

ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

*Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису*

ШЕВЦОВ СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.774.72.002(043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БАЛОНІВ НА
ОСНОВІ КОМБІНУВАННЯ РОТАЦІЙНОГО ОБКОЧУВАННЯ
ІНСТРУМЕНТОМ ТЕРТЯ З ПІДСАДКОЮ ДНИЩА**

Спеціальність 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

_____ (С. О. Шевцов)

Науковий керівник

д. т. н., професор

Марков Олег Євгенійович

Краматорськ – 2018

АНОТАЦІЯ

Шевцов С. О. Удосконалення технології виробництва балонів на основі комбінування ротаційного обкочування інструментом тертя з підсадкою днища. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском». – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2018.

Особливе місце серед виробів відповідального призначення займають тонкостінні деталі з дном. Ці вироби мають специфічну форму та виготовляються з пустотілої заготовки. Одним із шляхів підвищення якості та зниження витрат на виготовлення днищ є розробка й впровадження у виробництво удосконалених способів виготовлення заготовок з дном на основі комбінування операцій обкочування та підсадки сферичного днища інструментом тертя (ІТ).

Мета дисертаційної роботи – підвищення якості днищ балонів та ємностей з трубчастих заготовок на основі комбінування ротаційного обкочування інструментом тертя з підсадкою днища.

Об'єкт досліджень – технологічний процес виготовлення днищ балонів ротаційним обкочуванням інструментом тертя.

Предмет досліджень – закономірності формозміни, параметри енергосилового, напружено-деформованого та теплового стану заготовки при комбінуванні обкочування та підсадки сферичного днища інструментом тертя.

Теоретичні дослідження НДС реалізовані на основі використання методів оболонки, верхньої оцінки та методу скінчених елементів (МСЕ). Підтвердження формозміни заготовки та закриття осьового отвору у процесі обкочування та підсадки сферичного днища проводили експериментом у промислових умовах. При обробці результатів експериментів застосовувалися методи математичної статистики. Вірогідність наукових положень, ви-

сновків і рекомендацій забезпечена дотриманням відповідних сучасних методик при проведенні експериментів і підтверджена відповідністю експериментальних даних з результатами теоретичних розрахунків. Новизна роботи отриманих результатів полягає в наступному:

Встановлена гомологічна температура нагрівання трубної заготовки, що забезпечує достатній рівень температури у процесі обкочування. Встановлено параметри НДС у процесі ротаційного обкочування сферичних днищ інструментом тертя залежно від співвідношень товщини стінок, величини подачі, температури нагрівання трубної заготовки. Доведено закономірності впливу ступеня підсадки інструментом тертя після обкочування на НДС, енергосилові параметри процесу, товщину та ступінь зварювання стінок днища. Отримали подальший розвиток закономірності формоутворення днища трубної заготовки після обкочування та підсадки в залежності від величини подачі, відносної товщини стінки, температури нагрівання та ступеня підсадки.

У результаті дисертаційної роботи запропоновані та розроблені наступні практичні результати:

На основі літературного огляду досліджень процесів і оснащення для виготовлення днищ балонів з трубних заготовок встановлено, що ефективним способом їх отримання є тангенціальне обкочування ІТ.

Новий спосіб тангенціального обкочування сферичних днищ інструментом тертя з використанням операції підсадки плоским інструментом. Методика проектування технологічних процесів обкочування інструментом тертя. Рекомендації для проектування нових технологічних процесів обкочування, механічні режими деформування й підсадження.

Розроблено методику теоретичного дослідження МСЕ обкочування сферичних днищ ІТ з підсадкою, яка дозволяє встановити НДС металу пустотілої заготовки в процесі обкочування ІТ та підсадки з урахуванням нерівномірного температурного поля в об'ємі заготовки. Це дозволило знизити матеріальні витрати при проведенні експериментальних досліджень на 70 %.

Для перевірки отриманих теоретичних результатів розроблено методику експериментальних досліджень. Розроблена методика дозволила встановити базові показники якості днищ сталевих заготовок, оцінити ступінь закриття та заварювання осьового отвору труби та встановити макро- та мікроструктуру металу днища.

Проведені теоретичні дослідження процесів обкочування та підсадки сферичних днищ пустотілих заготовок із різними геометричними параметрами дозволили встановити ефективні технологічні діапазони для виготовлення бездефектних днищ. Рациональна гомологічна температура нагрівання пустотілих заготовок перед тангенціальним обкочуванням ІТ повинна складати $0,8T_{\text{гг}}$. Цієї температури достатньо для заварювання стінок отвору днища та виключення перегрівання та перепалення металу днища. Відносна довжина подачі заготовки в ІТ перед обкочуванням (l/D) повинна становити $0,9 \dots 0,95$ для повного закриття отвору днища. Відносна товщина пустотілої заготовки (D/s) повинна знаходитись у межах $15 \dots 20$ для зниження об'ємів напусків на внутрішню поверхню днища.

Встановлено НДС металу днища у процесі комбінування обкочування та підсадки. Було встановлено, що максимальна інтенсивність деформацій виникає в зоні переходу сферичного днища в циліндричну частину труби. При підсадці у зовнішніх шарах днища переважають стискаючі напруження, а у внутрішніх шарах – розтягуючі. При ступені підсадки до 15 % рівень стискаючих напружень на зовнішній поверхні днища підвищується, а при збільшенні – починає зменшуватись. До ступеня підсадки 15 % днище має плоский торець, подальше підсадження призводить до появи увігнутої форми днища, що призводить до появи розтягуючої компоненти напружень на внутрішній поверхні. Це призводить до розкривання осьової лунки днища та зменшенні її глибини. Підсадка призводить до збільшення товщини стінки днища. Інтенсивно збільшення товщини відбувається до ступеня підсадки 15 %.

Встановлено, що осьова сила при оформленні сферичності днища стрічко зростає, при цьому відбувається зниження радіальної та тангенціальної компонент сили обкочування. У процесі підсадки закономірності сили від ступеня деформації мають лінійну залежність. Підсадка днища характеризується лінійним збільшенням крутного моменту при підвищенні ступеня обтискання. Величина крутного моменту підсаки нижче моменту обкочування. Робота на підсадження у 2 ... 2,5 рази вища, ніж на обкочування. У процесі обкочування вживана потужність підвищується. Потужність підсадження на 25 % більша ніж обкочування та має лінійну залежність від ступеня деформації.

Результати експериментальних досліджень підтвердили данні скінчено-елементного моделювання. Відхилення теоретичних даних з формозміни заготовки від експериментальних не перевищує 12...15 %, що дозволяє зробити висновок про достовірність встановлених технологічних рекомендацій з термошвидкісних умов обкочування ІТ та підсадки, отриманих на основі МСЕ. Було встановлено, що максимальне збільшення товщини днища відбувається при його підсадки у діапазоні 15...20 %. Макроструктурний аналіз осьових дефектів днищ з різним ступенем підсадки дозволив встановити, що максимальна товщина стінки днища набирається при підсаджуванні на 15 %. Підсаджування сферичного днища більш ніж на 15 % по висоті призводить до зменшення глибини лунки осьової зони, але при цьому збільшується її діаметр, що призводить до появи розтягувальної радіальної компоненти напружень і, як наслідок, розтягування неметалевих включень.

Узагальнено дані теоретичних і експериментальних досліджень для проектування і впровадження нових технологічних процесів тангенціального обкочування ІТ із застосуванням операції підсадки сферичного днища. Розроблено практичні рекомендації та методика для обкочування та підсадки днищ. Встановлено, що для бездефектного обкочування днищ ІТ доцільно використовувати відносну подачу трубної заготовки в ІТ величиною 0,925 з підсадкою 15 ... 20 %.

