалися вальцювальні штампи з калібрами (рис. 4.2), за розмірами, наведеними в табл. 4.4.



Рисунок 4.13 – Макроструктура поздовжнього перерізу штампованої поковки «Качалка», що виготовлена з вальцювальної заготовки



а



б

Рисунок 4.14 – Штампована зі сплаву АК4-1 поковка «Качалка», що виготовлена з вальцювальної заготовки (а) і макроструктура її поздовжнього перерізу (б)



Рисунок 4.15 – Макроструктура поздовжнього перерізу штампованої поковки деталі «Основа»

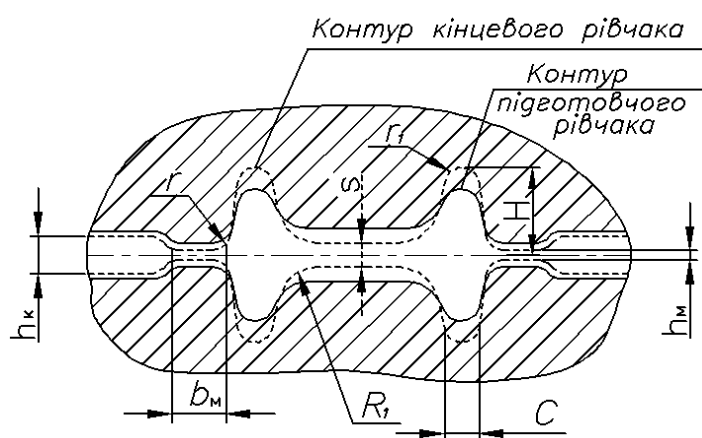


Рисунок 4.16 – Контури закритих поперечних перерізів остаточного (чистового) і підготовчого рівчаків для штампованої поковки другої групи

Таблиця 4.4 – Розміри калібрів для освоєння процесу вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів з урахуванням впливу ПЗ

Овальний калібр						Квадратний калібр					
h_k , мм	b_k , мм	R , мм	m , мм	r , мм	F , мм ²	m , мм	h_k , мм	b_k , мм	C , мм	r , мм	F , мм ²
24,4	40,8	23	1,0	3	214	1,0	15,2	16,7	11,8	1,2	137

Якість заготовок після кожного з етапів вальцювання була стовідсотковою, з відсутністю жодних дефектів (рис. 4.18, 4.19), що раніше спостерігалось тільки у 85% проведених технологічних операцій.

Перед запуском технології в серійне виробництво, з досліджуваної партії було відібрано декілька примірників заготовок, що вальцюються та штамповок виготовлених з них – для всебічних випробувань та аналізу в ЦЗЛ (рис. 4.19). Досліджувались: якість структури (макро-, мікро-), механічні властивості, хімічний склад (рис. 4.20...4.23). Якість структури досліджували на оптичних металографічних мікроскопах при різних збільшеннях з травленням зразків за загальноприйнятою методикою. Дослідження механічних властивостей виконували при статичному навантаженні зразків, вирізаних з різним напрямком волокна. Дані за наслідками досліджень показали відповідність механічних властивостей вальцьованих заготовок та виготовлених з них штамповок до вимог технічної документації [2]: межа міцності $\sigma_B = 390...415$ МПа; відносне подовження $\delta = 16...19\%$.

На коефіцієнт, що використовується в теоретичних розрахунках зовнішнього тертя впливає стан контактуючих поверхонь (клас чистоти, мастильний матеріал, оксидні плівки, хімічний склад металу, що вальцюється, матеріал валків та ін.). За результатами використання даної технології, було визначено коефіцієнт тертя для аналітичних розрахунків (рис. 3.9). Зміна коефіцієнту тертя при моделюванні – дозволила привести розрахункові розміри геометрії поперечних перерізів вальцьованих заготовок до збігу з розмірами експериментально отриманих заготовок (рис. 4.20, 4.21). Збіг даних допускався в межах відносного відхилення 8...10%.

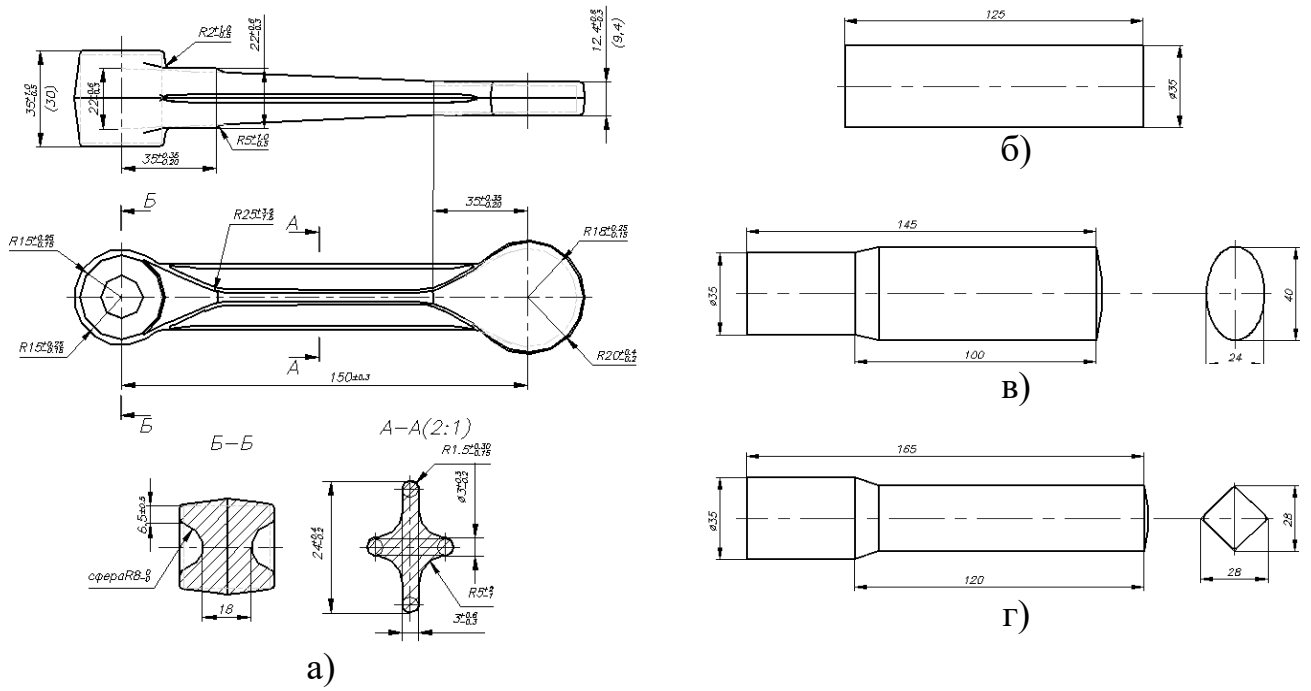
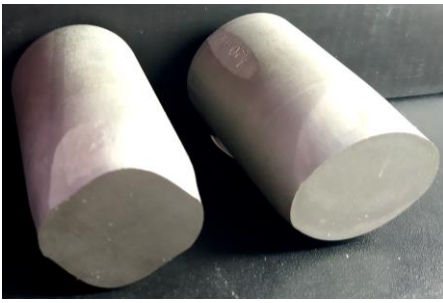


Рисунок 4.17 Штампована поковка «Качалка»: а) розміри, б) початкова заготовка; в, г) заготовка, що вальцювалась після першого та другого переходів



Рисунок 4.18 – Етапи виготовлення штампованої поковки «Качалка»: а) мірна заготовка; б) заготовка, що вальцюється, першого переходу «круг-овал»; в) вальцювальна заготовка другого переходу «овал-квадрат»; г) заготовка після підготовчого ривчака; д) штампована деталь



а



б

Рисунок 4.19 – Зразки для дослідження макроструктури поперечного перерізу зони осередку деформування після вальцювання за схемами круга-овал, овал-ромб (а) та після штампування заготовки, що вальцюється в калібрах, в підготовчому рівчаку

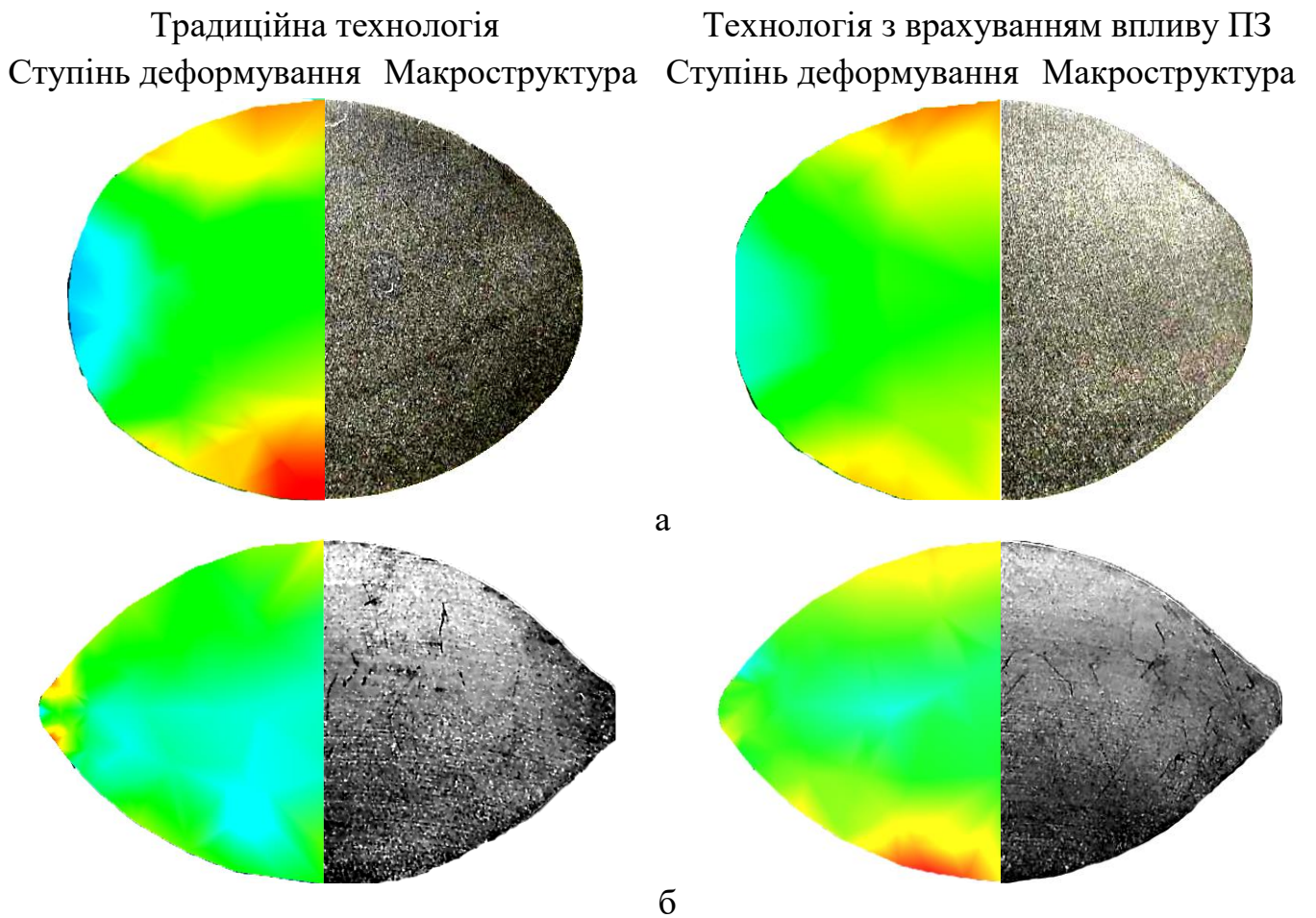


Рисунок 4.20 – Ступінь деформування та макроструктура перерізів заготовок, що вальцюються за системою круг-овал: (а) перехідна зона з круга на овал; (б) зона овалу

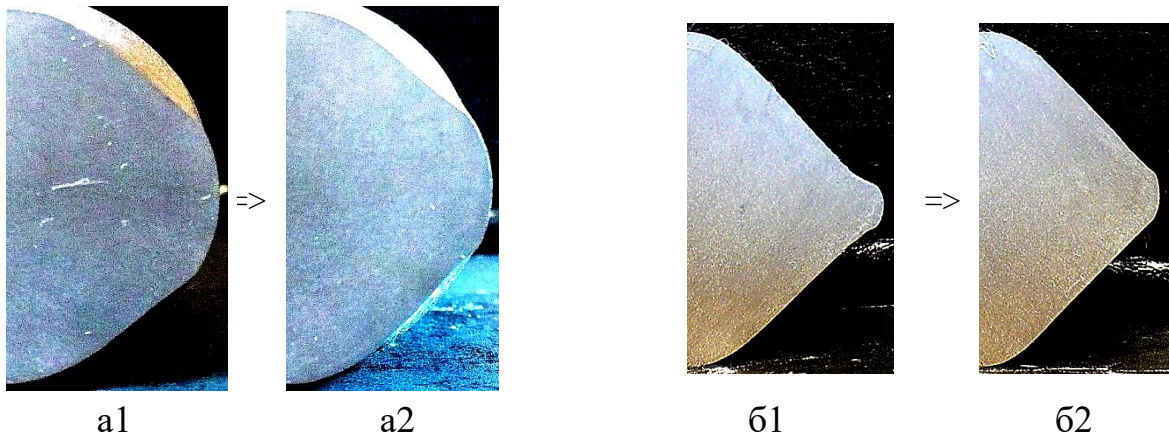


Рисунок 4.21 – Макроструктура заготовок, що вальцюються за системою овал-квадрат: а) макроструктура перехідної зони з овалу на квадрат; б) макроструктура перерізу в зоні квадрата; розрахунок розширення за традиційною технологією (1) та з урахуванням впливу ПЗ (2)



Рисунок 4.22 – Макроструктура поздовжнього розрізу штампованого вальцювання після підготовчого рівчача: а) макроструктура головки; б) макроструктура поздовжнього перерізу ребра; в) макроструктура другої головки



Рисунок 4.23 – Макроструктура поздовжнього розрізу штампованого вальцювання після кінцевого рівчача: а) макроструктура головки; б) макроструктура поздовжнього перерізу ребра

Коефіцієнт витягування за системою круг-овал дорівнює 1,35, за якого вплив ПЗ на розширення знаходиться в межах 20...30%, а розмір самого коефіцієнту досягає максимуму. Порівняльний аналіз перерізів заготовок, що вальцюються після деформування в овальному та ромбічному калібрах (рис. 4.19...4.20), показав зменшення нерівномірності розподілу макроструктури по перерізу заготовки для випадків, коли розрахунок розширення виконувався за формулою (3.6), що враховує вплив ПЗ на розширення. Дослідне бездефектне вальцювання заготовок під наступне штампування за два переходи із загальним коефіцієнтом витягування 2,43, підтвердило можливість вальцювання з великими коефіцієнтами витягування за перехід.

Під час розрахунку технології виготовлення вальцювань, у яких довжина ділянки, що деформується, має змінний переріз або два й більше потовщення уздовж осі, точність визначення випередження вкрай необхідна, оскільки окрім визначення розмірів поперечних перерізів потрібен розрахунок довжини його окремих ділянок. У разі невірної визначення випередження та розширення, довжина заготовки після вальцювання на попередній ділянці може бути більшою або меншою за розрахунок та не відповідати довжині наступної ділянки, що призводить до браку заготовки.

Для підвищення точності розрахунку, збільшення можливостей раціонального використання обсягу штампувального ривчака (рис. 4.16) та вірного перерозподілу обсягу металу заготовки, що вальцюється, базуючись на дослідженнях можливостей появи дефектів після підготовчого ривчака (п. 4.2) – була запропонована та перевірена можливість скорегувати деякі співвідношення його розмірів [4], [159]:

$$(H_{\Pi} - 0,3S_{\Pi}) \leq (2...3)C_{\Pi} \quad C_{\Pi} > C; \quad r_{\Pi} \leq 0,33C_{\Pi} \quad S_{\Pi} = 1,1S; \quad H_{\Pi} < H$$

$$\underline{R_{\Pi}} \geq 1,1R; \quad h_{МП} = S_{\Pi} \quad r_{\Pi} = (1,5...2)r \text{ або } r_{\Pi} \sim 0,5R_{1\Pi} \quad \underline{R_{1\Pi}} > 0,55(H_{\Pi} - 0,5S_{\Pi})$$

Врахування наявності позаконтактних зон в технології виготовлення заготовок, що вальцюються для деталей другої групи класифікатора (рис. 4.13 - 4.15), забезпечило більш точну підгонку розмірів вальцювання під геометрію підготовчого ривчака і відповідно дозволив знизити вимоги до геометрії підготовчого ривчака. Це забезпечує глибше проникнення деформації в центральні зони вальцювальної заготовки, викликаючи подрібнення і орієнтування зернят в напрямку руху металу, пок-

ращуючи його структуру, загальну точність вальцювання та показало зниження градієнту нерівномірності по перерізу (рис. 4.20). Також для дослідженої партії деталей була зменшена норма витрати вихідної заготовки на 11% та за рахунок використання програмно-методичного комплексу для автоматизованих розрахунків технологічного процесу вальцювання зменшена тривалість циклу проведення проектних робіт до 55%. Зниження витрат металу та електроенергії знизило собівартість виготовлення партії штампувальних поковок на 8%.