Апробовані та впроваджені у НДІ «УкрНДІМеталургмаш» та на ПрАТ «НКМЗ» новий технологічний процес тангенціального обкочування із застосуванням підсадки сферичного днища плоским інструментом. Виготовлені вироби відповідали технічним умовам замовника. Для нових технологічних процесів обкочування підвищено якість осьової зони днища. Отримані результати металографічних досліджень підтверджують високу ефективність схеми обкочування днищ із підсаджуванням на заварювання внутрішніх дефектів. Менше ніж 6 % отриманих днищ перевищують вимоги стандарту за розмірами внутрішніх дефектів. Нові технологічні процеси обкочування підвищили якість продукції, що випускається, за рахунок підвищення щільності металу осьової зони днища, що забезпечило зниження браку на 20...30 %. Механічні властивості деталей підвищилися в середньому на 9...14 %. Запропоноване технічне рішення захищено патентом України (№ 86619).

Ключові слова: обкочування, підсадка, сферичне днище, інструмент тертя, подача, ступінь підсадки, температура нагріву, напружено-деформований стан, метод скінчених елементів.

ABSTRACT

Shevtzov S. O. Improvement of production technology of balloons on the basis of a combination of rotational spinning by a friction tool with bottom upsetting. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the candidate of technical science degree, specialty 05.03.05 – Processes and Machines of plastic working. Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk. 2018.

Thin-walled parts with a bottom occupy a special place among the products of responsible use. These products have a specific shape and are made from a hollow billet. One of the ways to improve the quality and reduce the cost of making bottoms is the development and introduction into production of improved ways of manufacturing blanks with a bottom on the basis of a combination of the spinning and the upsetting of the spherical bottom by a tool of friction.

The purpose of the thesis is to improve the quality of the bottoms of cylinders and containers from tube billets on the basis of combining rotational spinning with a tool of friction with upsetting of a bottom.

The object of research is the technological process of manufacturing the bottoms of cylinders by rotating spinning the friction tool.

The subject of the research is the patterns of shaping, the parameters of the energy-intensive, stressed-strain, and thermal state of the billet under combined spinning and the upsetting of a spherical bottom by a friction tool.

Theoretical studies of stress-strain state are implemented on the basis of the use of shell methods, the upper bound and the finite element method (FEM). Confirmation of the shaping of the workpiece and the closing of the axial hole during the spinning and the upsetting of the spherical bottom carried out the experiment under industrial conditions. When processing the results of experiments, methods of mathematical statistics were used. The reliability of scientific provisions, conclusions and recommendations is ensured by observance of appropriate modern

techniques in carrying out experiments and confirmed by the agreement of experimental data with the results of theoretical calculations. The novelty of the work is as follows:

The homologous temperature of the heating of the pipe blank is established, which ensures a sufficient temperature level during the spinning. The parameters of stress-strain state in the process of rotating spinning of spherical bottoms by the friction tool are determined depending on the ratio of the wall thickness, the feed amount, and the temperature of the tube billet heating. The regularities of the influence of the degree of impingement by the tool of friction after spinning on stress-strain state, the energy-force parameters of the process, the thickness and degree of welding of the walls of the bottom are proved. The patterns of forming the bottoms of the pipe billet after spinning and upsetting have been further developed depending on the feed rate, the relative wall thickness, the heating temperature, and the degree of upsetting.

As a result of the thesis, the following practical results were proposed and developed:

Based on the literature review of research processes and equipment for the manufacture of bottoms of cylinders from pipe billets found that an effective way to obtain them is the tangential spinning by the friction tool.

A new way of tangential spinning of spherical bottoms by a friction tool using the operation of upsetting with a flat tool. Technique of designing the technological processes of spinning with the friction tool. Recommendations for the design of new technological processes of spinning, mechanical modes of deformation and upsetting.

A method for theoretical study of the FEM of the spinning of spherical bottoms by the friction tool with a upsetting has been developed, which allows to determine the stress-strain state of a hollow billet metal in the process of spinning of and upsetting by the friction tool, taking into account the uneven temperature field in the volume of the billet. This made it possible to reduce material costs in conducting experimental studies by 70%. To test the theoretical results obtained, a

methodology for experimental studies has been developed. The developed technique allowed to establish the basic parameters of the quality of the bottoms of steel billets, to estimate the degree of closing and welding of the axial hole of the pipe and to establish the macro- and microstructure of the bottom metal.

Conducted theoretical studies of the spinning and upsetting processes of the spherical bottoms of hollow billets with various geometric parameters allowed to establish effective technological ranges for the production of defect-free bottoms. The rational homologous temperature of heating hollow billets before the tangential spinning by the friction tool should be $0,8T$. This temperature is sufficient for welding the walls of the bottom hole and avoiding overheating of the bottom metal. The relative length of the workpiece feed in the by the friction tool before spinning (l / D) should be 0.9 ... 0.95 to completely cover the bottom hole. The relative thickness of the hollow billet (D / s) must be in the range of 15 ... 20 to reduce the volume of the seams on the inner surface of the bottom.

The stress-strain state of the metal of the bottom is established in the process of combining the spinning and upsetting. It was found that the maximum intensity of deformation occurs in the zone of transition of the spherical bottom into the cylindrical part of the tube. When replenishing in the outer layers of the bottom, compressive stresses predominate, and in the inner layers, tensile stresses prevail. With a degree of upsetting up to 15%, the level of compressive stresses on the outer surface of the bottom increases, and with increasing – begins to decrease. Up to the degree of upsetting 15% of the bottom has a flat end, further upsetting leads to a concave shape of the bottom, which leads to the appearance of tensile stress components on the inner surface. This leads to the opening of the axial socket of the bottom and a decrease in its depth. The upsetting leads to an increase in the thickness of the bottom wall. An intensive increase in thickness occurs to a degree of upsetting of 15%.

It is established that the axial force at the formation of the sphericity of the bottom sharply increases, while the radial and tangential components of the spinning force decrease. In the process of upsetting, the laws of force on the degree of

deformation have a linear dependence. The bottom upsetting is characterized by a linear increase in the torque with an increase in the degree of deformation by the spinning. The value of the torque of the upsetting is below the spinning torque. Work on the upsetting is 2 ... 2.5 times higher than on the spinning. During the spinning, the power expended is increased. The power of the upsetting is 25% greater than the spinning and has a linear dependence on the degree of deformation.

The results of experimental studies confirmed the data of finite element modeling. The deviation of the theoretical data from the shaping of the billet from the experimental billets does not exceed 12 ... 15%, which makes it possible to conclude that the established technological recommendations on the thermo-speed conditions of spinning and upsetting by the friction tool obtained on the basis of FEM are reliable. It was found that the maximum increase in the thickness of the bottom occurs when upsetting in the range of 15 ... 20 %. Macro-structural analysis of axial defects of the bottoms with different degrees of upsetting allowed to establish that the maximum thickness of the bottom wall is dialed by a 15% upsetting. The upsetting of the spherical bottom by more than 15% in height leads to a decrease in the depth of the hole in the axial zone, but at the same time its diameter increases, which leads to the appearance of tensile radial stress components and, as a result, the extension of nonmetallic inclusions.