4.4 Перевірка на адекватність емпіричних моделей, що використовуються при розрахунках розширення

Емпірична математична модель (3.6), що була рекомендована автором та використовувалась при розрахунках розширення в дослідженнях, наведених у п. 4.3, була перевірена на адекватність у відповідності з методикою наведеною у п. 2.3. Перевірка виконувалась на підставі технології виготовлення штампованої поковки «Качалка» (рис. 4.16, 4.17). Вимірювання розмірів розширення виконувалось для чотирьох заготовок, що були отримані після вальцювання за різних коефіцієнтів форми калібру i (табл. 4.4).

Для отриманих експериментальних даних дисперсія помилок (2.15) дорівнює $S_n^2 = 0,031692$. Розрахована в експериментальних точках за емпіричною формулою залишкова дисперсія (2.16) дорівнює $S_s^2 = 0,215557$. Відповідно розрахункове значення критерію Фішера за формулою (2.17) буде дорівнювати $F_p = 6,801682$. Табличне значення критерію Фішера - розраховується за таблицями розподілу Фішера для заданого рівня значущості, коли ймовірність $P = 0,95$, кількістю ступенів свободи чисельника $\nu_s = 4 - 2 = 2$ та знаменника $\nu_n = 16 - 4 = 12$. Тобто, максимально можливе значення критерію під впливом випадкових факторів при отриманих ступенях свободи, складатиме $F_p = 6,926608$. Оскільки розрахункове значення критерію Фішера вийшло меншим за табличне, вважається що отримана модель адекватна експериментальним даним.

Таблиця 4.5 – Дані з розміру розширення при вальцюванні циліндричних заготовок Ø 35 мм в овальних калібрах

i	λ	Δb_1	Δb_2	Δb_3	Δb_4	Δb_{cp}
1,33	1,35	2,1	2,01	2,08	2,15	2,085
1,47	1,45	3,72	3,81	3,78	3,8	3,7775
1,86	1,55	7,1	7,2	7,3	7,25	7,2125
2,99	1,75	14,5	14,67	14,4	14,13	14,425

Таблиця 4.6 – Дані з розрахунку розміру розширення з урахуванням ПЗ при вальцюванні циліндричних заготовок Ø 35 мм в овальних калібрах

i	$K_{пош.ов.}^{ов}$	$K_{пош.ов.}^{но}$	$h_{пз}$	$b_{пз}$	$K_{пош.ов.}^{ПЗ}$	$\Delta b(ПЗ)$
1,33	0,186197	0,130754	9,69	1,36	0,055443	1,975751
1,47	0,237522	0,189475	9,37	1,26	0,048047	3,544239
1,86	0,330285	0,298458	9,85	1,4	0,031827	7,157602
2,99	0,449467	0,428225	9,29	1,24	0,021242	14,62101

Висновки за розділом 4

Визначена методика за якою за допомогою моделювання виконується прогнозування появи дефектів при гарячому штампуванні поковок із алюмінієвих сплавів в остаточному рівчаку після декількох операцій вальцювання та деформування в підготовчому рівчаку. З початку утворення дефекту в області навколо нього спостерігається різке зростання опору та швидкості деформування, що відповідно потребує виконання більшої роботи деформування та може використовуватись як індикатор моменту початку утворення дефекту в місцях переходів та округлень в контурі підготовчого рівчака. В разі виконання рекомендацій для забезпечення раціональних технологічних параметрів деформуючого інструменту та зниження вимог до геометрії побудови підготовчого рівчака дозволяє більш точно заповнити металом кінцевий рівчак та вірогідність отримання бездефектне штампування складає 95% що підтве-

рдила експериментальна перевірка виготовлення партії поковок для деталей складної конфігурації.

Експериментальна перевірка впливу технологічних параметрів вальцювання на розширення та геометричні розміри деформуючого інструменту при виготовленні невеликих партій (15...20 штук) виробів з різних груп типових представників заготовок з алюмінієвих сплавів, що вальцюються під штампування на кувальних вальцях, довела правомірність використання удосконалених аналітичних залежностей. Забезпечується більш глибоке проникнення деформації в центральні зони заготовки, що вальцюється, та дозволяє покращити перерозподіл металу в вальцювальному калібрі та заповнення металом підготовчого рівчака. Штампування в остаточному рівчаку у досліджуваній партії було повністю бездефектним, та пройшло перевірку на відповідність механічних властивостей заготовок, що вальцюються та виготовлених з них штампівок вимогам технічної документації: межа міцності $\sigma_B = 390...415$ МПа; відносне подовження $\delta = 16...19\%$. Для дослідженої партії було зменшено норму витрати матеріалу вихідної заготовки на 11%, час технологічної підготовки процесу на 55% та собівартість виготовлення штампівальних поковок на 8%, а також підвищено довговічність використання виробів на 10...15%.

Перевірка відповідності експериментальних даних до розрахованих за удосконаленою математичною моделлю, що описує розширення, підтвердила адекватність її використання. Розрахункове значення критерію Фішера $F_p = 6,801682$ є меншими за його табличне значення $F_p = 6,926608$, для заданого рівня значущості, коли ймовірність $P = 0,95$.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РОЗРАХУНКУ КАЛІБРІВ ДЛЯ ВАЛЬЦЮВАННЯ І СТВОРЕННЯ ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЕЙ ВАЛЬЦЮВАЛЬНИХ СЕКТОРІВ

5.1 Методика автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання

Для автоматизованих розрахунків технологічного процесу вальцювання заготовок під штампування був розроблений програмно-методичний комплекс (ПМК). Розроблення виконувалася на підставі договору про співпрацю між НВЦ «Ухналь» (м. Київ) та кафедрою КІТ Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА) (м. Краматорськ) від 04.05.2010 р. на виготовлення науково-технічної продукції за темою «Розроблення автоматизованої системи підготовки розрахунку калібрів для вальцювання і створення 3D-моделей вальцювальних секторів».

Загальний вигляд схеми автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання розроблено у вигляді структурно-функціональної діаграми нульового рівня [164], та наведено на рис. 5.1.

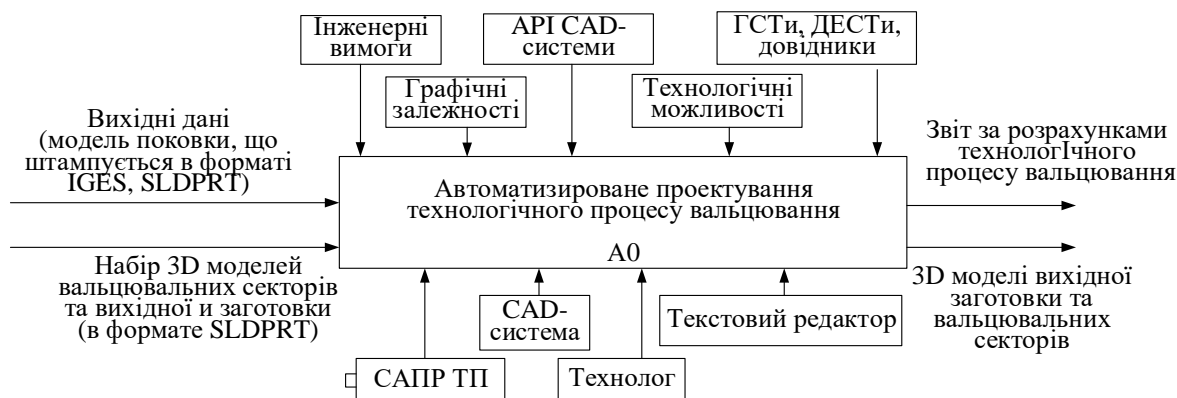


Рисунок 5.1 – Структурно-функціональна діаграма САПР ТП вальцювання

До складу комплексу засобів забезпечення САПР ТП вальцювання [15] входить:

а) інформаційне забезпечення - в якості вхідної інформації, для початку автоматизованого проектування, використовується тривимірна модель штампованої по-

ковки, що отримується за використанням робочого креслення, а також модель початкової заготовки та тривимірні моделі вальцювальних секторів в форматі SLDPRT;

б) математичне забезпечення – сукупність математичних моделей та алгоритмів рішень задач, наведених в певній формі, яка є зручною для використання при складанні програмного коду, призначеного для розрахунку параметрів технологічного процесу;

в) програмне забезпечення – інструментальний засіб розроблення прикладних програм Microsoft Visual Studio 2010 - 2017 року на мові програмування C # .NET;

г) технічне забезпечення – комплекс технічних засобів, що забезпечують напівавтоматичну підготовку вхідної оперативної інформації, а також автоматичне отримання вихідної інформації (ОС Windows, SolidWorks, .NET Framework 4.5, Microsoft Office: Word, Excel та Access);

д) організаційне забезпечення – державні стандарти [19], [160], [162], [165], інструкції, методичні і керівні матеріали, довідники, обмеження API CAD-системи, інженерні вимоги і технологічні можливості підприємства-виготовлювача;

е) функціональне забезпечення – розрахунки виконує технолог за допомогою, САПР ТП, CAD-системи та текстового редактора для отримання звіту за результатами проектування.

Головну складову завдання САПР ТП вальцювання можна розділити на шість загальних послідовних дій (модулів):

а) отримання розмірів площ поперечних перерізів штампованої поковки;

б) визначення параметрів заготовки, що вальцюється (побудова епюр, ескізів поперечних перерізів та діаметрів, обсягу заготовки і коефіцієнтів витягування на перехідних ділянках);

в) визначення числа переходів та вибір системи калібрів;

г) розрахунок системи калібрів (овального, круглого, ромбічного та квадратного), зусилля і базисного тиску, що виникають під час вальцювання;

д) побудова параметричних тривимірних моделей вальцювальних секторів [165] та вихідної заготовки в CAD - системі;

е) підготування та друк звіту за результатами розрахунку ТП вальцювання.

Сукупність методів, правил та процедур, що включають в себе всі підзавдання САПР ТП вальцювання показана на діаграмі [166] (рис. 5.2).

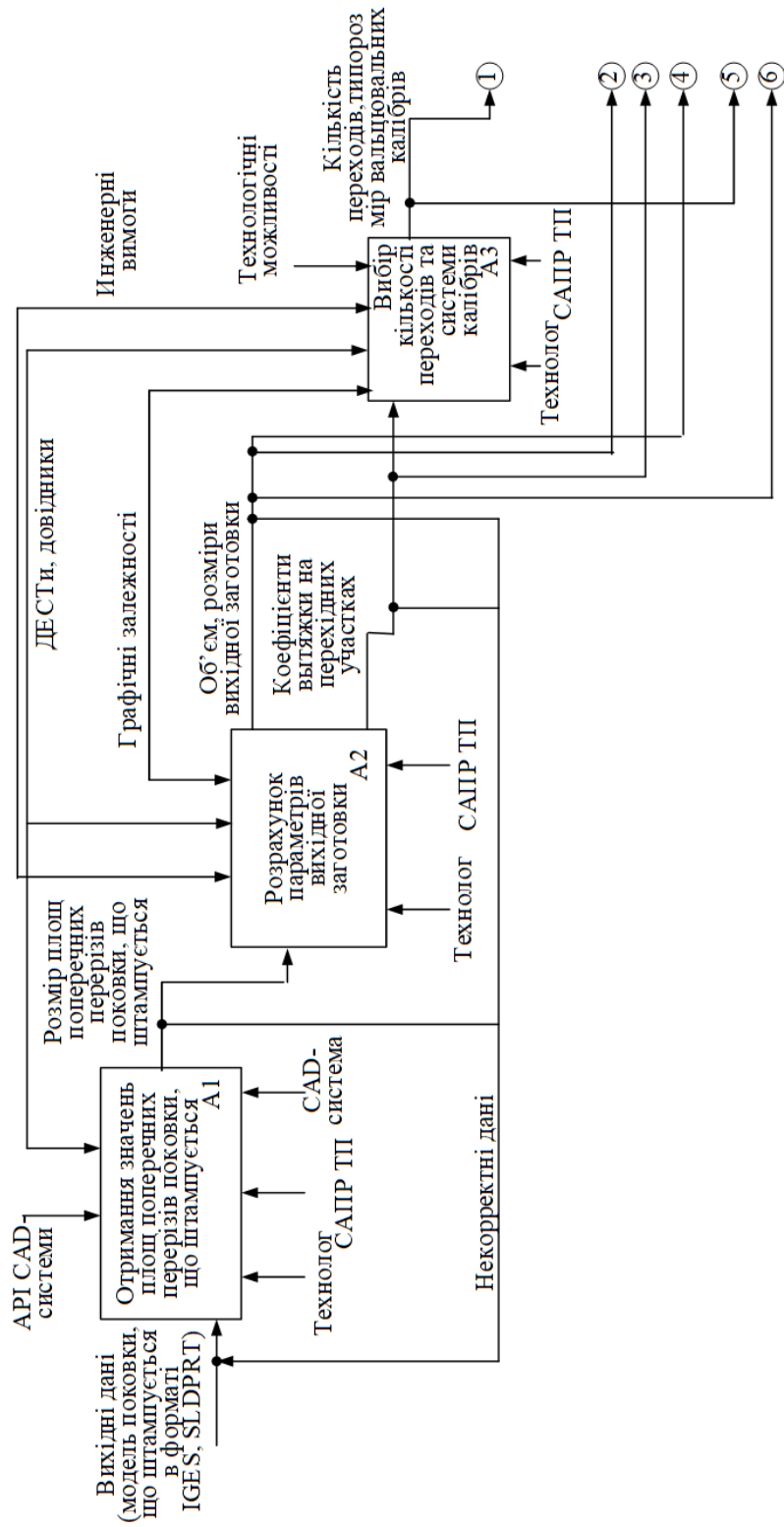


Рисунок 5.2 – Деталізуюча структурно-функціональна діаграма автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання

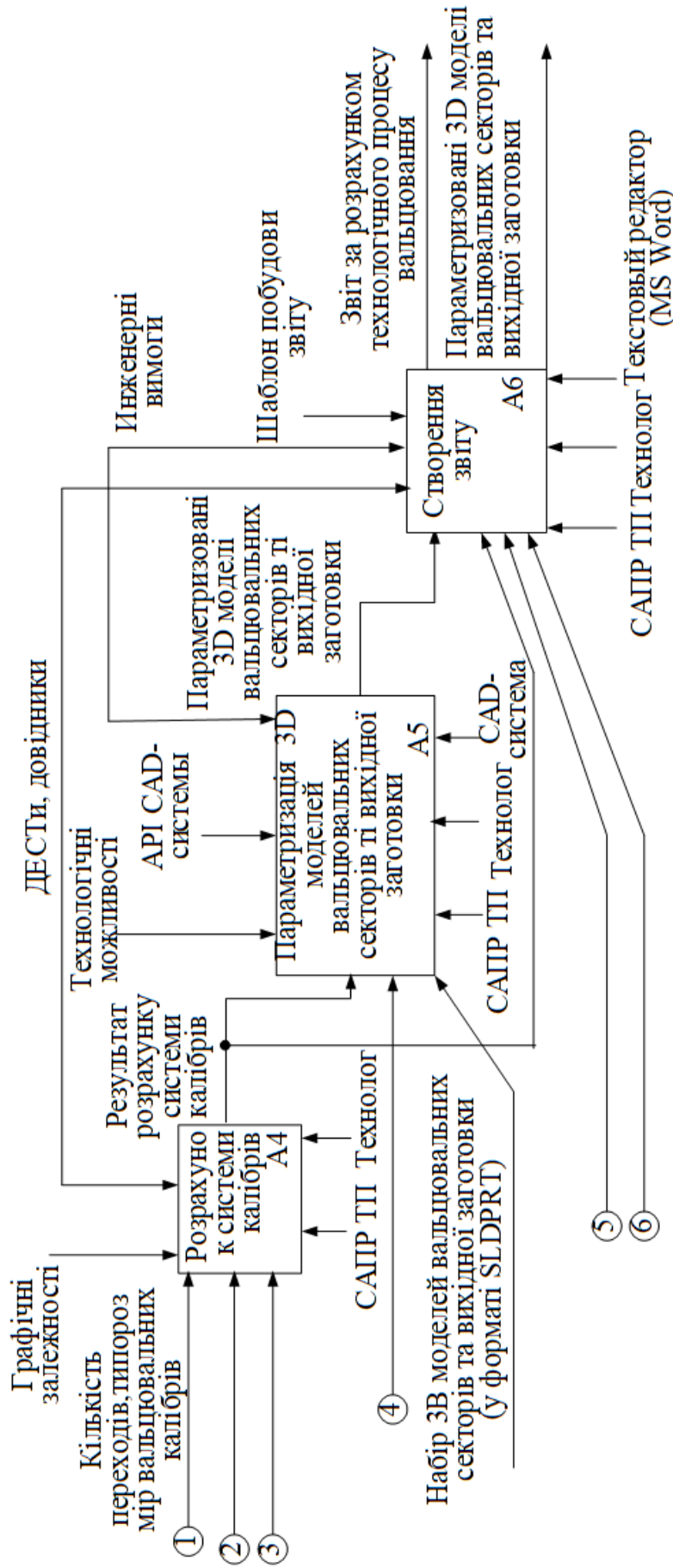


Рисунок 5.2 – Ліст Б.