The data of theoretical and experimental studies for the design and implementation of new technological processes of tangential spinning by the friction tool with the application a upsetting operation of the spherical bottom are summarized. Practical recommendations and methods for spinning and upsetting bottoms have been developed. It is established that for the defect-free spinning of the bottoms by the friction tool it is advisable to use the relative feed of a pipe billet in the friction tool of 0.925 with a 15 ... 20 % upsetting.

The new technological process of tangential spinning with the use of upsetting the spherical bottom of a flat tool has been approved and implemented at the Research Institute "UKRNDIMETALURGMASH" and at the CJSC "NKMZ".

The manufactured products corresponded to the specifications of the customer. The quality of the axial zone of the bottom is improved for new technological processes. The results of metallographic studies confirm the high efficiency of the scheme of spinning of the bottoms with the upsetting on the welding of internal defects. Less than 6 % of the bottoms received exceed the requirements of the standard for the size of internal defects. The new technological processes of spinning increased the quality of the products due to the increase in the metal density of the axial zone of the bottom, which resulted in a decrease in rejects by 20 ... 30%. The mechanical properties of the parts have increased by an average of 9 ... 14%. The proposed technical solution is protected by the Ukrainian patent (No. 86619).

Keywords: spinning, upsetting, spherical bottom, friction tool, feed, degree of upsetting, heating temperature, stress-strain state, finite element method.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1 Шевцов С. О. Удосконалення технології виробництва днищ балонів на основі обкочування інструментом тертя з підсадкою : монографія / С. О. Шевцов, О. Є. Марков, О. М. Кулік. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – 128 с. ISBN 978-966-379-836-3.

2 Особливості процесу виготовлення пустотілих поковок з буртом та фланцем / О. Є. Марков, М. С. Косилов, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // *Mechanics and Advanced Technologies*. – Київ : КПІ, 2017. – № 2. – С. 85–91. – DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109575>

3 Аналіз формозміни та деформованого стану пустотілої ступінчастої поковки в процесі розкочування / О. Є. Марков, М. С. Косилов, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // *Mechanics and Advanced Technologies*. – Київ : КПІ, 2017. – № 3. – С. 47–53. – DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.115224>

4 Паламарчук В. О. Аналіз роботи деформування заготовок при ротаційній обкатці інструментом тертя / В. О. Паламарчук, С. О. Шевцов // *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : межвузовский тематический сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 1998. – Вып. № 4. – С. 310–312.

5 Кулик А. Н. Распределение деформаций при экспериментальном исследовании ротационной обкатки трубчатых заготовок / А. Н. Кулик, С. А. Шевцов, Т. А. Кулик // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : тематичний збірник наукових праць*. – Краматорськ – Слов'янськ : ДДМА, 2000. – С. 339–341.

6 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при закатке сварных швов трубных заготовок для их последующей ротационной обкатки / А. Н. Кулик, С. А. Дмитриев, А. А. Сытник, С. А. Шевцов // *Обработка металлов тиском : збірник наукових праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – № 2 (35). – С. 39–42.

7 Упрочнение баллонов обкаткой тремя роликами / В. В. Пастернак, А. Н. Кулик, А. В. Послушник, С. В. Капорович, С. А. Шевцов, Т. А. Кулик // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 375–378.

8 Численное математическое моделирование распределений напряжений и деформаций при поперечном выдавливании осесимметричных деталей с относительно тонким фланцем / С. А. Шевцов, С. В. Капорович, Л. И. Алиева, Д. Ю. Михеенко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ – Хмельницький : ДДМА, 2002. – С. 86–90.

9 Завгородний Д. В. Методы расчета напряжений и деформаций при правке труб изгибом / Д. В. Завгородний, С. В. Новоселов, С. А. Шевцов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ – Слов'янськ : ДДМА, 2003. – С. 91–94.

10 Колесников С. А. Температурное поле остывающей цилиндрической поковки / С. А. Колесников, А. Н. Обухов, С. А. Шевцов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 1999. – С. 124–126.

11 Исследования процесса поперечной прокатки осесимметричных ребристых металлоизделий / С. В. Капорович, С. А. Шевцов, А. В. Гушин, О. Ю. Неня // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 146–150.

12 Моделирование энергосиловых параметров процесса горячей прокатки сварных швов на основе метода верхней оценки / Ю. К. Доброносков, С. А. Дмитриев, Е. А. Воротникова, С. А. Шевцов // Обробка металів тиском : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 4 (29). – С. 38–43.

13 Михеенко Д. Ю. Математическое моделирование деформированного состояния металла при прокатке с затеканием в щелевой паз / Д. Ю. Михеенко, А. А. Иванов, С. А. Шевцов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 284–287.

14 Автоматизированное проектирование рабочих роликов косовальковых машин для правки труб различного сортамента / Завгородний В. Г., С. А. Шевцов, Д. В. Завгородний, С. В. Чемерис // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 210–214.

15 Колесников С. А. Разработка, исследование и совершенствование новых конструкций механизмов изменения модуля жесткости рабочих клетей прокатных станов / С. А. Колесников, В. Н. Гойда, С. А. Шевцов // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : межвузовский тематический сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 1998. – Выпуск № 4 – С. 138–142.

16 Моделювання деформованого стану східчастих пустотілих поковок в процесі розкочування / М. С. Косилов, О. Є. Марков, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). С. 25–29. – (Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії).

17 Математическое моделирование энергосиловых параметров при холодной прокатке относительно толстых листов и полос / М. Я. Бровман, С. А. Шевцов, М. Е. Кокотько, А. А. Сатонин // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 492–498.

18 Математическое моделирование энергосиловых параметров при разделении металлопроката дисковыми пилами / Ищенко А. А., Шпак В. И., А. В. Послушник, С. В. Капорович, С. А. Шевцов, А. В. Левит // Удоскона-

лення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ – Слов'янськ : ДДМА, 2000. – С. 103–106.

19 Пат. 86619 Україна, МПК (2014.01) B21D 51/00. Спосіб виготовлення корпусів балонів / Сатонін О. В., Кулік О. М., Дмитрієв С. А., Шевцов С. О. – № u201306940; заявл. 03.06.2013; опубл. 10.01.2014, бюл. № 1.

20 Пат. 116546 Україна, МПК (2017.01) B 21 J 5/00. Спосіб виготовлення порожнистих тонкостінних поковок / О. Є. Марков, В. М. Злигорєв, А. О. Шарун, А. В. Коляденко, Г. О. Овсяннікова, С. О. Шевцов – № u201612412 ; заявл. 06.12.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10. – 4 с.

21 Завгородній Д. В. Розробка рекомендацій із удосконалення та програмних засобів з автоматизованого проектування технологій та обладнання для виправлення труб і трубних заготовок на косовалкових правильних машинах / Д. В. Завгородній, С. О. Шевцов, В. Г. Завгородній // Розвиток методів розрахунку удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском : матеріали науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті В. Ф. Потапкіна. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 38.

22 Перспективы развития оборудования для промышленного производства осесимметричных металлоизделий / С. В. Капорович, С. А. Шевцов, О. Ю. Неня, А. А. Иванов // Розвиток методів розрахунку удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском : матеріали науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті В. Ф. Потапкіна. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 43.

23 Розробка нових заготовок для поковок відповідального призначення / О. Є. Марков, О. В. Герасименко, М. С. Косілов, С. О. Шевцов // Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, 25–28 вересня 2017 р.– Краматорськ : ДДМА, 2017. – С. 88 – 89.

24 Паламарчук В. О. Побудова робочої поверхні інструмента тертя для обкочування трубчатих заготовок в системі автоматизованого проекту-

вання DELCAM POWERSHAPE / В. О. Паламарчук, С. О. Шевцов // Матеріали XXXVII Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку» : зб. наук. праць. – Переяслав-Хмельницький, 2017. – Вип. 37. – С. 399–402.