5.2 Математична модель автоматизації технологічного процесу вальцювання

5.2.1 Отримання розмірів площ поперечних перерізів штампувальної поковки

Для отримання значень площ поперечних перерізів штампованої поковки, ПМК інтегрується з CAD-системою, з якої отримує дані за допомогою функцій API. Вихідними даними для цього процесу є модель штампованої поковки в форматі SLDPRT або IGES, відкрита в CAD-системі SolidWorks. На тривимірній моделі штампованої поковки вибираються дві точки: перша позначає місце на поздовжній осі, в якій буде закінчуватися підрахунок площ поперечних перерізів; друга точка показує місце початку розрахунку поперечних перерізів (рис. 5.3). Після цього, в меню програмного комплексу вводиться запит на розрахунок площ поперечних перерізів та відбувається інтеграція з SolidWorks.

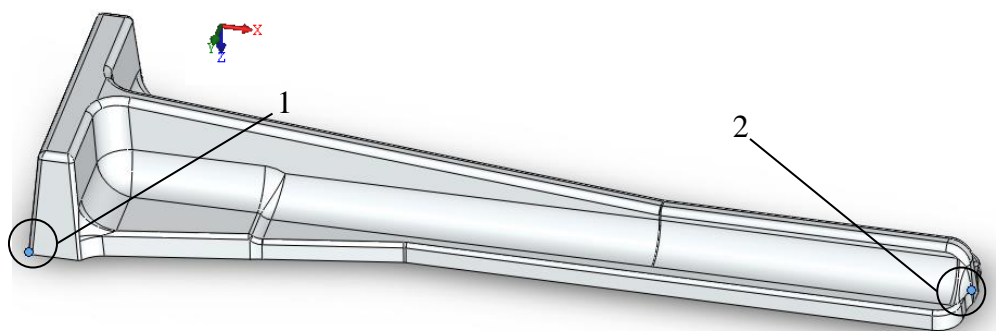


Рисунок 5.3 – 3D-модель штампованої поковки з точками, які позначають початок (2) та кінець (1) деталі

За допомогою спеціально розробленого алгоритму розбиття деталі на елементарні ділянки (додаток Д1, Д2) – відбувається розрахунок площ поперечних перерізів. Для контролю та недопущення різких переходів по перерізах вздовж осі штампованої поковки, при побудові площин перерізу – на кожному кроці програма перевіряє умову, за якої різниця площ між сусідніми елементарними ділянками не може становити більше за розмір, визначеної користувачем [167]:

$$S_{\min} \geq |S_{n+1} - S_n|, \quad (5.1)$$

де S_{min} - показник плавності переходу, задається користувачем та визначає точність розрахунку (максимально припустиму різницю площ сусідніх перерізів S_{n+1} та S_n (рис. 5.4)).

5.2.2 Визначення параметрів заготовки, що вальцюється

Отримані розміри площ поперечних перерізів штампованої поковки з CAD-системи, використовуються в ПМК для побудови епюри поперечних перерізів (рис. 5.4) розрахункової заготовки (штампованої поковки) [168] – заготовки з поперечними перерізами заданої користувачем форми, площі яких дорівнюють сумарній площі відповідних перерізів штампованої поковки та облою [169]. В ПМК реалізована методика побудови епюр з урахуванням витрати металу в облою, а також з урахуванням температурного усаджування для матеріалів, що найчастіше використовуються в машинобудуванні: сталі, алюмінієвих і титанових сплавів. ПМК зберігає отримані з SolidWorks дані за площами епюри перерізів в форматі Excel для зручності подальшого аналізу та обробки.

З метою оптимізації роботи ПМК, було досліджено залежність часу що витрачається на розрахунок та побудову епюри поперечних перерізів ($T_{обр}$) (час обробки) деталі в SolidWorks від відносин різниці площ між сусідніми елементарними ділянками, в яких відбувається розрахунок площі поперечного перерізу ($S_{min} = |S_{n+1} - S_n|$), та максимальної площі поперечного перерізу деталі (S_{max}) (рис. 5.5) [158, 167]. Аналіз залежностей показав, що в проміжку значень S_{min}/S_{max} між 0,19 та 0,23 - забезпечується достатня точність для отримання ймовірних даних для побудови епюри перерізів за мінімальний час обробки деталі в SolidWorks.

Користувач виконує побудову та коригування епюри перерізів заготовок, що вальцюється, процес конструювання якої підпорядковується наступним правилам побудови [15]:

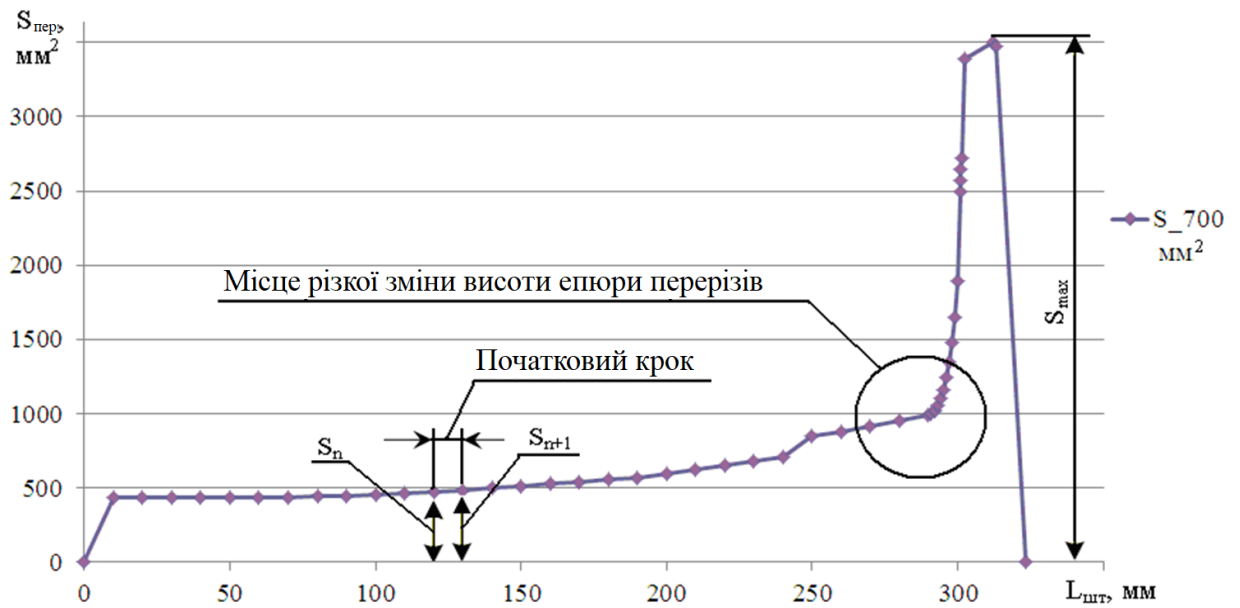


Рисунок 5.4 – Епюра поперечних перерізів штампованої поковки (см. рис. 5.3), отримана в ПМК САПР ТП «Вальцювання»

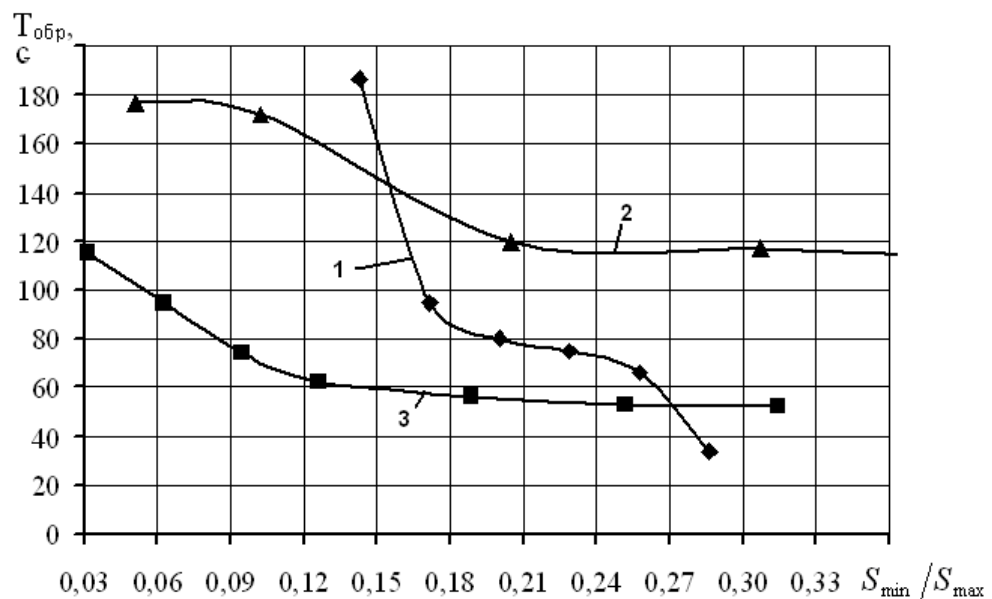


Рисунок 5.5 – Залежність часу обробки даних $T_{обр}$ для отримання розмірів площ поперечних перерізів в SolidWorks від відносини різниці між сусідніми поперечними площами перерізів деталі S_{min} та максимальної площі поперечного перерізу деталі S_{max} для штампувань 1-ї (1), 2-ї (2) та 3-ї (3) груп класифікатора [15]

а) кожна визначна криволінійна ділянка епюри площ перерізів з метою спрощення конструкції вальцювальних штампів та полегшення подальших розрахунків – замінюється за прямолінійною;

б) подібність обсягу прямолінійної ділянки епюри перерізів з обсягом відповідної криволінійної ділянки розрахункової поковки;

в) побудова плавних переходів (перехідних ділянок) між сусідніми ділянками епюри перерізів, для усунення можливості утворення затиснень під час вальцювання та подальшого штампування.

Відповідно до правил побудови [15], [63], користувач за епюрою перерізів задає кордони визначних ділянок, відзначаючи їх послідовним проставлянням точок, кількість яких заздалегідь задається в настройках. Після цього, програма автоматично будує епюри перерізів та діаметрів заготовки, що вальцюється. Користувач самостійно коригує геометрію епюри поперечних перерізів заготовки за допомогою використання даних за площами епюр перерізів штампованої поковки (V_{unn}) та заготовки, що вальцюється ($V_{вз}$). За цими даними відбувається розрахунок загальних параметрів заготовки, що вальцюється: площі перерізів визначних ділянок, об'єми ділянок, об'єм заготовки з урахуванням облою та усаджування, коефіцієнти витягування на кожній з ділянок, а також довжину та діаметр вихідної заготовки. Розрахований діаметр початкової заготовки спрощується до найближчого стандартного розміру прутка [19].

Епюра діаметрів розрахункової заготовки автоматично будується за відповідними переходами епюри перерізів заготовки, що вальцюється. Для коригування обсягу за ділянками розрахункової заготовки – ПМК відображає значення площі і діаметру середньої розрахункової заготовки в інформаційному вікні та будує їх на епюрах перерізів і діаметрів. Розмір поперечного перерізу початкової заготовки (F_0) в ПМК обирається за максимальною площею поперечного перерізу епюри заготовки, що вальцюється (F_{max}) з урахуванням втрати металу на угар δ (%) [63]:

$$F_0 = F_{max} \cdot \frac{100 + \delta}{100}, \quad (5.2)$$

Діаметр (d_0) або сторона квадрата початкової заготовки, спрощуються до найближчого більшого розміру сортового прокату за відповідним стандартом [19]. Після цього, розраховується довжина початкової заготовки та відбувається коригування довжини ділянок заготовки, що вальцюється, які не підлягають обтиску. У випадку, коли максимальний переріз виявляється з одного з кінців заготовки, для утримання заготовки кліщами в процесі вальцювання, дотримуються умови, за якою на ескізі діаметрів довжина ділянки з максимальним перерізом буде не менше 20 мм при $d_0 = 20...45$ мм; 30 мм при $d_0 = 50...80$ мм; 35 мм при $d_0 = 85...100$ мм.

Кінцевим підсумком роботи даного модуля є автоматично побудований ескіз діаметрів, який відповідає кресленням заготовки, що вальцюється.

5.2.3 Визначення кількості переходів та вибір системи калібрів

Для виготовлення необхідної фасонної заготовки може бути запропоновано, як правило, декілька варіантів технологічного процесу вальцювання. ПМК дозволяє користувачеві зробити вибір автоматизованого або ручного (табл. 5.1) варіанту процесу розрахунку.

Автоматизований вибір системи калібрів та кількості переходів здійснюється за рекомендаціями, що пройшли експериментальну і теоретичну перевірку та зведені до відповідного алгоритму [96], [154] (додаток Д3). Визначальними факторами для вибору в алгоритмі є [15]: максимальний коефіцієнт витягування (λ), ознака перерізу заготовки, що вальцюється уздовж осі (змінна або постійна), форма тарозміри деталі, що штампується, мінімізація кількості переходів та форма поперечних перерізів заготовки (овальна, ромбічна, квадратна або кругла).

З самого початку роботи алгоритму, визначається ознака перерізу заготовки, що вальцюється, уздовж осі. Після цього, виходячи із зазначених умов, визначається схема калібрування. За кожного конкретного випадка – пріоритет чинників під час вибору системи калібрів може змінюватися, тому формалізація процесу її вибору є недоцільною.

Таблиця 5.1 – Залежність значень максимально припустимого коефіцієнту витягування за різних схем калібрування від ознак перерізів заготовки уздовж осі

Переріз заготовки	Коефіцієнт витягування за схемами калібрування					
	1.1 кр-ов	2.1 кр-ов-кр	2.2 кр-ов-кв	2.3 кр-ов-р	3.1 кр-ов-р-кр	3.2 кр-ов-р-кв
Змінний переріз	2,0	3,8	4,5	4,2	4,3	6,0
Постійний переріз	1,8	2,5	3,3	3,1	3,9	4,3

5.2.4 Розрахунок систем калібрів

За розмірами заготовки, обчислюється обсяг та довжини її ділянок:

$$V = V_0 + V_1 + \dots + V_n = F_0 l_0 + 0,5 \cdot (F_0 + F_1) l_1 + \dots + 0,5 \cdot (F_{n-1} + F_n) l_n, \quad (5.3)$$

де $V_0 + V_1 + \dots + V_n$ - обсяги відповідних ділянок заготовки; $F_0 + F_1 + \dots + F_n$ - площі перерізів в місцях переходів між ділянками вальцювання; $l_0 + l_1 + \dots + l_n$ - довжини відповідних ділянок.

Вхідні дані для розрахунку параметрів, що визначають кожен з переходів – включають до себе площі поперечних перерізів на стиках елементарних ділянок та їх довжини (5.3). Визначення геометричних розмірів заготовки, що вальцюється, на всіх переходах з урахуванням розширення, випередження та зусилля вальцювання (рис. 5.6) відбувається за допомогою відповідних алгоритмів [15], [25], [96], [154]. За допомогою автоматизованого процесу проектування, криві залежностей різних коефіцієнтів розширення та випередження, що наведені в роботі у вигляді функціональних залежностей - за допомогою методики лінійної і нелінійної апроксимації, яка наведена в розділі 2.2.3, переводяться з табличних залежностей в поліноми n -го ступеня.

За вихідними даними комплексу, користувач отримує результат розрахунку системи калібрів: площі калібрів, поперечні і поздовжні розміри калібрів для визначних ділянок, робочі радіуси валків, розмір розширення та випередження при вальцюванні, центральні кути ділянок вальцювального штампа.

Визначення розмірів фактичного осередку деформування для деформування в гладких валках, відбувається за залежностями, наведеними у п. 3.1 та залежить від ступеня деформування та розмірів геометричного осередку деформування, які були внесені до бази даних комплексу. Залежності для визначення розмірів фактичного ОД для випадків вальцювання в інших системах калібрів окрім системи круг-овал наразі знаходяться на етапі дослідження та будуть додані до ПМК у наступних версіях.

5.2.5 Побудова тривимірних моделей вальцювальних секторів

Форма та розміри в технологічних переходах заготовки, що вальцюється, а також набір тривимірних параметризованих моделей вальцювальних секторів і вихідної заготовки в форматі SLDPRT – служать початковими даними для проектування рівчаків вальцювальних штампів (рис. 5.6). Побудова виконується з використанням значень параметрів, що отримуються за результатами розрахунків та побудов епюр та ескізів в третьому і четвертому модулях: ширини і висоти калібру, глибини врізу у валки, діаметру катаючого калібру, радіусів закруглення, розмірів вхідної ділянки.

Для побудови тривимірної моделі калібру, обирається тип калібру (овальний, квадратний, ромбічний або круглий). Після цього, відбувається інтеграція з системою SolidWorks, до якої передаються дані з розмірів обраного калібру. З використанням бібліотеки шаблонів вальцювальних секторів (рис. 5.7), які були попередньо побудовані, налаштовані та занесені до бази даних ПМК – виконується автоматична побудова параметризованих моделей за отриманими відповідними розмірами.

Ці моделі необхідні в подальшому для отримання програми з обробки калібрів на верстаті з числовим програмним управлінням. Також за допомогою тривимірних моделей секторів в програмах для моделювання процесів обробки металі тиском, здійснюється моделювання процесу вальцювання. Як наслідок моделювання - виконується коригування технологічних параметрів вальцювання та геометрії калібру. Цей підхід в роботі використовувався при виконанні теоретичних досліджень впливу розширення на позаконтактні зони.

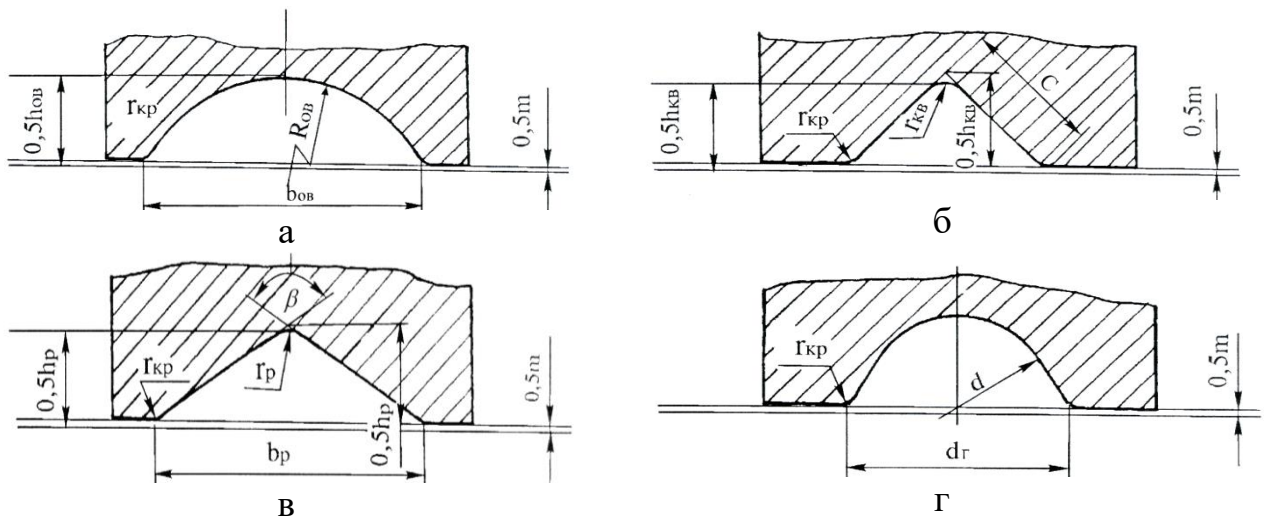


Рисунок 5.6 – Форма поперечного перерізу вальцювального штампу і його загальні розміри: овального (а), квадратного (б), ромбічного (в) та круглого (г) калібру

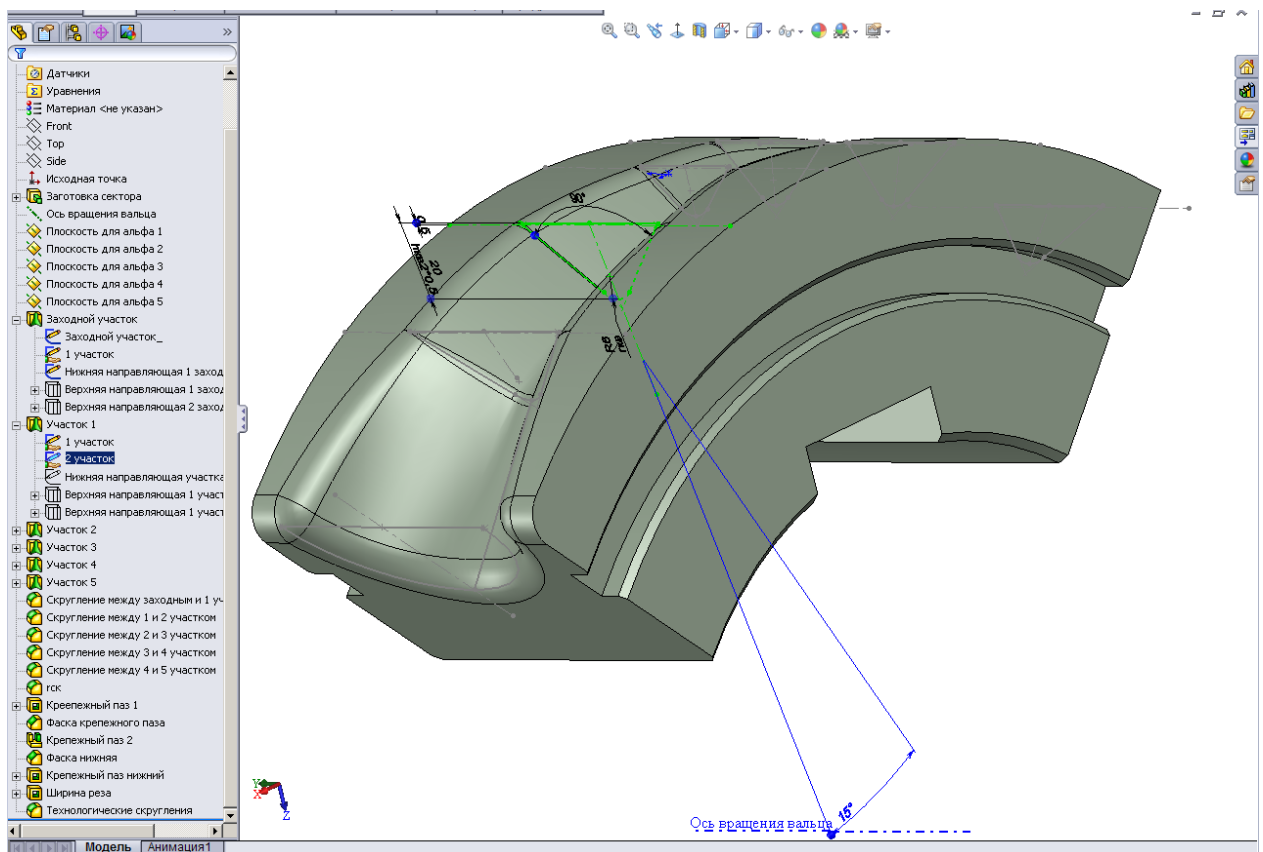


Рисунок 5.7 – Вальцювальний сектор, з розмірами, імпортованими з ПМК

Системне меню

файл Выполнить Рассчитать Построить Справка ←

Эпюра перетинів

Эпюра диаметров

Настройки

Точки эскиза сечений: 8

Тип исходной заготовки: Круглая

Масштабный коэф.: 1

Начальный шаг, м: 0,001

Плавность Slip, мм2: 1000

Сечения для расчета каллбров: 3

Объем заготовки: Укор = , Уиск = , Укор · Уиск = , Погрешность =

Усадочные размеры: Нет (selected), Алюминий 1%, Титан 0,7%, Сталь 1,4%

Облой и усадка: % облоя от объема детали: 15

Градус перехода между участками на эскизе сечений: 5

ГОСТ диаметров: 10

Добавить запись / Удалить / Добавить / Удалить

Данные расчета Экспорт данных в Excel Отображать маркеры

Панель налаштувань

Вікно для відображення результатів розрахунку ТП вальцювання

Массив String[]

001 сечение: X= 0,000 He=0,000

002 сечение: X= 1,500 He=329,138

003 сечение: X= 3,000 He=390,387

004 сечение: X= 4,500 He=411,902

005 сечение: X= 6,000 He=424,259

006 сечение: X= 7,500 He=430,273

007 сечение: X= 9,000 He=431,329

008 сечение: X= 10,500 He=431,329

009 сечение: X= 12,000 He=431,329

010 сечение: X= 13,500 He=431,329

011 сечение: X= 15,000 He=431,329

012 сечение: X= 16,500 He=431,329

013 сечение: X= 18,000 He=431,329

014 сечение: X= 19,500 He=431,329

015 сечение: X= 21,000 He=431,329

016 сечение: X= 22,500 He=431,329

017 сечение: X= 24,000 He=431,329

018 сечение: X= 25,500 He=431,329

019 сечение: X= 27,000 He=431,329

Рисунок 5.8— Головна віконна форма ПМК САПР ТП вальцювання

5.2.6 Інтерфейс проектування і збереження результатів

Головна віконна форма візуально розділена на чотири частини: перші дві використовуються для виведення графічних даних (епюр перерізів і діаметрів, ескізів перерізів і діаметрів). Третя частина призначена для відображення результатів розрахунку ТП вальцювання, результатів проміжних розрахунків та підказок за діями, що має виконувати користувач. Четверта частина являє собою панель налаштувань для розрахунку технологічного процесу вальцювання.

Через системне меню, розташоване на головній формі (рис. 5.8) користувач виконує: підключення бази даних діаметрів мірних заготовок, отриманих з сортового прокату [19]; розрахунок параметрів ТП вальцювання; побудову тривимірних моделей вальцювальних секторів і вихідної заготовки та виклик довідкової підсистеми. В меню ПМК є опції збереження розрахунків в текстовому і табличному вигляді.

5.3 Оцінювання обґрунтованої ефективності використання ПМК САПР ТП вальцювання

Оцінювати ефективність впровадження засобу автоматизованого розрахунку технологічного процесу вальцювання для підвищення показників виробничо-господарської діяльності підприємств, технологічні цикли яких включають операції вальцювання. На більшості таких підприємств для обрахунку технологічного процесу вальцювання та підготуванні моделі для обробки на станках з ЧПУ використовується не більше 4...5 осіб (табл. 5.2). Після впровадження САПР припускається, що весь обсяг такої роботи буде виконувати один працівник. Тому, річні експлуатаційні затрати до впровадження складатимуть:

$$OC_1 = \frac{\sum_i Z_i^1 * T_i^1}{Q} \cdot (1 + \alpha)(1 + \beta)12 = \frac{(11000 \cdot 5) \cdot 1,2 \cdot 1,3}{22} \cdot 12 = 46800 \text{ грн} \quad (5.4)$$

Таблиця 5.2 – Дані для розрахунку показників економічної ефективності

Показники	Поз- на- чення	Одиниця виміру	Розмір показника	
			До впрова- дження	Після впрова- дження
Заробітна платня технолога з ОМТ	Z	грн/міс	11000	14000
Використання праці технолога	T	люд./день	5	1
Заробітна плата розробника	Z ²	грн/міс	-	25000
Використання праці розробника	T ²	люд./день	-	1
Коефіцієнт накладних витрат	α		0,2	0,2
Коефіцієнт додаткової зарплати	β		0,3	0,3
Собівартість години роботи ПЕОМ	S _q	грн./год.	-	1,5
Час роботи ПЕОМ для вирішення за- дач	T _z	міс	-	10
Час роботи ПЕОМ на навчання, адап- тацію та налаштування обладнання	T	маш./рік	-	6
Коефіцієнт налаштування обладнання	γ		-	0,1
Тривалість розроблення	n	рік		0,5
Середня кількість робочих днів у міс.	Q	днів	22	22
Коефіцієнт інших витрат	h		0,1	0,1
Нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень	E _{псе}	-	-	0,3
Річні експлуатаційні витрати	OC	грн	46800	14445

Річні експлуатаційні витрати (C_{p2}) при використанні для розрахунків ПМК САПР ТП вальцювання складаються з річних витрат машинного часу на вирішення завдання ($C_1 = 12 \cdot \sum S \cdot T = 12 \cdot 1,5 \cdot 10 = 180$ грн), річних затрат ручної праці ($C_2 = \frac{(14000 \times 1) \times 1,2 \times 1,3}{22} \cdot 12 = 11913$ грн) та річних витрат на налаштування обладнання

та навчання персоналу ($C_3 = K_3 \cdot \gamma$), де K – річні затрати на навчання персоналу та налаштування обладнання $K_3 = K_{31} + K_{32} + K_{33}$:

$$\left. \begin{aligned} K_{31} &= \frac{\sum Z^2 \cdot T^2}{Q} (1 + \alpha) \cdot (1 + \beta) \cdot 12 = \frac{(25000 \cdot 1) \cdot 1,2 \cdot 1,3}{22} \cdot 12 = 21273 \text{ грн} \\ K_{32} &= 12 \cdot \sum S_q \cdot T = 12 \cdot 1,5 \cdot 6 = 108 \text{ грн} \\ K_{33} &= (K_{31} + K_{32}) \cdot h = 2138 \text{ грн} \end{aligned} \right\} (5.5)$$

Отже $K_3 = (21273 + 108 + 2138) \cdot 0,1 = 23519$ грн., тобто показник C_3 дорівнює 2352 грн. Річні експлуатаційні витрати $C_{p2} = 180 + 11913 + 2352 = 14445$ грн. Річна економія становить: $S = OC_1 - C_{p2} = 46800 - 14445 = 32355$ грн.

Одноразові витрати на створення та впровадження (K) складаються з витрат на проектування $K_1 = \frac{\sum Z^2 \cdot T^2}{Q} \cdot (1 + \alpha) \cdot (1 + \beta) \cdot n = \frac{(25000 \times 1) \times 1,2 \times 1,3}{22} \times 0,5 = 886$ грн, затрат на обладнання які за використання техніки, що є в наявності дорівнюють нулю ($K_2 = 0$), та затрат на навчання персоналу та налаштування обладнання (K_3). Отже $K = 886 + 0 + 23519 = 24405$ грн. Розрахунковий коефіцієнт економічної ефективності становить:

$$E_p = S/K = 32355/24405 = 1,326, \quad (5.6)$$

що є вищим за нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень $E_{нсе} = 0,3$. Термін окупності витрат на проектування становить:

$$T = 1/E_p = 1/1,326 = 0,75 \text{ р. (9 місяців)} \quad (5.7)$$

Висновки за розділом 5

Розроблено програмно-методичний комплекс автоматизованого розрахунку калібрів і створення тривимірних моделей вальцювальних секторів, функціональна частина якого виконана на мові програмування C#. Методика його роботи складається з наступних етапів: отримання значень площ поперечних перерізів штампова-

ної поковки; визначення параметрів вальцюваної заготовки; визначення числа переходів і вибір системи калібрів; розрахунок системи калібрів, зусилля і базисного тиску; побудова параметричних тривимірних моделей вальцювальних секторів і вихідної заготовки в САД-системі; підготовка та друк звіту за результатом розрахунку ТП вальцювання.

Розроблено діаграми послідовностей роботи програмно-методичного комплексу автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання для опису поведінкової моделі ПМК. Спроектовано інтерфейс ПМК автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання.

Прийнята математична модель розрахунку технологічного процесу вальцювання, що включає послідовність вирішення завдань проектування технологічного процесу. Дана модель також враховує вплив геометричних (вплив ПЗ) і температурних (вальцювання в умовах, наближених до ізотермічних) факторів. До математичної моделі було додано закономірності зміни різних параметрів процесу вальцювання - коефіцієнтів розширення та випередження, нерівномірності деформації за шириною калібру під час вальцювання в ньому заготовки.

Розроблено математичні моделі та алгоритми: розбиття тривимірної моделі штапованої поковки на елементарні ділянки по довжині; розрахунку площ поперечних перерізів і побудови епюр перерізів штапованої поковки; розмірів вихідної заготовки, вальцювальних калібрів, вибору числа переходів, які дозволяють скоротити цикл проведення проектних робіт, деталізувати модель процесу, прорахувати більшу кількість варіантів технологічного процесу.

У програмно-методичний комплекс додано алгоритми для розрахунку загальних параметрів технологічного оснащення (овальних, круглих, ромбічних і квадратних калібрів), що дозволяють виконувати перебудову параметричних моделей вальцювальних секторів. Реалізовано побудову технологічного оснащення в САД-системі у вигляді параметричних тривимірних моделей вальцювальних секторів та вихідної заготовки.

За розрахунком економічної ефективності впровадження САПР ПМК ТП вальцювання – річна економія складає 32355 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-технічне завдання щодо підвищення довговічності виробів подовженої форми із алюмінієвих сплавів на підставі визначення раціональних конструктивних, геометричних і фізико-механічних параметрів процесів гарячого вальцювання та їх комплексного впливу на технологічні ознаки виробів за допомогою дослідження механізму впливу позаконтактних зон заготовок, що вальцюються з алюмінієвих сплавів та наближених до ізотермічних умов деформування на розширення, для зниження нерівномірності в осередку деформування. За результатами досліджень були зроблені наступні висновки:

1. На підставі аналізу сучасного стану методів за визначення впливу різних технологічних параметрів на розширення під час вальцюванні, було знайдено наявність суттєвих відхилень, що отримуються за результатами експериментів, які були розраховані за раніше розробленими формулами розширення. Дані різняться через відсутність врахування впливу, що спричиняють позаконтактні зони та наближені до ізотермічних умов деформування, у методах розрахунків розширень. Загальна маса дослідників враховує вплив позаконтактних зон тільки під час оцінки енергосилових параметрів, що не може бути використано у випадку розрахунків геометричних розмірів заготовок, що вальцюються. Для наближених до ізотермічних умов деформування наразі не розрахований коефіцієнт придатний для використання в промислових розрахунках.