25 Паламарчук В. О. Використання статистичних методів у підготовці студентів напряму «Інформаційні технології проектування (ІТП)» / В. О. Паламарчук, С. О. Шевцов // Інноваційні педагогічні технології у підготовці майбутніх фахівців з вищою освітою: досвід, проблеми, перспективи : матеріали міжнародної науково-методичної інтернет-конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – Розділ 5.

26 Паламарчук В. О. Комплексное применение методов математической статистики в подготовке студентов направления «Информационные технологии проектирования» / В. О. Паламарчук, С. О. Шевцов, Н. С. Грудкина // Качество образования: управление, сертификация, признание : сборник научных работ международной научно-методической конференции. – Краматорск : ДГМА, 2013. – С. 107–110.

27 Шевцов С. О. Математичне моделювання та оптимізація режимів зварювання електродами, котрі покриті екзотермічною сумішшю / С. О. Шевцов, Д. А. Волков // Математика у технічному університеті ХХІ сторіччя : збірник наукових праць за матеріалами дистанційної всеукраїнської наукової конференції. – Краматорск : ДДМА, 2017. – С. 281–283.

Додатково наукові результати дисертації відображені у роботах:

28 Разработка новых заготовок для поковок ответственного назначения / О. Е. Марков, А. В. Герасименко, М. С. Косилов, С. А. Шевцов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – № 2 (41). – С. 124–130.

29 Волков Д. А. Выбор оптимальных режимов сварки электродами с экзотермической смесью в покрытии / Волков Д. А., А. Ф. Власов, С. А. Шевцов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – № 2 (38). – С. 58–69.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 19 |
| РОЗДІЛ 1 СПОСОБИ ОТРИМАННЯ ВИРОБІВ РОТАЦІЙНИМ ОБКОЧУВАННЯМ (АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ) | |
| 26 | |
| 1.1 Сучасні підходи до проектування й удосконалення технологічних процесів виготовлення пустотілих заготовок | 26 |
| 1.2 Прогресивні способи виготовлення днищ способами обкочування | 31 |
| 1.3 Оснащення для деформування днищ і горловин | 34 |
| 1.4 Формування порожнистих виробів з труб ротаційним обкочуванням інструментом тертя | 37 |
| 1.5 Способи формування днищ балонів на трубних заготовках ротаційним обкочуванням ІТ | 41 |
| 1.6 Теоретичні й експериментальні дослідження процесів ротаційного обкочування..... | 44 |
| 1.7 Термошвидкісні параметри ротаційного обкочування труб | 51 |
| Висновки за розділом 1 | 52 |
| РОЗДІЛ 2_МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТАНГЕНЦІАЛЬНОГО ОБКОЧУВАННЯ ІНСТРУМЕНТОМ ТЕРТЯ | |
| 54 | |
| 2.1 Методика дослідження МСЕ обкочування сферичних днищ інструментом тертя | 54 |
| 2.3 Методика й устаткування для проведення експериментальних досліджень, вимірювальна й реєструвальна апаратура, оцінювання погрішностей вимірів..... | 65 |
| Висновки за розділом 2 | 74 |
| РОЗДІЛ 3_МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛУ ПРИ ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ ДНИЩ БАЛОНІВ І ЄМНОСТЕЙ | |
| 75 | |
| 3.1 Аналіз енергосилових параметрів процесу пластичного деформування днищ на основі теорії оболонок і пластин | 75 |

| | |
|---|---|
| 3.2 Аналіз енергосилових параметрів процесу пластичного деформування днищ на основі методу верхньої оцінки | 108 |
| 3.3 Аналіз температурного режиму при пластичному деформуванні днища балонів і ємностей | 117 |
| Висновки за розділом 3 | 125 |
| РОЗДІЛ 4_ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПУСТОТІЛИХ ЗАГОТОВОК НА ТЕПЛОВИЙ І НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ОСЬОВОЇ ЗОНИ ДНИЩА | |
| 4.1 Розподіл температур і деформацій у трубній заготовці при тангенціальному обкочуванні ІТ..... | 127 |
| 4.2 Напружено-деформований стан пустотілої заготовки при тангенціальному обкочуванні ІТ при різних величинах подач | 134 |
| Висновки за розділом 4 | 153 |
| РОЗДІЛ 5_ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОБКОЧУВАННЯ ТА ПІДСАДКИ ДНИЩ ІНСТРУМЕНТОМ ТЕРТЯ | |
| 5.1 Перевірка та апробація теоретичних результатів | 155 |
| Висновки за розділом 5 | 177 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | |
| ДОДАТОК А Список публікацій здобувача: | 210 |
| ДОДАТОК Б Апробація результатів дисертаційної роботи на міжнародних конференціях..... | Ошибка! Закладка не определена. 17 |
| ДОДАТОК В Методика статистичної обробки тарировочних графіків | 218 |
| ДОДАТОК Г Акти впровадження результатів дисертаційної роботи | Ошибка! Закладка не определена. 20 |
| ДОДАТОК Д Акт впровадження результатів роботи у навчальний процес | 223 |

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасних умовах важливим завданням для України є розвиток машинобудування. Це стане можливим за умови підвищення якості та зниження собівартості виробленої металопродукції. Усі деталі машин у енергетичному машинобудуванні відносяться до виробів відповідального призначення і значна частина з них виробляється способами гарячого пластичного деформування. Особливе місце серед цих виробів займають тонкостінні деталі з днищем (газові балони, корпуси вогнегасників, корпуси гідроциліндрів та амортизаторів та ін.). Ці вироби мають специфічну форму та виготовляються з декількох частин (пустотілий корпус, днище та горловина), які зварюються. Собівартість зазначених виробів висока. Виготовлені таким способом деталі не гарантують високу надійність металу днища й корпусу балону. В результаті ударна в'язкість і міцність металу балону в зоні зварного шва є низькою. За цих умов можливий обрив днища балону під дією високого тиску.

На сьогодні менш розповсюдженим методом для виготовлення тонкостінних деталей з днищем є спосіб використання операції обкочування трубної заготовки інструментом тертя (ІТ). Що пов'язано з тим, що відсутнє повне заварювання стінки днища внаслідок недостатньої температури та низьким рівнем стискаючих напружень у місці стику стінок трубної заготовки. Тому такі способи виготовлення не гарантують достатнього рівня герметичності днища балонів.

Підвищення якості та зниження витрат на виготовлення днищ пустотілих заготовок потребує удосконалення способів обкочування. Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є розробка й впровадження у виробництво способів виготовлення заготовок з днищем на основі комбінування операцій обкочування та підсадки сферичного днища ІТ. У сучасній теорії й практиці обробки металів тиском недостатньо розвинуті наукові основи механізму

формування напружено-деформованого стану (НДС) металу труби в процесі тангенціального обкочування та підсадки ІТ заготовок з різним співвідношенням геометричних параметрів. Це стримує розробку енергоощадних технологій виготовлення тонкостінних деталей з днищем. У цьому зв'язку необхідність розробки науково обґрунтованих рекомендацій для проектування процесів обкочування сферичних днищ з підсадкою, з метою підвищення якості та зниження витрат на їх виготовлення, представляє значний науковий і практичний інтерес, що підтверджує актуальність теми дисертаційної роботи.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Новітні ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромислому комплексі» та науковому напрямку «Розвиток ресурсозберігаючих процесів обробки тиском на основі створення нових технологічних способів і методик аналізу закономірностей пластичного деформування» наукової школи кафедр «Обробка металів тиском» (ОМТ) і «Механіка пластичного формування» (МПФ) Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА). Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт ДДМА, за планами Міністерства освіти і науки України (0108U010041, 0112U006709, 0118U003047), при виконанні яких автор брав участь як виконавець.