2. Розроблено методику розрахунку розширення, геометричних параметрів калібрів, коефіцієнту впливу позаконтактних зон та температурного коефіцієнту розширення за використанням апроксимаційних моделей при прокатуванні заготовок в гладких валках та вальцюванні циліндричних заготовок в овальних калібрах.

Оцінювання деформовності при гарячому вальцюванні щодо використаного ресурсу пластичності за критерієм Огороднікова, підтвердило - для заготовок, що вальцюються, відбувається заліковування дефектів у діапазоні деформацій $\varepsilon_{np} = 0,4 \dots 0,5$ за кривизни траєкторій деформування $d^2\eta/d\varepsilon_i^2 > 2$, яка властива для області позаконтактних зон.

Визначення розрахункових розмірів фактичного осередку деформування при вальцюванні, відбувається за обрахунком розміру поля швидкостей деформації, яке отримується у вигляді ізоліній що змінюються від 0 до 11 c^{-1} в меридіональному та горизонтальному перерізах заготовки, процес деформування якої моделюється у програмі QForm3D.

Для обчислень повного зусилля вальцювання та автоматизованому вибору за ним моделі кувальних вальців, визначений розмір поправного коефіцієнту відносно даних за сплавом АК6 та розраховано залежності для обчислення середнього питомого зусилля для сплавів АК8, АМГ і АМЦ за температур $t = 420^\circ\text{C}$ та 470°C .

3. Комп'ютерне моделювання процесу вальцювання прямокутних заготовок з позаконтактними зонами різної форми в гладких валках показало, найбільше розширення в тих заготовках, обсяг ПЗ яких рівномірно розподілений по всій ширині ПЗ (прямокутні) та перевищує в 2...4 рази розширення за найбільш нерівномірної трикутної ПЗ. Зі зростанням площі перерізу ПЗ з 50 до 200 мм^2 – зростає ступінь деформації за якої спостерігається утягнення з 10 до 40 % для трикутних та з 20 до 63% для прямокутних ПЗ. При великих обтисненнях - розширення центральних зон починає перевищувати утягнення та загальна ширина зразка збільшується по відношенню до вихідної ширини. Найкращі умови для деформування визначені за ступеня деформації 20...40 %, коли площа фактичного осередку деформування майже в 1,5...2 рази більше за геометричний.

Виявлено, що для операцій по вальцюванню заготовок циліндричного перерізу в гладких валках за ступенів деформації менших 40...50% – наявність позаконтактних зон знижує рівномірність напружено-деформованого стану в осередку деформування, що ускладнює течію металу в поперечному напрямку. За ступенів деформації 40...70% – у заготовках з ПЗ утворюється позаконтактна зона, що викликає появу поперечних сил зчеплення які гальмують поздовжню деформацію та сприяють поперечному витягуванню. Дослідження розмірів фактичного осередку деформування показали що в заготовках з ПЗ, до ступеня обтиску 23% – відсутня позаконтактна зона, та свідчать про найкращі умови деформування саме в цьому проміжку деформування.

Вимірювання розмірів розширення, після комп'ютерного моделювання процесу вальцювання, показали його зростання зі збільшенням кривизни калібру та діаметру заготовок під час вальцювання циліндричних заготовок в овальних калібрах. Встановлено, що в рекомендованих для вальцювання за схемою круг-овал інтервалах $1,25 < \lambda < 1,8$ - коефіцієнт впливу ПЗ на розширення ($K_{\text{уш.ов.}}^{\text{ПЗ}}$) становить 10...60% від розміру загального коефіцієнту нерівномірності деформування. Удосконалена залежність для розрахунку розміру розширення з урахуванням коефіцієнту впливу ПЗ, за впливом факторів зміни геометричних розмірів ПЗ та співвідношення розмірів калібру і заготовки, що вальцюється в ньому. Відносне відхилення величини розширення при розрахунку за удосконаленою формулою перевищує статистичну похибку в 10% при деформаціях з коефіцієнтом витягування $\lambda < 1,45$.

Для випадків вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів в умовах, наближених до ізотермічних – розроблені усереднені залежності для практичного застосування у виробництві, що дозволяють отримати температурний коефіцієнт розширення, за якими рекомендовано здійснювати визначення величини розширення в інтервалі температур нагріву вальцювальних штампів 250...350°C. Моделювання показало зниження нерівномірності розподілу температури між центральними та поза-контактними зонами на 5...20°C, що призводить до вирівнювання напружено-деформованого стану по всьому об'єму заготовки та збільшення розмірів фактичного осередку деформування на 3...5%. При вальцюванні циліндричних заготовок в гладких валках найкращі умови деформування спостерігаються при ступенях деформації 10...40% за найбільшого розміру фактичного осередку деформування.

4. Запропоновано методику прогнозування появи дефектів при гарячому штампуванні поковок із алюмінієвих сплавів в остаточному ривчакові після декількох операцій вальцювання та деформування в підготовчому ривчакові. Факт утворення дефекту за перевищення граничних умов побудови розмірів підготовчого ривчака, було перевірено на партії експериментальних деталей та показано, що за умов виконання методики можна отримувати на 95% бездефектне штампування. Надані рекомендації для забезпечення раціональних технологічних параметрів деформуючого інструменту та зниженню вимог до геометрії підготовчого ривчака.

5. Експериментальна перевірка впливу технологічних параметрів вальцювання на розширення та геометричні розміри деформуючого інструменту для різних груп типових представників заготовок з алюмінієвих сплавів, що вальцюються під штампування на кувальних вальцях, показала правомірність використання удосконалених аналітичних залежностей. Це спричиняє кращі умови деформування у центральних зонах заготовки, що вальцюється та кращій перерозподіл метал в калібрі, тим самим підвищуючи точність заповнення металом підготовчих рівчаків. Штампування в остаточному рівчаку у досліджуваної партії було виконане на 100% без наявності дефектів, що є на 10% вищим за попередні показники, та пройшло перевірку механічних властивостей заготовок, що вальцюються та отриманих з них штампунків на відповідність вимогам технічної документації: межа міцності $\sigma_B = 390 \dots 415$ МПа; відносне подовження $\delta = 16 \dots 19$ %. Для досліджуваної партії були зменшені норма витрати матеріалу вихідної заготовки на 11%, час технологічного підготування процесу на 55% та собівартість виготовлення штампунків на 8%, а також підвищено довговічність використання виробів на 10...15%.

6. Для впровадження результатів дослідження в навчальний та виробничий процеси, розроблено програмно-методичний комплекс автоматизованого розрахунку калібрів та створення тривимірних моделей вальцювальних секторів з урахуванням рекомендацій що забезпечують раціональні технологічні параметри. Результати роботи комплексу включають наступні етапи: отримання значень площ поперечних перерізів штампунків; визначення параметрів заготовки, що вальцюється; визначення кількості переходів та вибір системи калібрів; розрахунок системи калібрів; побудова параметричних тривимірних моделей вальцювальних секторів і вихідної заготовки в САД-системі.

Загальні практичні результати роботи були передані до освоєння на ПАТ ЕМСС та ПП НВЦ «Ухналь». Результати теоретичних та експериментальних досліджень та відповідні програми, впроваджені у вигляді навчального посібника авторів «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».

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 штапунов 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: Metallurgizdat, 1963.

[30] Е. Зибель, *Обработка металлов в пластическом состоянии: пер. с нем.* Москва, СССР: Metallurgizdat, 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: Metallurgizdat, 1961.

[33] Б. П. Бахтинов и М. М. Штернов, *Калибровка прокатных валков*. Москва, СССР: Metallurgizdat, 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. Зюзин, 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 1 (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. 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.

[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. Скрябин, В. І. Музичук та Л. В. Швець, «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. Швец, «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. Швец, *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. 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»*, № 50, с. 59 – 69, 2007. Доступ: <http://visnyk-mmi.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. Muflieux 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. Демиин, 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 University 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. Серета 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-deformiruemosti-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%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)

[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. Скрябин, 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.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

[1] 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». Машиностроение*, № 49, с. 18 - 22, 2006.

Автором виконано обробку та аналіз формул для визначення контактних площ різних систем калібрів.

[2] С. А. Скрыбин, 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. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://technological-systems.com.ua/ru/zhurnal/arkhiv-nomerov/2006/ts-36>

Автором виконано аналіз схем розбивки перехідної ділянки осередку деформування на елементарні перерізи.

[3] 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». Машиностроение*, № 50, с. 59 – 69, 2007. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://visnyk-mmi.kpi.ua/images/stories/pdf/50/59.pdf>

Автором проведено аналіз літературних джерел та здійснена оцінка переліку вимог до вибору послідовностей в алгоритмах вибору варіанту технологічного процесу вальцювання.

[4] С. А. Скрыбин 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. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://visnyk-mmi.kpi.ua/images/stories/pdf/50/192.pdf>

Автором виконано розрахунки розмірів розширення для різних розмірів та форм позаконтактних зон при вальцюванні прямокутних заготовок на гладких вал-

ках та проведений аналіз залежності їх розширення від ступеня деформації.

[5] С. А. Скрыбин, 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. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VDDMA/2008-3e14/pdf/24.pdf>

Автором виконано моделювання процесу вальцювання циліндричних заготовок в гладких валках та проаналізовано характер впливу на процес позаконтактних зон.

[6] С. А. Скрыбин 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)

Автором виконано розробку методики для теоретичного визначення розміру фактичного осередку деформування та розраховано його розміри при прокатці прямокутних заготовок з різними формами позаконтактних зон.

[7] С. А. Скрыбин, 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)

Автором проведено розрахунки з моделювання процесів двоперехідного вальцювання та подальшого штампування заготовок з використанням підготовчого рівчака, а також виконано аналіз напружено-деформованого стану для ідентифікації випадків появи дефектів.

[8] С. А. Скрыбин, 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)

Автором виконано обробку та аналіз даних за результатами виготовлення партії заготовок, що вальцюються подовженої форми..

[9] 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.

Автором виконані експериментальні дослідження на виробництві з вальцювання та кування партії заготовок першої групи типових представників, що вальцюються на кувальних вальцях.

[10] 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: зб. наук. праць*, с. 315 – 323, 2011.

Автором розроблено методику автоматизованої побудови епюри перерізів штампованої поковки та корегування якості її виконання в залежності від показників швидкості та точності.

[11] С. А. Скрябин, 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.

Автором розраховані показники напруженого стану та базисного тиску для випадків вальцювання різних алюмінієвих сплавів.

[12] 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)

Автором розроблено методику дослідження пластичності та визначення розміру базисного тиску за допомогою моделювання для випадків вальцювання різних алюмінієвих сплавів.

[13] С. А. Скрябин и Д. С. Чайка, «Исследование методов аппроксимации за-

висимостей коэффициентов уширения и опережения при вальцовке в калибрах», *Обработка материалов давлением: сб. науч. 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)

Автором було виконано апроксимацію експериментальних залежностей для визначення коефіцієнтів нерівномірності деформації для розширення та випередження при вальцюванні заготовок в калібрах за допомогою нелінійного оцінювання.

[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. [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)

Автором отримано залежності для визначення температурного коефіцієнта розширення та проведено аналіз змін температури осередку деформування при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів в умовах наближених до ізотермічних.

[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)

Автором досліджено вплив позаконтактних зон на розширення та основні параметри осередку деформування при вальцюванні циліндричних заготовок в овальних калібрах.

[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. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://tetapk.vsau.org/files/pdfa/4241.pdf>

[17] 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.

Автором розроблено концепцію програмно-методичного комплексу системи автоматизованого проектування технологічного процесу вальцювання.

[18] 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.

Автором розкрито фактори, що впливають на розширення та випередження при гарячому вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів в калібрах.

[19] 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. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2019/paper/view/6570>

[20] 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.

[21] 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.

Апробація результатів дисертаційної роботи
на міжнародних конференціях

1. Міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і перспективи розвитку процесів і машин обробки тиском в металургії і машинобудуванні» 21-29 квітня 2009 р., Краматорськ ДДМА, очна форма участі

2. Міжнародна науково-технічна конференція «Нові наукомісткі технології, устаткування і оснащення для обробки матеріалів тиском» 26-28 квітня 2010 р., Краматорськ ДДМА, очна форма участі

3. Міжнародна науково-технічна конференція «Нові наукомісткі технології отримання матеріалів і виробів підвищеної якості методами обробки тиском», 26-28 квітня 2011 р., Краматорськ ДДМА, очна форма участі

4. XV міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском», 23-26 квітня 2012 р., Краматорськ ДДМА, очна форма участі

5. XVI міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском», 23-26 квітня 2013 р., Краматорськ ДДМА, очна форма участі

6. XVII міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском», 22-25 квітня 2014 р., Краматорськ ДДМА, заочна форма участі

7. IV міжнародна науково-технічна конференція «Земля України - потенціал продовольчої, енергетичної та екологічної безпеки держави», 17-18 жовтня 2014 р., Вінниця: ВНАУ, заочна форма участі

8. XVIII міжнародна науково-технічна конференція «Досягнення і проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском», 21-24 квітня 2015 р., Краматорськ ДДМА, очна форма участі

9. I міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту», 13-15 травня 2019 р., Вінниця ВНАУ, заочна форма участі

ДОДАТОК Б

Криві деформаційного зміцнення алюмінієвих сплавів АМЦ, АМГ та АК8

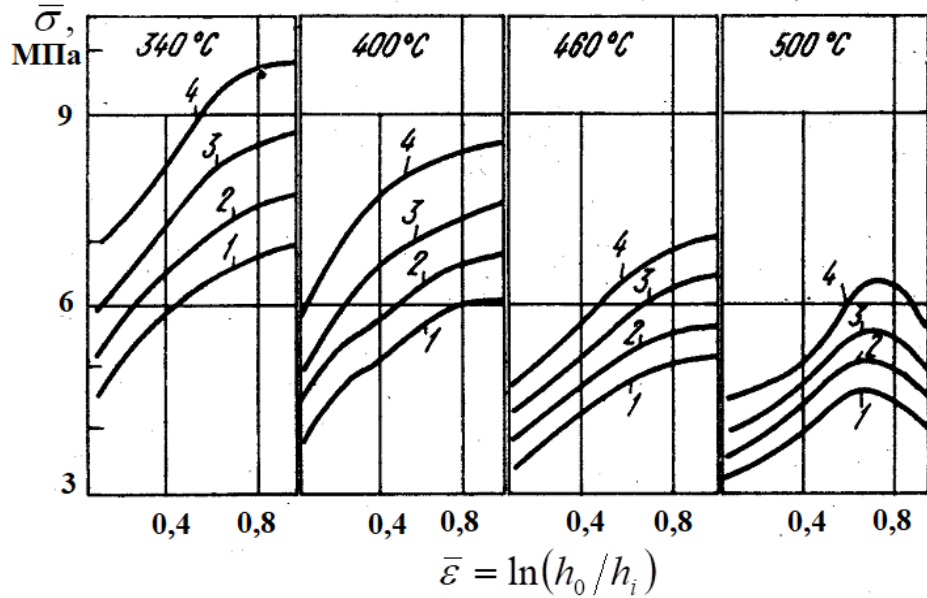


Рисунок Б.1 – Криві деформаційного зміцнення сплаву АМЦ [124]. Швидкість деформації, s^{-1} : 1 – 0,5; 2 – 5; 3 – 20; 4 – 60

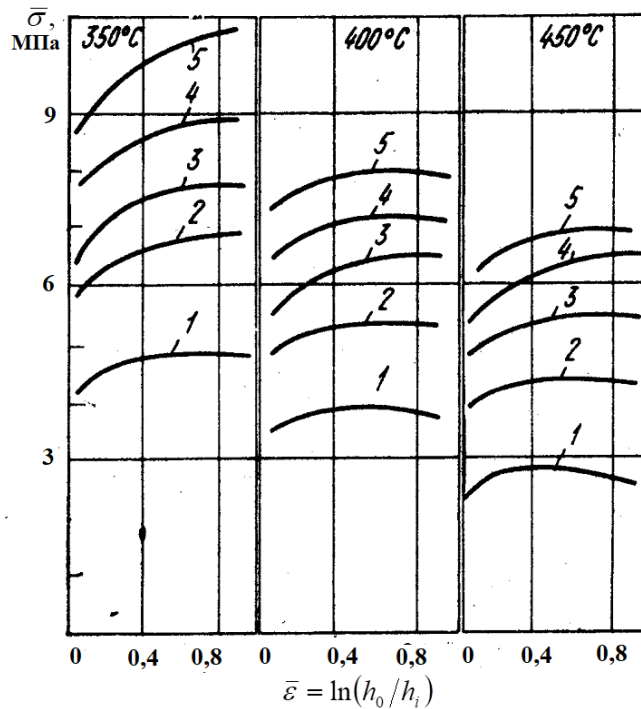


Рисунок Б.2 – Криві деформаційного зміцнення сплаву АМЦ [124]. Швидкість деформації, s^{-1} : 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