Мета й завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи – підвищення якості днищ балонів та ємностей з трубчастих заготовок на основі комбінування ротаційного обкочування інструментом тертя з підсадкою днища.

Для досягнення зазначеної мети поставлені й вирішені наступні завдання:

– проаналізувати існуючі способи та методи розрахунку при виготовленні довгомірних тонкостінних заготовок з днищем та встановити напрямки їх подальшого удосконалення;

– розробити методики проведення теоретичних і експериментальних досліджень моделювання процесів тангенціального обкочування та підсадки сферичних днищ інструментом тертя;

– розробити математичну модель процесу обкочування інструментом тертя встановити на основі енергетичного метода та теорії оболонки для уточнення ефективних технологічних діапазонів для виготовлення бездефектних днищ обкочуванням та підсадкою;

– встановити НДС металу, формозміну стінки днища та енергосилові параметри у процесі комбінування операцій обкочування та підсадки сферичного днища залежно від різної товщини стінок труби, температури нагрівання та подачі заготовки в інструмент тертя, що дозволить визначити ефективні режими деформування;

– провести перевірку теоретичних результатів моделювання формозміни трубної заготовки при обкочуванні та підсадці експериментальними дослідженнями та на їх основі розробити практичні рекомендації та методику з удосконалення та впровадження способу ротаційного обкочування та підсадки сферичного днища інструментом тертя, що дозволить підвищити якість днища та знизити витрати на їх виготовлення;

– розробити методику, технологічні рекомендації та провести дослідно-промислову апробацію запропонованого процесу обкочування та підсадки сферичного днища.

Об'єкт досліджень: Технологічний процес виготовлення днищ балонів ротаційним обкочуванням інструментом тертя.

Предмет досліджень: Закономірності формозміни, параметри енергосилового, напружено-деформованого та теплового стану заготовки при комбінуванні обкочування та підсадки сферичного днища інструментом тертя.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження НДС реалізовані на основі використання теорії оболонки, енергетичного методу та методу скінчених елементів (МСЕ). Підтвердження формозміни заготовки та закриття осьового отвору у процесі обкочування та підсадки сферичного днища про-

водили експериментом у лабораторних та виробничих умовах. При обробці результатів експериментів застосовувалися методи математичної статистики. Вірогідність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечена дотриманням відповідних сучасних методик при проведенні експериментів і підтверджена відповідністю експериментальних даних з результатами теоретичних розрахунків.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше на основі теоретичного дослідження МСЕ встановлена гомологічна температура нагрівання трубної заготовки, що забезпечує достатній рівень температури у процесі обкочування для зварювання стінок днища та виключити перегрівання металу.

2. Вперше на основі МСЕ встановлено параметри НДС у процесі ротаційного обкочування сферичних днищ інструментом тертя залежно від співвідношень товщини стінок, величини подачі, температури нагрівання трубної заготовки, що дозволило визначити рівень стискаючих напружень для оцінки ступеня закриття отвору та встановити ефективні режими деформування.

3. Вперше теоретично встановлено та експериментально доведено закономірності впливу ступеня підсадки інструментом тертя після обкочування на НДС, енергосилові параметри процесу, товщину та ступінь зварювання стінок днища, що дозволило встановити раціональні технологічні режими підсадки.

4. Отримали подальший розвиток закономірності формоутворення днища трубної заготовки після обкочування та підсадки в залежності від величини подачі, відносної товщини стінки, температури нагрівання та ступеня підсадки, які дозволили підвищити точність отримуваних результатів та удосконалити процес деформування, який забезпечує гарантоване зварювання стінок днища.

Практичну цінність дисертаційної роботи представляють наступні її основні результати:

– запропоновано новий спосіб ротаційного обкочування сферичних днищ інструментом тертя з використанням операції підсадки плоским інструментом, який гарантує зварювання стінок металу днища;

– розроблено методику проектування технологічних параметрів процесів обкочування інструментом тертя, яка полягає у визначенні температури попереднього нагрівання, величини подачі, відносної товщини стінки заготовки та ступеня підсадки;

– розроблено рекомендації для проектування нових технологічних процесів обкочування, механічні режими деформування й підсадки, які дозволяють інтенсифікувати процес закриття осьового отвору й забезпечують високу якість металу днища.

Результати роботи у вигляді технологічних рекомендацій для розробки процесів ротаційного обкочування та підсадки впровадженні в НДІ «УкрНДІМеталургмаш» та прийняті до впровадження на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» при виробництві досвідно-промислової партії балонів і ємностей для засобів пожежетушіння.

Науково-практичні розробки, виконані в дисертації, використовуються в навчальному процесі й НДР кафедри «Механіка пластичного формування» Донбаської державної машинобудівної академії при вивченні дисципліни «Спеціальні види технологій і обладнання для обробки металів тиском», а також при виконанні студентами спеціальності «Прикладна механіка» курсових, дипломних проектів і магістерських робіт.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно здійснена постановка мети й завдань дисертаційної роботи, виконаний аналіз літературних джерел і розроблені математичні та скінчено-елементні моделі процесів тангенціального обкочування та підсадки сферичних днищ інструментом тертя ІТ. Проведено експериментальні дослідження й розроблені рекомендації з проектування технологічних процесів обкочування та підсадки днищ. Роз-

роблені та запропоновані для промислового освоєння технологічні процеси й інструмент для тангенціального обкочування ІТ. Внесок здобувача в роботах, опублікованих разом зі співавторами, представлений в анотаціях до списку опублікованих робіт з теми дисертації (Додаток А).

Публікації. Матеріали і основні положення дисертаційної роботи (Додаток А) опубліковані у 29 наукових друкованих працях, з них 1 монографія, 15 статей в 13 наукових спеціалізованих виданнях України, 2 статті у журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 7 тез доповідей на МНТК, 2 статті в інших журналах України. Нові технічні рішення захищені 2 патентами України.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи, наукові й практичні результати доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК): МНТК з проблем дослідження і вдосконалення технологій і обладнання обробки тиском (Краматорськ, ДДМА, 2000–2012 рр.); XVI–XIX МНТК «Досягнення й проблеми розвитку технологій і машин обробки тиском» (Краматорськ, 2013–2016); НТК «Розвиток методів розрахунку удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском» (Краматорськ, ДДМА, 2007); VI МНТК «Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві» (Краматорськ, ДДМА, 2017); XXXVII Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку» (Переяслав-Хмельницький, 2017); МНТК «Інноваційні педагогічні технології у підготовці майбутніх фахівців з вищою освітою» (Вінниця, ВНТУ, 2013); МНТК «Якість освіти: управління, сертифікація, визнання» (Краматорськ, ДДМА, 2013); Дистанційній всеукраїнській науковій конференції «Математика у технічному університеті XXI сторіччя» (Краматорськ, ДДМА, 2017); XXXVII НТК професорсько-викладацького складу, науково-технічних працівників, аспірантів і студентів (Краматорськ, 2015); IX МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні й металургії» (Харків: НТУ ХПІ, 2017), а також

на щорічних наукових семінарах ДДМА (2001–2017 рр.) і об'єднаному науковому семінарі з ОМТ ДДМА (2018 р.) (Додаток Б).