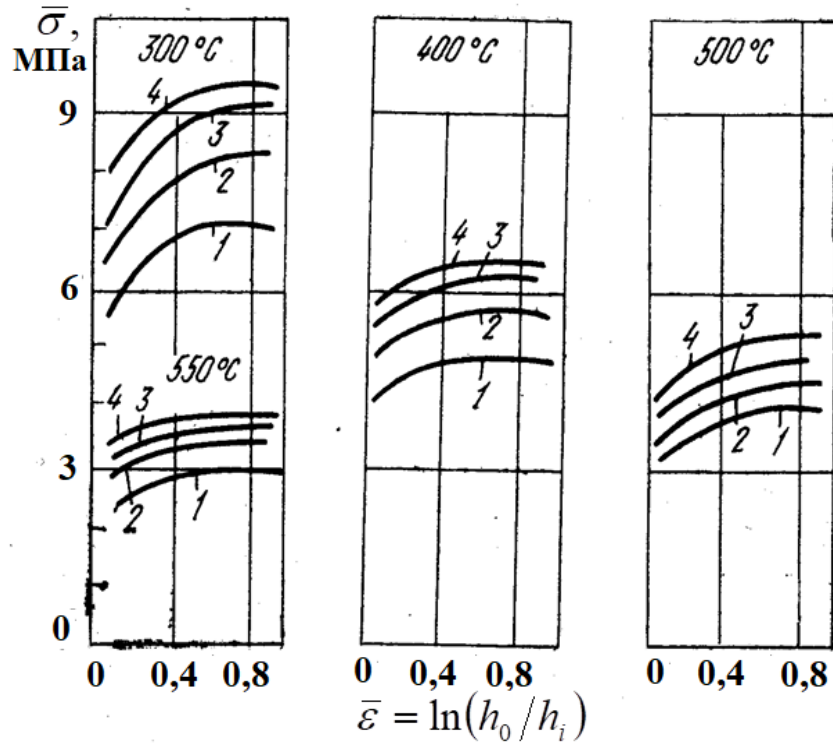


Рисунок Б.3 – Криві деформаційного зміцнення сплаву АМЦ [124] після холодного прокатування та отжигу. Швидкість деформації, s^{-1} : 1 – 2; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30

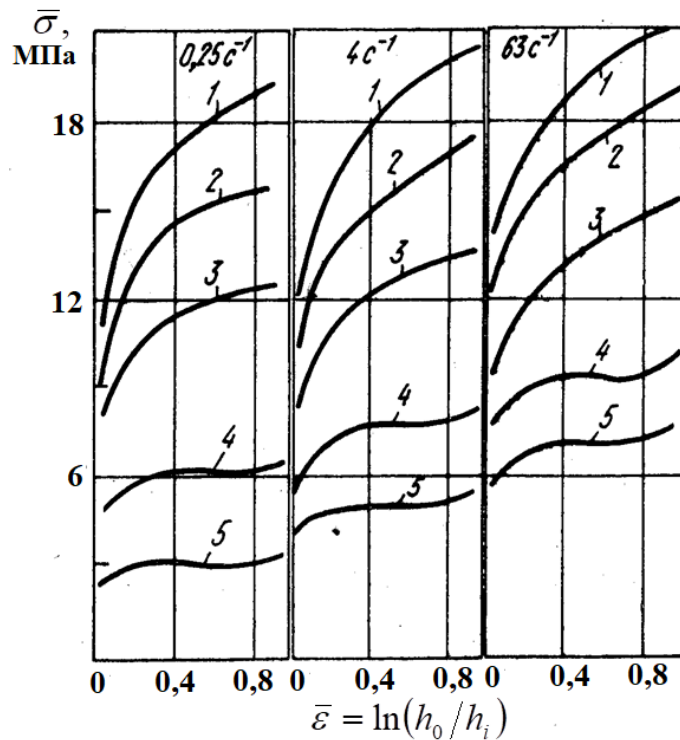


Рисунок Б.4 – Криві деформаційного зміцнення сплаву АМГ [124] після деформування та отжигу. Швидкість деформації, s^{-1} :

1 – 20; 2 – 120; 3 – 240; 4 – 360; 5 – 480

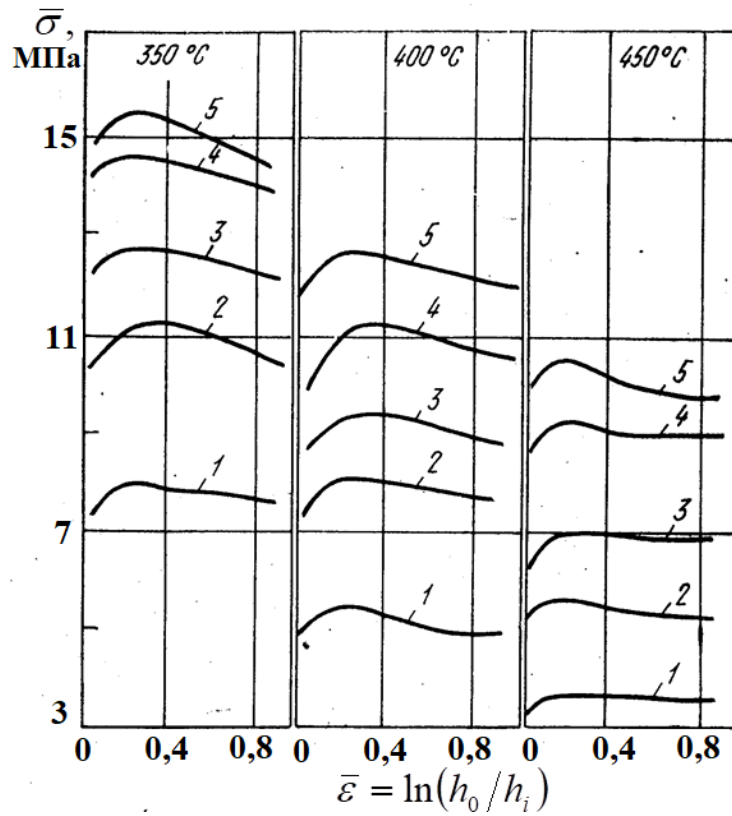


Рисунок Б.5 – Криві деформаційного зміцнення сплаву АК8 [124] після гарячого пресування та отжигу. Швидкість деформації, s^{-1} : 1 – 10^{-2} ; 2 – 1; 3 – 10; 4 – 100; 5 – 200

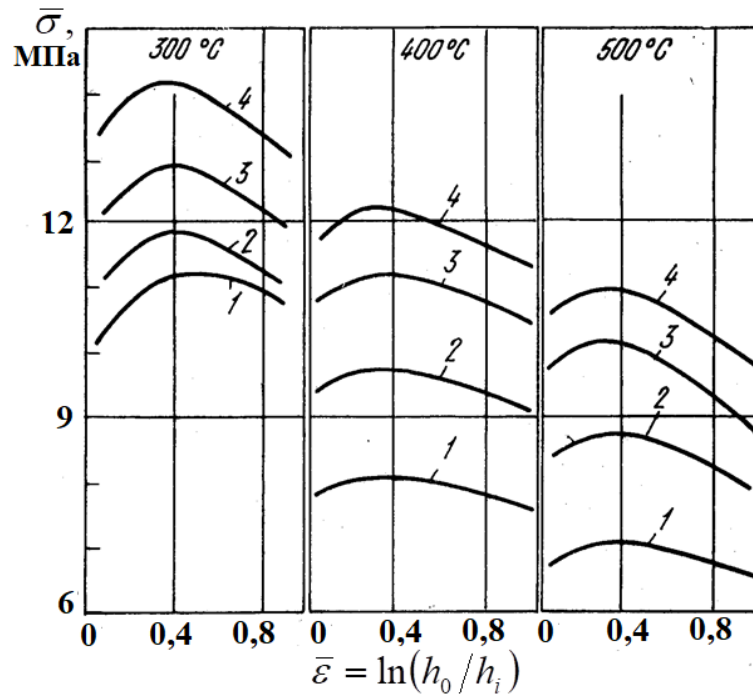


Рисунок Б.6 – Криві деформаційного зміцнення сплаву типу АК8 [124]. Швидкість деформації, s^{-1} : 1 – 1; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30

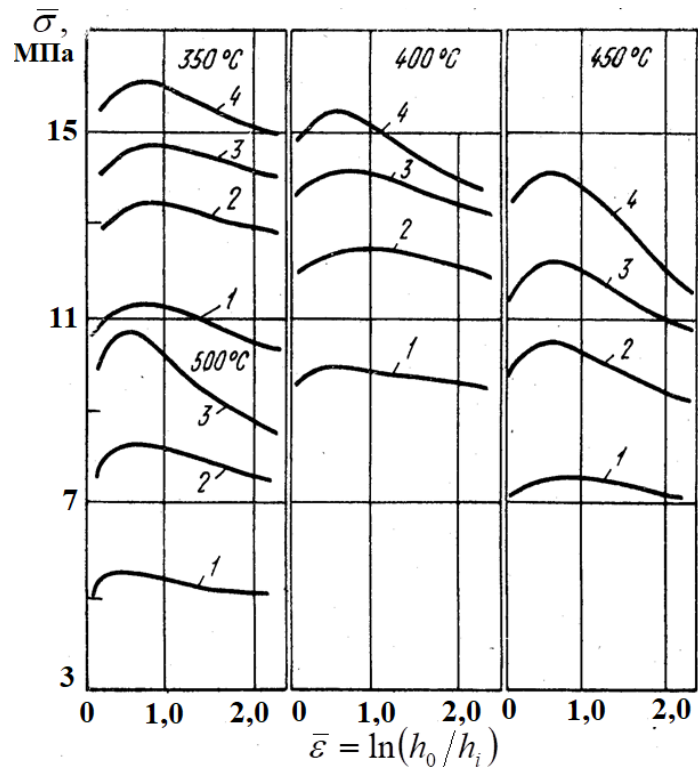


Рисунок Б.7 – Криві деформаційного зміцнення сплаву типу АК8 [124] в умовах плоского стиснення. Швидкість деформації, s^{-1} : 1 – 0,4; 2 – 9; 3 – 101; 4 – 311

ДОДАТОК В

Послідовність розрахунку в MathCad використаного ресурсу пластичності в області позаконтактних зон під час вальцювання заготовок алюмінієвого сплаву АК6

Матриці з даними за накопиченого ступеня деформації, опору деформуванню та середній напрузі для точки, що трасується для діаметру заготовки ф65

$$\begin{array}{lll}
 T55 := & \text{B3_d65_1.55.xls} & T65 := \text{B3_d65_1.65.xls} & T3 := \text{B3_d65_1.45.xls} \\
 T4 := & \text{B3_d65_1.75.xls} & T5 := \text{B3_d65_1.25.xls} &
 \end{array}$$

0 – степінь_деформації_ε_i
 1 - опір деформуванню σ_s
 2 – середня_напрута_σ

Кількість точок у матрицях

$$i := 1..24 \quad k := 1..30 \quad n := 1..40 \quad m := 1..40 \quad p := 1..53$$

Показник напруженого стану = 3σ/σ_i для всіх кроків точки, що трасується (крива зміцнення)

$$\begin{array}{lll}
 \eta_{55}_i := 3 \cdot \frac{(T55^{(2)})_i}{(T55^{(1)})_i} & \eta_{65}_k := 3 \cdot \frac{(T65^{(2)})_k}{(T65^{(1)})_k} & \eta_{3}_m := 3 \cdot \frac{(T3^{(2)})_m}{(T3^{(1)})_m} \\
 \eta_{4}_n := 3 \cdot \frac{(T4^{(2)})_n}{(T4^{(1)})_n} & \eta_{5}_p := 3 \cdot \frac{(T5^{(2)})_p}{(T5^{(1)})_p} &
 \end{array}$$

діаграма пластичності

$$\begin{array}{l}
 \varepsilon_{pr} := \begin{pmatrix} 0.23 \\ 0.35 \\ 0.43 \\ 0.6 \\ 0.74 \\ 0.95 \\ 1.07 \\ 1.16 \\ 1.33 \\ 1.54 \\ 1.99 \end{pmatrix} \quad \eta_a := \begin{pmatrix} 0.84 \\ 0.49 \\ 0.35 \\ 0.129 \\ 0.03 \\ -0.07 \\ -0.12 \\ -0.14 \\ -0.19 \\ -0.24 \\ -0.36 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Регресія діаграми пластичності

$$vs := \text{regress}(\eta_a, \varepsilon_{pr}, 3)$$

Поліном третього ступеня, що апроксимує залежність vs

$$D(x) := \text{interp}(vs, \eta_a, \varepsilon_{pr}, x)$$

$$x := -4, -3.5..4 \quad \varepsilon := 0, 0.05..1.$$

$$D1_{(x)} := 0.81 + (-1.998) \cdot x + 3.084 \cdot x^2 + (-1.817) \cdot x^3$$

$$vs = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ 0.81 \\ -1.998 \\ 3.084 \\ -1.817 \end{pmatrix}$$

T55 =

	0	1	2
0	0	46.01	-6.29
1	0.01	47.9	-2.06
2	0.01	48.22	-2.16
3	0.01	51.95	0.51
4	0.02	54.53	1.97
5	0.02	58.19	6.08
6	0.03	61.17	6.53
7	0.05	63.37	8.08
8	0.07	66.62	9.56
9	0.1	69.04	9.67
10	0.13	69.16	11.2
11	0.17	71.31	9.82
12	0.21	70.89	11.19
13	0.24	70.63	10.35
14	0.29	69.68	7.1
15	0.33	68.21	6.57
16	0.37	65.49	4.74
17	0.41	64.76	3.15
18	0.45	63.97	0.26
19	0.49	62.92	-7.97
20	0.53	60.99	-18.45
21	0.56	59.85	-30.74
22	0.59	56.4	-30.9
23	0.61	53.77	-29.36
24	0.62	49.63	-23.51

T65 =

	0	1	2
0	0	45.12	-2.38
1	0.01	46.98	-4.58
2	0.01	49.05	-2.96
3	0.01	51.58	-1.2
4	0.01	52.74	1.16
5	0.02	55.46	3.58
6	0.02	57.33	4.39
7	0.03	59.53	4.28
8	0.04	62.9	5.99
9	0.06	64.25	7.23
10	0.08	65.9	8.8
11	0.1	67.59	9.98
12	0.12	69.95	7.98
13	0.15	70.3	8.35
14	0.18	71.41	4.5
15	0.21	72.14	1.03
16	0.26	70.51	1.02
17	0.3	70	-2.64
18	0.33	69.96	8.57
19	0.37	68.07	8.82
20	0.41	66.64	9.71
21	0.45	65.67	4.01
22	0.5	65.34	-1.48
23	0.54	63.61	-3.69
24	0.59	64.17	-10.11
25	0.64	62.46	-12.84
26	0.68	61.08	-14.87
27	0.71	60.58	-32.79
28	0.74	58.77	-40.33
29	0.76	55.39	-29.63
30	0.77	50.36	-17.58

Визначення коефіцієнтів поліному залежності показника напруженого стану від степеня деформації

$$vse55 := \text{regress}(T55^{(0)}, \eta55, 7)$$

$$\eta55o(\epsilon) := \text{interp}(vse55, T55^{(0)}, \eta55, \epsilon)$$

$$vse75 := \text{regress}(T4^{(0)}, \eta4, 7)$$

$$\eta75o(\epsilon) := \text{interp}(vse75, T4^{(0)}, \eta4, \epsilon)$$

$$vse25 := \text{regress}(T5^{(0)}, \eta5, 7)$$

$$\eta25o(\epsilon) := \text{interp}(vse25, T5^{(0)}, \eta5, \epsilon)$$

	0
0	3
1	3
2	7
3	-0.151
4	20.614
5	-300.364
6	$2.387 \cdot 10^3$
7	$-1.078 \cdot 10^4$
8	$2.697 \cdot 10^4$
9	$-3.457 \cdot 10^4$
10	$1.756 \cdot 10^4$

Вектор стовпець коефіцієнтів поліному vse

$$\eta55(\epsilon) := -0.151 + 20.614 \cdot \epsilon - 300.364 \epsilon^2 + 2.387 \cdot 10^3 \cdot \epsilon^3 + (-1.078 \cdot 10^4 \cdot \epsilon^4) + 2.697 \cdot 10^4 \cdot \epsilon^5 + (-3.457 \cdot 10^4 \cdot \epsilon^6) + 1.756 \cdot 10^4 \cdot \epsilon^7$$

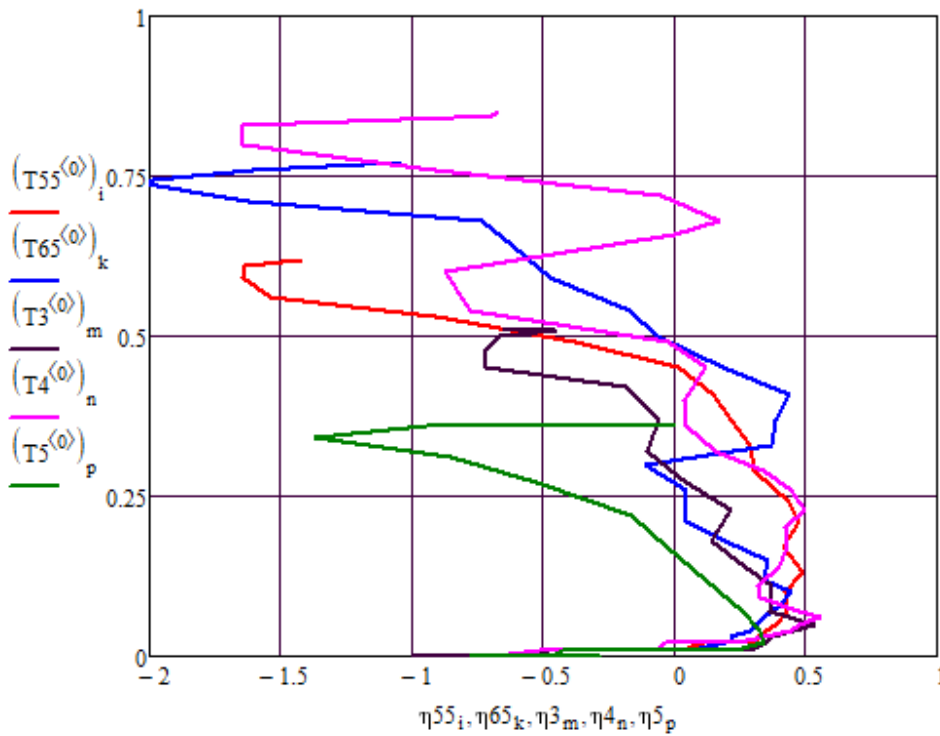


Рисунок В.1 – Шляхи деформування вальцюванні заготовки діаметром 65 мм для точок, що трасуються, які знаходяться в позаконтактній зоні за коефіцієнтів витягування $\lambda = 1,25; 1,45; 1,55; 1,65$ та $1,75$

Гранично допустима ступінь деформації зсуву

$$E_{pr}(\varepsilon) := 0.81 + (-1.998) \cdot \eta_{550}(\varepsilon) + 3.084 \cdot \eta_{550}(\varepsilon)^2 + (-1.817) \cdot \eta_{550}(\varepsilon)^3$$

Умова деформовності без руйнування $\Psi(E) < 1$

Накопичена деформація до кінця процесу формозміни

$$a := 0.2$$

$$E := 0, 0.05.. 1$$

Теорія Колмогорова

$$\Psi_k(E) := \int_0^E \frac{1}{E_{pr}(\varepsilon)} d\varepsilon$$

Теорія Огороднікова

$$\Psi_o(E) := \int_0^E \frac{\left(1 + a \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{\eta_{550}(\varepsilon)}{\varepsilon}\right)\right) \cdot \frac{a \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{\eta_{550}(\varepsilon)}{\varepsilon}\right)}{\varepsilon}}{\left(\frac{E_{pr}(\varepsilon)}{\sqrt{3}}\right) \left(1 + a \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{\eta_{550}(\varepsilon)}{\varepsilon}\right)\right)} d\varepsilon$$

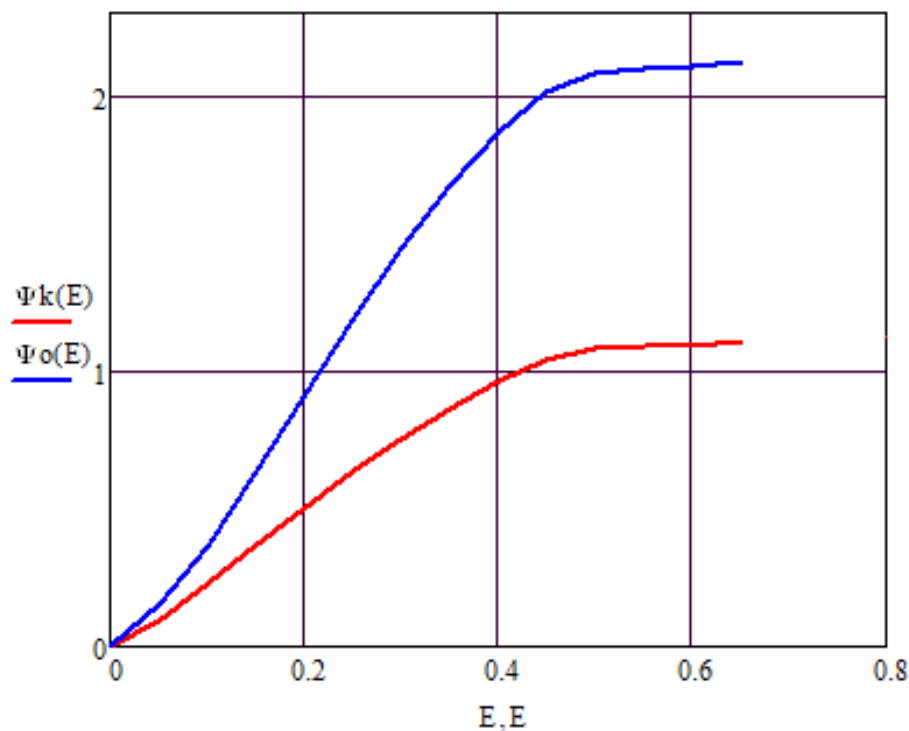


Рисунок В.2 – Зміна використаного ресурсу пластичності по ходу деформації при вальцюванні заготовки діаметром 65 мм за коефіцієнта витягування $\lambda = 1,75$

Траєкторія деформування

$$f_{55}(\varepsilon) := \frac{d^2}{d\varepsilon^2} \eta_{55o}(\varepsilon) \quad f_{75}(\varepsilon) := \frac{d^2}{d\varepsilon^2} \eta_{75o}(\varepsilon) \quad f_{25}(\varepsilon) := \frac{d^2}{d\varepsilon^2} \eta_{25o}(\varepsilon)$$

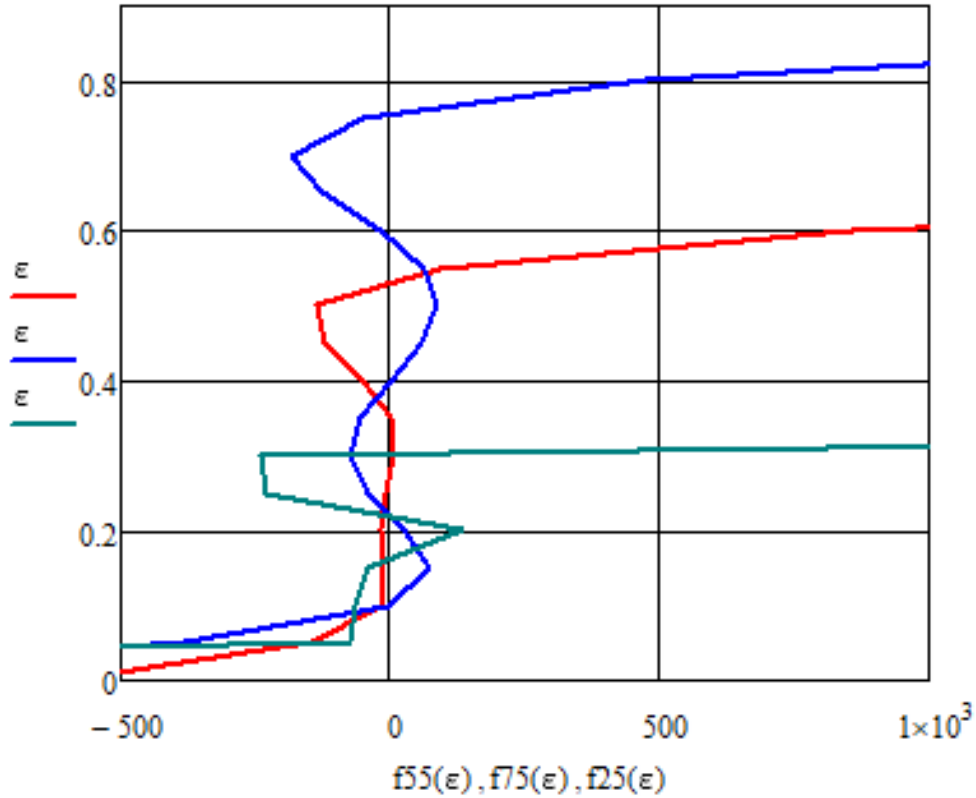
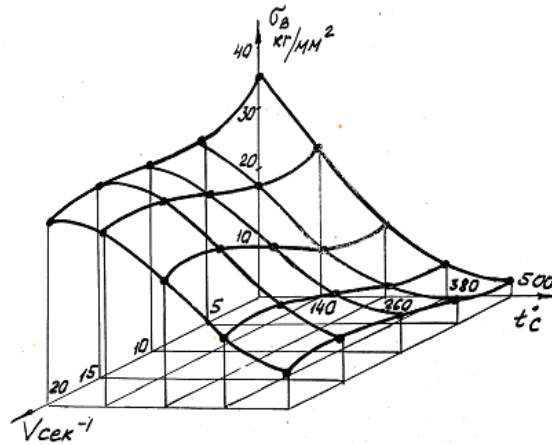


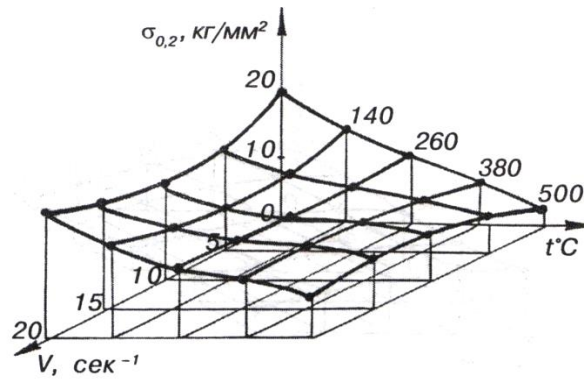
Рисунок В.3 – Зміна кривизни траєкторії деформування по ходу деформування в точках, що знаходяться в області позаконтактних зон під час вальцювання заготовки діаметром 65 мм за коефіцієнта витягування $\lambda = 1,75$

ДОДАТОК Г

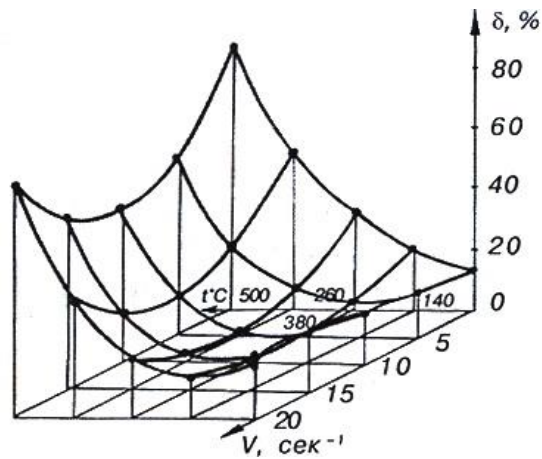
Пластичність і опір деформації алюмінієвих сплавів в деформованому стані



а

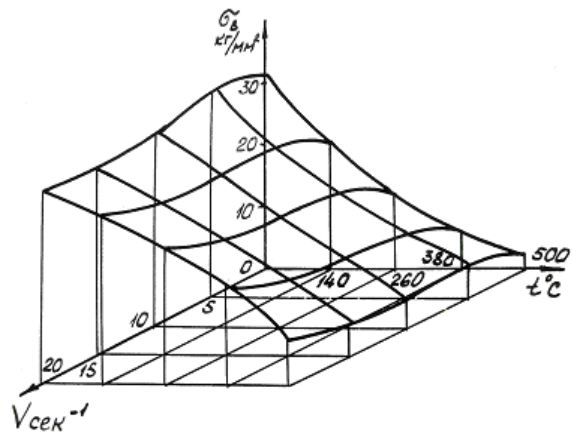


б

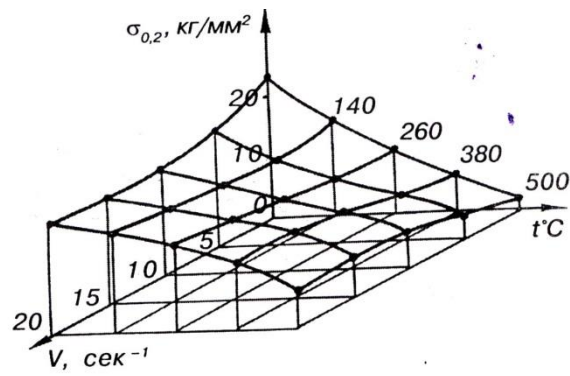


в

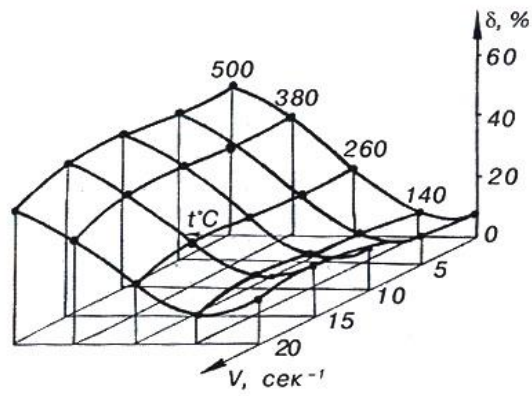
Рисунок Г.1 – Сплав АК6: а) межа міцності, б) межа текучості, в) відносне подовження



а

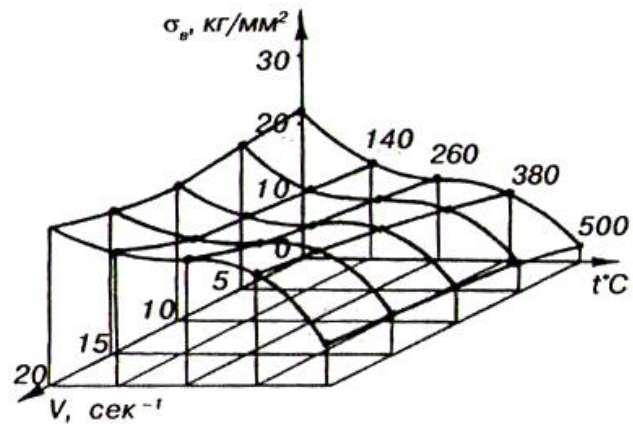


б

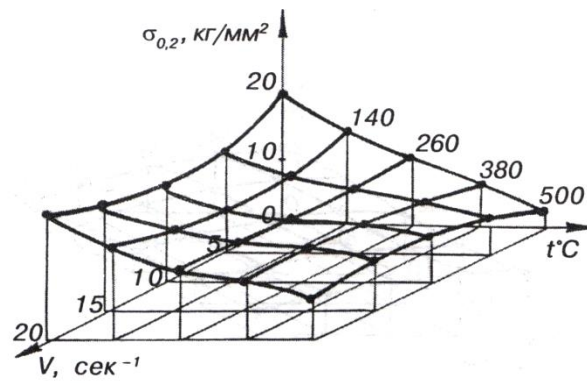


в

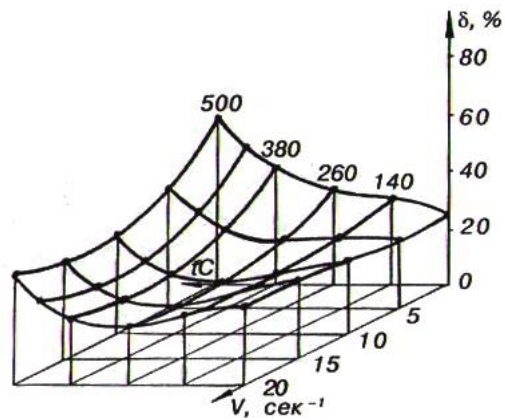
Рисунок Г.2 – Сплав АК8: а) межа міцності, б) межа текучості, в) відносне подовження



а



б



в

Рисунок Г.3 – Сплав АМГ: а) межа міцності, б) межа текучості, в) відносне подовження

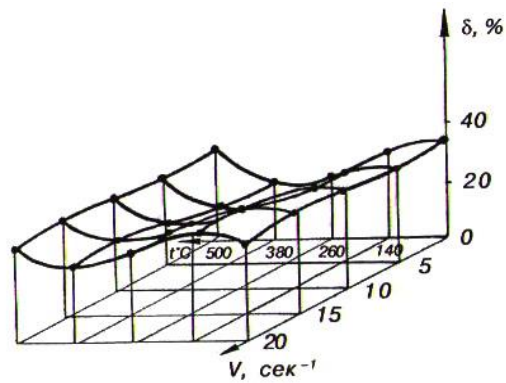
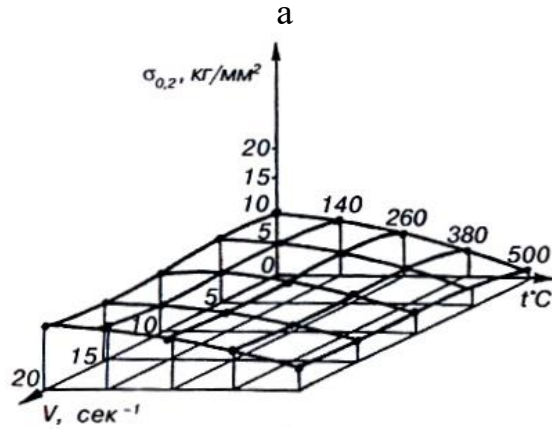
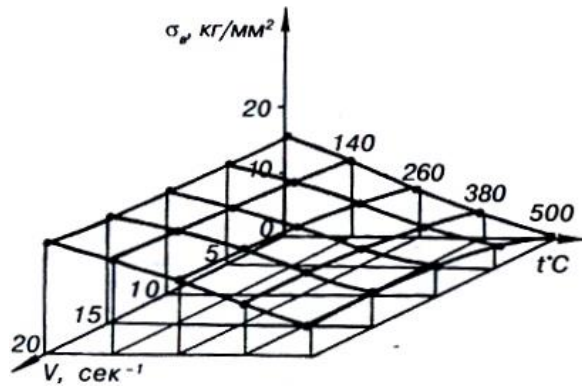