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і 2 додатків. Загальний об'єм роботи становить 197 сторінок, у тому числі основного тексту – 153 сторінки, 74 рисунків (з них 10 рисунків на окремих сторінках) і 7 таблиць (з них 3 таблиці на окремих сторінках), список використаних джерел з 214 найменувань на 27 сторінках, додатки на 4 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СПОСОБИ ОТРИМАННЯ ВИРОБІВ РОТАЦІЙНИМ ОБКочУВАННЯМ (АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ)

1.1 Сучасні підходи до проектування й удосконалення технологічних процесів виготовлення пустотілих заготовок

Порожнисті вироби різних конфігурацій, у тому числі з трубчастих заготовок, застосовують у різних механізмах і у якості окремих виробів. Значну частину таких виробів складають деталі у вигляді циліндрів з днищем. Передусім це різного типу балони, призначені для заповнення газами, корпуси фільтрів та інші вироби. Під ефективністю отримання балонів і ємностей з труб мається на увазі широка різноманітність способів їх формоутворення. Кожен зі способів має свої переваги й обмеження, отже виникає необхідність дослідження цих способів формоутворення. Підвищення механічних властивостей металовиробів потребує розроблення нових методів деформування для гарантованого забезпечення високої якості.

В. О. Ростовщikov розробив спосіб виробництва пустотілих виробів, які мають форму, близьку до геометрії деталей, гарячим ротаційним обтисканням [1]. Обмеженням методу є складність виготовлення труб з високою чистотою поверхні, що пояснюється зсувом оправки при деформуванні відносно осі заготовки. У результаті утворюється різнотовщинність виробів і збільшуються відходи, які пов'язані з механічним обробленням.

З використанням енергетичного методу Yunjian Wu з співавторами розроблено модель для визначення поздовжньої деформації металу в процесі радіального обкочування. Запропонована модель дозволяє встановлювати силу деформування в залежності від ступеня обтискання [2]. Однак запро-

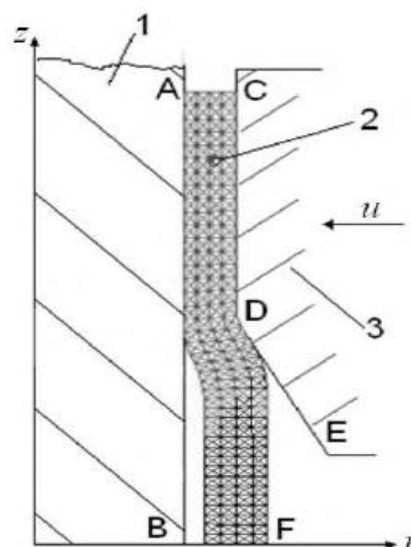
понована модель не дозволяє встановлювати радіальний плин матеріалу під час деформування, що вимагає розв'язання задачі в тривимірній постановці.

Н. W. Sizek розробив технологію виготовлення складнопрофільованих пустотілих виробів, при якій частину заготовки нагрівають і деформують у штампі [3]. Поєднання торцевого та радіального деформування забезпечує плин металу в центральних частинах заготовки. Після висаджування ступінчастого профілю вісь виробу формується з використанням оправки (рис. 1.1).

На основі методу скінченних елементів (МСЕ) О. М. Пасько зі співавторами провів моделювання процесу ротаційного деформування пустотілої циліндричної заготовки (рис. 1.2) [4; 5].



Рисунок 1.1 – Виготовлення трубчастих виробів зі складним профілем



1 – оправка; 2 – заготовка;
3 – інструмент

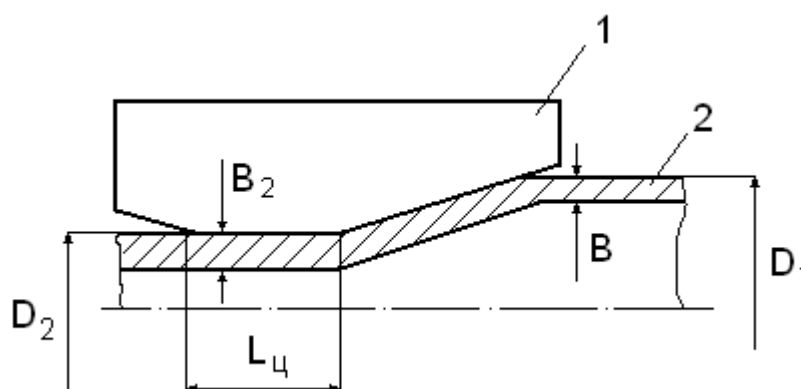
Рисунок 1.2 – Розрахункова схема процесу ротаційного деформування

Результати дослідження дозволили встановити, що покрокове деформування призводить до значної неоднорідності параметрів НДС по довжині виробу.

А. Ghaei та ін. провели МСЕ моделювання процесу радіального деформування труб [6]. Аналіз отриманих результатів дозволив зробити висно-

вок, що цей процес ефективний при малих осьових подачах. Осьові напруження на внутрішній поверхні пустотілої заготовки призводять до тріщиноутворення внаслідок появи розтягувальних напружень.

У роботах О. М. Пасько та співавторів досліджується процес багато-перехідного ротаційного деформування [7; 8]. Ротаційне деформування пустотілих заготовок призводить до збільшення товщини стінки заготовки (рис. 1.3). Встановлено, що основний вплив на потовщення стінки чинить ступінь обтискання.



1 – інструмент; 2 – заготовка

Рисунок 1.3 – Схема процесу ротаційного обтискання пустотілих заготовок

За результатами моделювання MCE Lixia Fan зі співавторами розроблено 3D-модель процесу радіального деформування трубних заготовок і проведено аналіз НДС заготовки [9]. Доведено ефективність процесу всебічного деформування трубної заготовки. Однак деформування пустотілих заготовок цим способом ускладнює конструкцію устаткування.

S. P. Vurkin та ін. досліджували експериментальними методами радіальне деформування трубних заготовок [10]. Цей спосіб є новим підходом до удосконалення устаткування для забезпечення оптимальної конструкції та відмови від деформування на молотах.

У роботі Qi Zhang [11] встановлено, що деформування труби сприяє інтенсивному закриттю отвору й мінімальному подовженню пустотілої за-

готовки. Однак у дослідженні не встановлено форму деформувального інструменту, яка буде сприяти інтенсифікації подовження заготовки.

У роботі М. Sanjari і співавторів встановлено вплив геометрії деформувального інструменту на НДС заготовки в процесі деформування обкочуванням [12]. За результатами роботи встановлено, що для забезпечення мінімальної неоднорідності механічних властивостей за товщиною стінки доцільно використовувати інструмент з випуклою геометрією.

Z. G. Wang на основі досліджень процесів обтискання труб на радіально-кувальних машинах встановив, що процес сприяє підвищенню механічних властивостей металу [13]. Встановлено вплив ступеня деформування на технологічні параметри обтискання. Відмічено, що подальші дослідження слід спрямувати на встановлення впливу схеми НДС на утворення внутрішньої структури металу, яка впливає на неоднорідність механічних властивостей.

F. Knauf зі співавторами моделювали процес обтискання труб методами локального деформування [14]. За результатами експериментів були продеформовані труби різного діаметра із різною товщиною стінки. Обтискання труб проводили чотирма інструментами, що дозволило спрямувати плин металу в осьовому напрямку.

R. Koppensteiner зі співавторами встановив вплив способу деформування при обтисканні довгомірних заготовок з використанням інструменту різної геометрії на ефективність пропрацювання [15]. Встановлено, що в цьому разі можна отримати рівномірні механічні властивості в поздовжньому і поперечному напрямках.