Рисунок Г.4 – Сплав АМЦ: а) межа міцності, б) межа текучості, в) відносне подовження

ДОДАТОК Д

Алгоритми для розрахунків в ПМК САПР ТП вальцювання

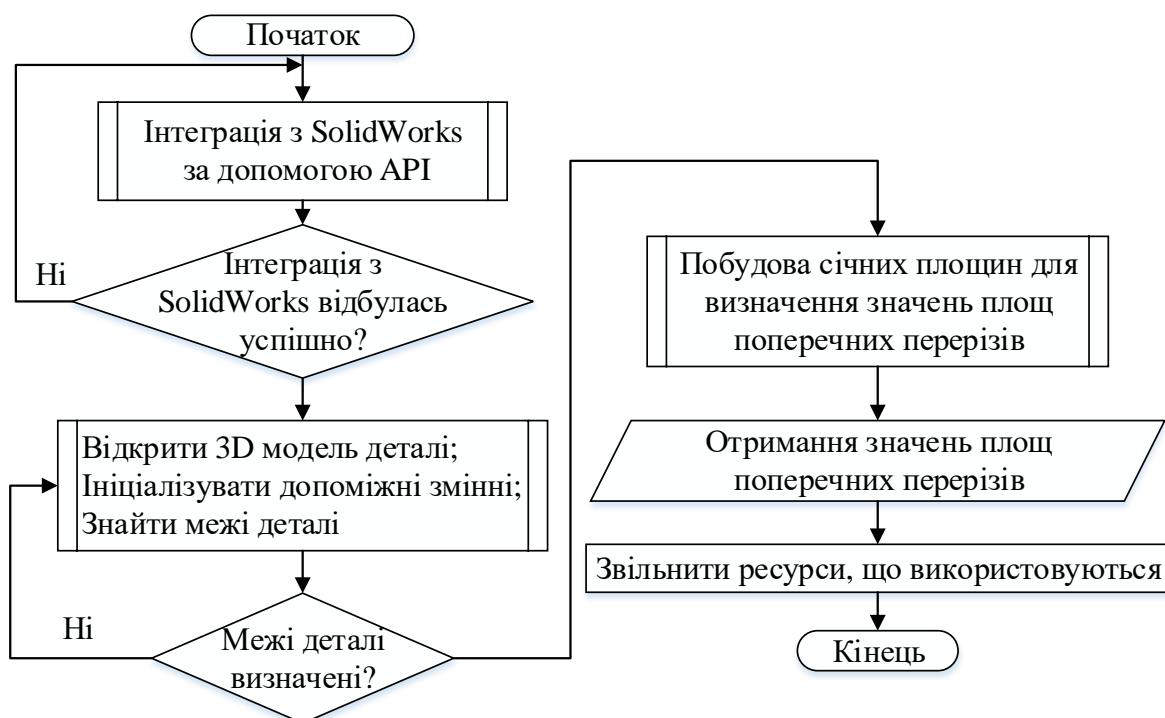


Рисунок Д.1 – Алгоритм послідовності взаємодії ПМК САПР ТП вальцювання з CAD SolidWorks

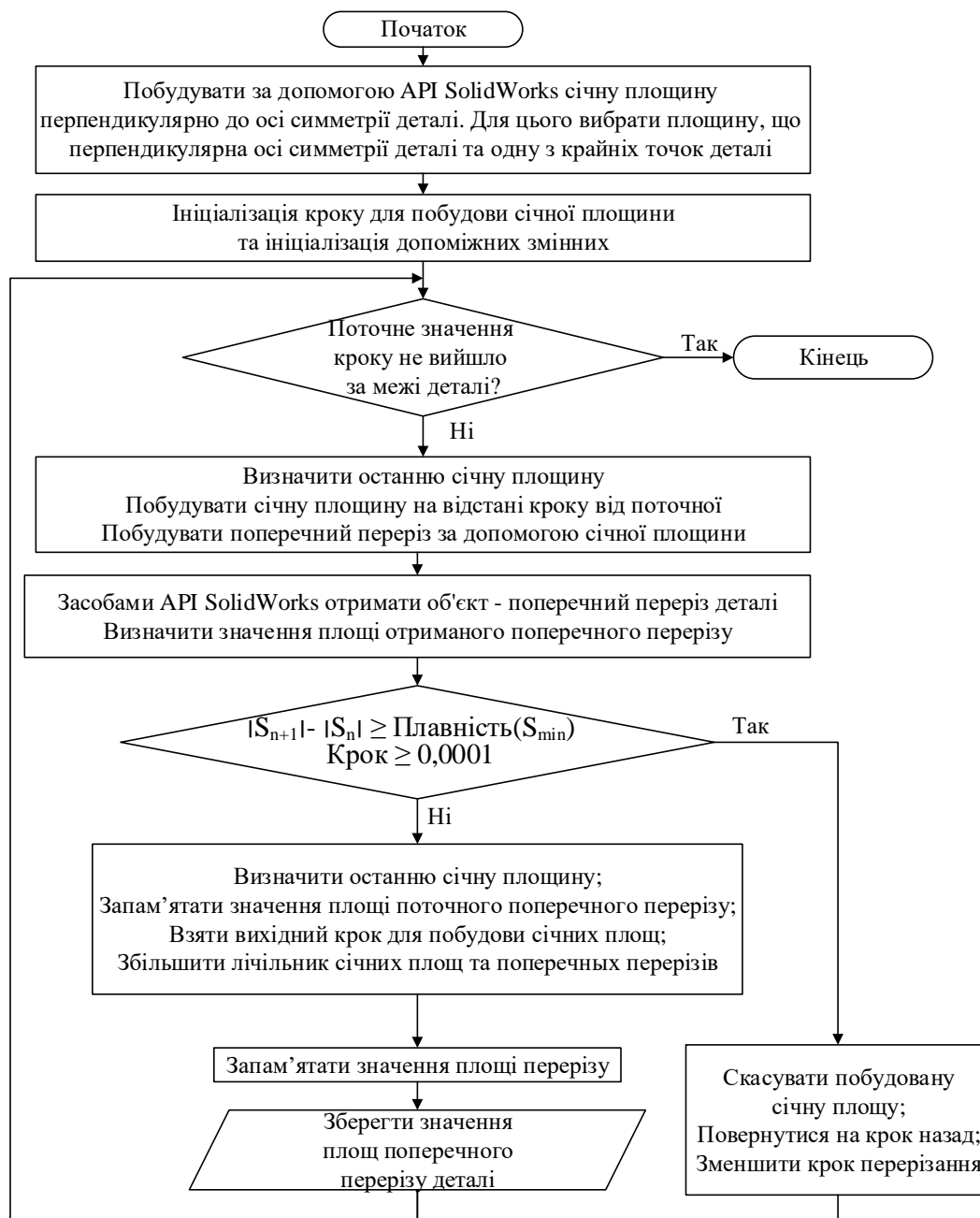


Рисунок Д.2 – Алгоритм визначення значень площ поперечних перерізів дета-

лі

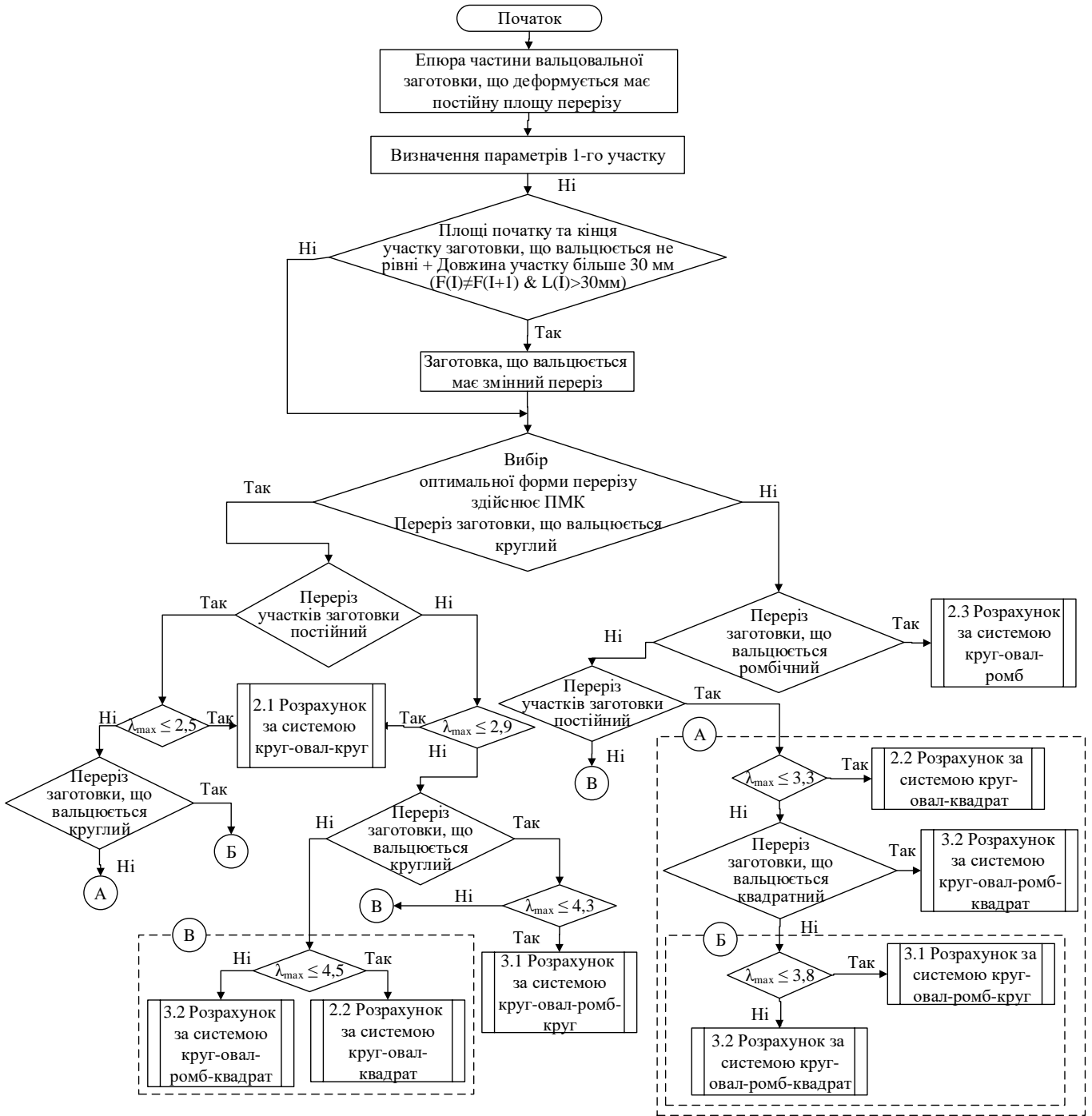


Рисунок Д.3 – Структурна схема дерева рішень для вибору системи калібрів

ДОДАТОК Е

Акти впровадження результатів роботи

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ»

Место нахождения:
г.Краматорск, Донецкая область, Украина, 84306
Почтовый адрес:
г.Краматорск, Донецкая область, Украина, 84306
Телефон: (06264) 6-01-32
Факс: (06264) 6-55-67
ОКПО: 00210602
№ свидетельства: 100336168
Email: central@emss.dn.ua
Сайт: www.emss.ua

№ _____
На № _____ от _____

ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ
ТОВАРИСТВО
«ЕНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ»

Місце знаходження:
м.Краматорськ, Донецька область, Україна, 84306
Поштова адреса:
м. Краматорськ, Донецька область, Україна, 84306
Телефон: (06264) 6-01-32
Факс: (06264) 6-55-67
ЄДРПОУ: 00210602
№ свідоцтва: 100336168
Email: central@emss.dn.ua
Сайт: www.emss.ua

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Технічний директор
ПАТ «Енергомашспецсталь»
_____ О.А. Селютін
« 26 » червня 2017 р.



АКТ

про використання результатів
дисертаційної роботи Чайки Дмитра Сергійовича
на з ПАТ «Енергомашспецсталь» (м. Краматорськ)

Актуальність розробки та впровадження сучасних маловідходних технологічних процесів обробки металів тиском на ПАТ «Енергомашспецсталь» зумовлена високою трудомісткістю процесу, тривалим циклом виготовлення якісних заготовок та задачами по вдосконаленню металосберігаючих технологій.

Дисертаційна робота Чайки Д.С. має за мету підвищення точності отримання заготовок за рахунок перспективних алгоритмів математичних моделей розрахунку процесу гарячого деформування. На підставі проведених досліджень та створених моделей, були виявлені шляхи удосконалення технологій деформування, що використовуються на підприємстві та запропоновано ряд заходів щодо поліпшення процесу формоутворення виробів.

Отримані результати, мають значний теоретичний та практичний інтерес і були запропоновані для використання на етапі моделювання операцій обробки тиском складних заготовок на ПАТ «Енергомашспецсталь».

Представники ПАТ
«Енергомашспецсталь»:

Заступник технічного директора з
підготовки виробництва

В.Ю. Станков

Начальник відділу
ковальського виробництва, к.т.н.

О.І. Лобанов

«УХНАЛЬ»

Науково-виробничий центр

02002, м. Київ, вул. Флоренції, 10а, офіс 17, т. (044) 517-75-94

Р/р 26009026431241 в Печерському відділенні Київської міської філії АКБ «Укрсоцбанк», МФО 322012

Акт впровадження результатів

Процесів вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів»

Технологія гарячого вальцювання – це процес деформації, який має свої особливості, які пов'язані з нерівномірністю деформування. В результаті цього процесу отримують фасонні заготовки з площами поперечних перетинів максимально наближеними до розміру та форми штампованих кувань. Широкому застосуванню технологічних процесів вальцювання значно заважає недосконалість алгоритмічної основи методик проектування та засоби їх реалізації. Тому застосування ручних способів проектування у зв'язку з надто великою трудомісткістю розрахунків не дозволяє враховувати вплив багатьох істотних факторів на характер протікання процесу вальцювання (зокрема вплив позаконтактних зон, досліджений в роботі). Це призводить до необхідності проведення достатньо трудомісткого та тривалого доведення спроектованого технологічного процесу, який найчастіше опиняється не оптимальним.

Розроблена Чайкою Д.С. автоматизована система розрахунку калібрів для вальцювання та створення трьохвимірних моделей вальцювальних секторів, дає можливість проводити повністю автоматизовану розробку технологічного процесу вальцювання та вальцювальних секторів. Це значно сприяє підвищенню ефективності за рахунок: суттєвого зменшення трудомісткості та циклу проведення проектних робіт, підвищення продуктивності праці конструкторів та технологів, прискорення та зниження вартості технологічної підготовки, підвищення точності виготовлення вальцювальних заготовок та інструмента, прорахунку більшої кількості варіантів технологічного процесу.

Генеральний директор,
д.т.н., проф.



С.О. Скрябін

Скрябін С.О.



Міністерство освіти і науки України

Донбаська державна машинобудівна академія

вул. Шкадінова, 72, м. Краматорськ, Донецька обл., 84313. E-mail: dgma@dgma.donetsk.ua
Тел. (0626) 41-68-09. Факс (0626) 41-63-15. Web: <http://www.dgma.donetsk.ua>. Код ЄДРПОУ 02070789

04.04.19 № 013-05/513 На № _____ Від _____

Для спеціалізованої вченої ради

ДОВІДКА

**про впровадження результатів дисертаційного дослідження на здобуття
вченого ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.03.05
«Процеси та машини обробки тиском» Чайки Дмитра Сергійовича**

Результати досліджень дисертаційної роботи Чайки Дмитра Сергійовича на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском», використовуються в навчальному процесі на кафедрах «Обробка металів тиском» та «Комп'ютеризовані дизайн і моделювання процесів і машин» при викладанні дисципліни «Гаряч об'ємне штампування», де використані запропоновані здобувачем підходи до підвищення точності розрахунку підготовчих операцій вальцювання, а також автоматизовано методику розрахунку параметрів процесу вальцювання та створення тривимірних моделей заготовки та інструменту за допомогою мови програмування C#. Матеріали дисертаційної роботи використані також під час написання навчального посібника «Методика автоматизованого проектування технологічного процесу та 3D-моделей калібрів для вальцювання».

Перший проректор ДДМА

А.М. Фесенко

Завідувач кафедри
«Комп'ютеризовані дизайн
і моделювання процесів і машин»

О.Є. Марков