Питанням якості поверхні труб при деформуванні обкочуванням займався Jinn-Jong Sheu [16]. У роботі запропоновано два види інструменту, які забезпечують рівномірний розподіл деформацій. Був зроблений висновок, що зі збільшенням кута нахилу робочої кромки інструменту підвищується рівномірність розподілу деформацій. Збільшення обтискання сприяє

зменшенню шорсткості поверхні заготовки, але при цьому може відбутися руйнування виробу.

Yong Li зі співавторами порівнював процеси радіального деформування мідних труб між двома і трьома інструментами [17; 18]. Встановлено, що сумарна сила деформації двома інструментами більше, ніж трьома. НДС металу у виготовлених пустотілих виробах при використанні трьох інструментів розподіляється більш рівномірно. Однак ці методи радіального обтискання тонкостінних труб не можуть бути використані при виготовленні виробів зі сталейних труб.

Дослідженням радіального обтискання пустотілих заготовок займалися і О. Pantalé зі співавтором [19]. За результатами досліджень порівнювалися геометрія виробів, сила деформації, розподіл НДС заготовки. Встановлено, що при деформуванні без оправки та при зменшенні зовнішнього діаметра труби на 15 % потовщення стінки відбувається на 10 %.

J. Kowalski у своїй роботі [20] експериментально встановив розподіл деформацій при розкочуванні пустотілих заготовок. Для досліджень використовував метод сіток. Порівнювалися процеси розкочування інструментом з плоскою і увігнутою геометрією. Визначено, що використання плоского деформувального інструменту призводить до підвищення рівномірності розподілу деформацій.

Оцінками критеріїв руйнування при обтисканні труб займався С. Linardon зі співавторами [21]. Вони досліджували процес обтискання різним деформувальним інструментом. У результаті встановлено закономірності зміни тиску деформування в залежності від фактора тертя.

S. Khayatzahe та ін. досліджували процес радіального обтискання на трубах [22]. Автори встановили такі результати, що деформації в пустотілій заготовці більш однорідні, ніж у суцільній. Механічні властивості матеріалу вздовж осі труби були однакові. Максимальні напруження і деформації виникають уздовж осі заготовки, що призводить до підвищення механічних властивостей заготовки.

1.2 Прогресивні способи виготовлення днищ способами обкочування

У способі М. А. Афанасьєвої та співавторів запропоновано метод обкочування труб для отримання сферичних днищ, у якому деформування відбувається при обертанні однієї труби навколо іншої [23]. Температуру нагрівання кінців труб забезпечують за допомогою індукційного нагрівання. Однак у роботі не наведено інформацію щодо даних розподілу накопиченої інтенсивності деформації в заготовках, що планується дослідити у роботі.

В. В. Сергєєв та співавтори розробили метод виробництва днищ балонів, який полягає в обкочуванні поворотним інструментом нагрітих трубних заготовок. Згідно з цим методом початкова кутова швидкість обертання інструмента становить $(9...11) \cdot 10^{-3}$ рад/об., після чого кутова швидкість збільшується до $(17...19) \cdot 10^{-3}$ рад/об [24]. У роботі не наведено рекомендації щодо вибору ефективної подачі заготовки в інструмент, що є важливим параметром процесу.

Відомий також інший спосіб В. В. Сергєєва виготовлення балонів, який полягає у почерговому нагріванні кінців заготовки до температури $1180...1220$ °С [25]. У процесі заочування днища температуру заготовки підвищують шляхом подавання кисню до зони пластичного деформування. Температура металу заготовки залежить від частоти обертання інструменту та температури нагрівання заготовки перед обкочуванням. Однак у роботі не наведено дані про градієнт розподілу температури вздовж труби.

У патенті К. Т. Хведелідзе та колег запропонований спосіб виробництва балонів [26], який полягає в тому, що величина подачі заготовки в інструмент для заочування визначається як $L = (0,97 - 1,03) \cdot K \cdot D$ (де D – діаметр труби; K – коефіцієнт, що встановлюється залежно від співвідношення зовнішнього діаметра труби та товщини стінки заготовки S

($K = 0,005D/S + 0,55$). Однак у роботі не дано оцінку впливу величини подачі на ступінь закриття отвору заготовки.

У роботі А. І. Іванова та співавторів запропоновано спосіб виготовлення балонів з використанням обкочування нагрітих трубних заготовок поворотним інструментом [27]. Нагрівання кінців труб здійснюють після закріплення їх у машині для обкочування. Однак у роботі не представлено рекомендації для розроблення технологічного процесу формування днища з трубних заготовок.

Крім цього, А. І. Івановим запропонований спосіб виробництва балонів шляхом обкочування нагрітих кінців трубної заготовки інструментом тертя (надалі ІТ) з формуванням горловини або днища балона [28]. Перевагою способу є те, що формоутворення днища або горловини балона проводиться двома плоскими інструментами тертя, які синхронно переміщуються назустріч один одному. Робоча довжина інструменту дорівнює половині розгорнутої довжини днища (горловини). Авторами роботи не досліджений процес розігріву заготовки у процесі обкочування інструментом тертя.

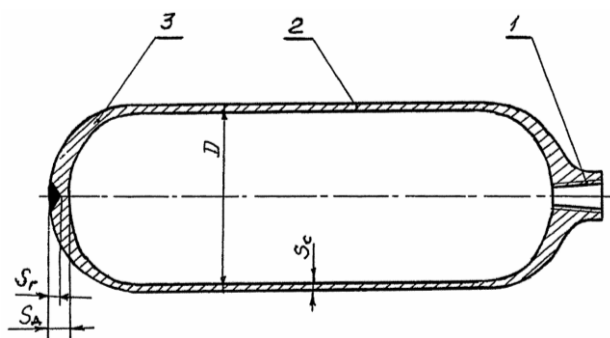
Спосіб виготовлення корпусів балонів, запропонований О. В. Сатоніним та співавторами, полягає в нагріванні кінців трубної заготовки до температури 1150° , формуванні днища та горловини балона поворотним інструментом [29]. У роботі представлено розподіл температур у тілі заготовки, але дослідження НДС заготовки проведено не було.

В роботах О. В. Сироти та ін. [30] досліджувався спосіб виготовлення балонів обкочуванням трубної заготовки. Формоутворення профілю реалізують обкочуванням кінця труби ІТ, при цьому перед обкочуванням кінцеву ділянку заготовки охолоджують. Недоліком зазначеного способу є висока складність реалізації процесу обкочування за рахунок витрати додаткового часу на охолодження.

В. Є. Родіонов і співавтори запропонували спосіб виготовлення безшовного газового балона [31]. Основна ідея способу полягає в тому, що попередньо зменшують товщину стінок трубної заготовки на 14...15 %

і зміцнюють метал виробу шляхом його обкочування в холодному стані. Обмеженням способу є те, що обкочування в холодному стані може викликати тріщиноутворення при обкочуванні заготовок з легованих сталей.

У роботі В. В. Сергєєва та співавторів був запропонований спосіб виготовлення газового балона, який полягає у виготовленні з однієї трубчастої заготовки днища та горловини, причому відношення діаметра (D) до товщини стінки труби (S_c) задовольняє умові $45 \leq D / S_c \leq 55$, а відношення максимальної товщини днища (S_d) до товщини стінки (S_c) умові $2,2 \leq S_d / S_c \leq 3,5$ [32]. На рисунку 1.4 зображений газовий балон, який виготовляється за таким способом. Однак у роботі не запропоновано конкретні технологічні та конструкторські рекомендації для обкочування днища та горловини балонів.



1 – горловина; 2 – циліндрична частина; 3 – сферичне днище

Рисунок 1.4 – Повздовжній переріз газового балона

У розробці В. С. Яворського з колективом авторів [33] запропоновано конструкцію балона високого тиску, який складається з двох частин таким чином, що різниця зовнішнього діаметра балона (D) і діаметра деформованої ділянки (D_1) не менша, ніж дві товщини стінок балона (S). Однак досліджень базових характеристик якості балонів, отримуваних за цим способом, авторами роботи у літературі не наведено.

Задача з удосконалення способу виготовлення балонів високого тиску була вирішена Я. І. Літвінським та співавторами шляхом зміни нагрівання кінцевих ділянок заготовок перед обкочуванням [34]. Нагрівання кінцевих

ділянок заготовки перед обкочуванням здійснюється так, щоб їх температура послідовно зменшувалася від торця заготовки по її довжині. Але розробниками способу не наведено результати досліджень впливу температурного градієнта на заварювання отвору труби.

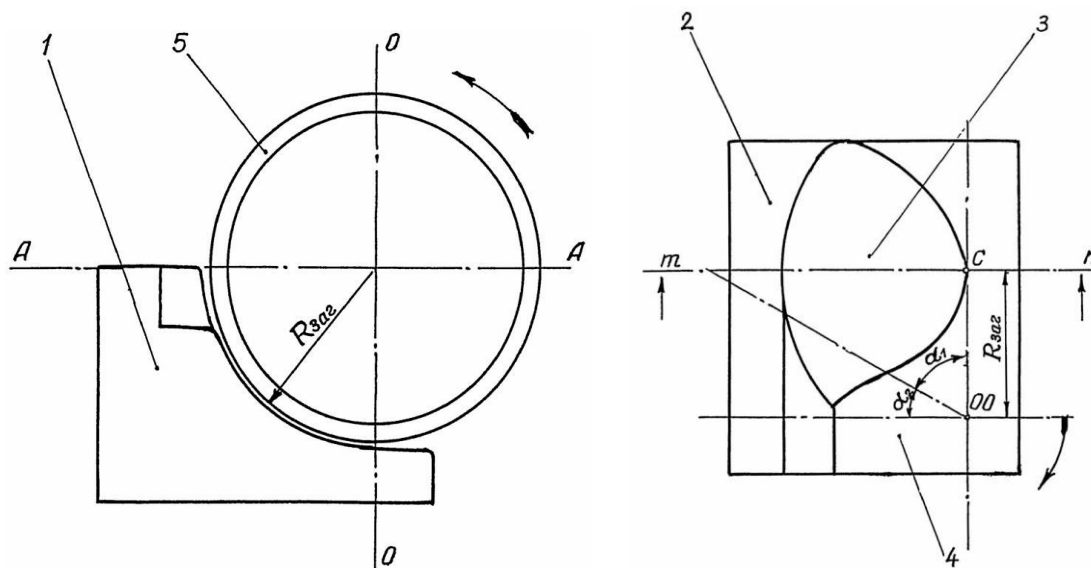
В. В. Сергєєв з колегами запропонував підвищити експлуатаційну надійність балонів з легованої сталі [35] шляхом удосконалення термооброблення, а саме зміни умов нагрівання й загартовування балонів. Однак у роботі не надано оцінку підвищення механічних властивостей, яке відбувається при зміцненні матеріалу в процесі обкочування.

О. І. П'ятничком і співавторами запропоновано прийом зниження маси балонів, у яких відношення L/D складає 3...8, при збереженні їх міцності за рахунок зміни геометричних параметрів балону [36]. Відношення середньої товщини ($S_{\text{ср.д}}$) осьової ділянки днища до товщини стінки труби (S_c) задовольняє умові $2,0 \leq S_{\text{ср.д}} / S_c \leq 3,5$. Але підтверджувальних даних щодо механічних властивостей виробів у роботі надано не було.

1.3 Оснащення для деформування днищ і горловин

О. В. Горбач і В. О. Паламарчуком встановлено форму та розміри деформувального інструменту тертя для тангенціального обкочування [37]. Авторами визначено параметричні моделі для проектування деформувального інструменту. Слід зазначити, що авторами роботи не підтверджено отримані результати експериментальними дослідженнями.

Г. Й. Хаустов з колегами запропонували новий інструмент (рис. 1.5) для обкочування горловин [38]. Формувальна ділянка має форму увігнутої кульової поверхні з радіусом 1,3...1,4 радіуса заготовки. Використання способу забезпечує можливість виготовлення різних за розмірами балонів. Обмеженням способу є його призначення для обкочування горловин балонів.



1 – інструмент; 2 – поворотна основа; 3 – формувальна ділянка;
4 – калібрувальна ділянка; 5 – труба

Рисунок 1.5 – Ескіз оснащення для обкочування горловин

О. В. Горбач і В. О. Паламарчуком також встановлено зношування та стійкість інструменту тертя для обкочування конусних днищ [39]. Мірою стійкості інструменту тертя обрано кількість обкочених балонів. Максимальна стійкість інструменту встановлювалася за величиною граничного відхилення розмірів інструменту від номінального розміру. Отримані авторами роботи результати не враховують вплив відносної товщини стінки заготовок, яка буде змінювати тиск на інструмент, а відповідно, його стійкість.

У роботі В. О. Паламарчука та колег наведено аналіз профілю деформувальної поверхні інструменту тертя тангенціального обкочування [40]. Аналіз результатів роботи дозволив встановити, що схема деформування відрізняється від схеми обертання дотичної до твірної поверхні готового виробу, при цьому ділянка контакту труби з інструментом розташовується під кутом до фронтальної площини.

У роботі Л. Л. Роганова та колег спроектовано машину для ротаційного обкочування трубних деталей [41]. Перевагою пристрою є те, що технологічний простір запропонованої машини для ротаційного об-

кочування кінців пустотілих заготовок поділено на дві зони: попереднього та остаточного деформування. Запропонована конструкція збільшує габарити машини та ускладнює завантаження та розвантаження заготовки.

А. М. Обухов зі співавторами встановив аналітичні закономірності для проектування деформувальної поверхні інструменту тертя для обкочування еліптичних і сферичних днищ [42]. Однак у роботі не проведено оптимізацію форми деформувальної поверхні інструменту та не встановлено конструкторські та технологічні рекомендації для обкочування днищ.

В. Г. Серeda з колегами у своїй роботі проаналізував конструктивні особливості днищ, які виготовляються методами тангенціального обкочування [43]. На основі морфологічного аналізу запропоновано класифікацію днищ. На основі цієї класифікації встановлено особливості проектування форми ІТ. Однак у роботі немає даних про вплив величини подачі заготовки в інструмент, а також вплив товщини стінки заготовки на закриття та заварювання отвору труби.

А. І. Івановим зі співавторами удосконалено інструмент для обкочування горловин балонів [44]. У результаті зміни форми робочої поверхні стало можливим керування процесом стовщення стінки горловини. Зазначений результат досягається тим, що на робочій поверхні інструменту виконано калібрувальну ділянку для формування горловини. Однак запропоновані в роботі параметри не перевірялися експериментальними дослідженнями.

Дослідження Akio Sekiguchi спрямовані на виготовлення горловин з листових заготовок обкочуванням роликком [45]. У роботі досліджувалася частота обертання заготовок. На основі дослідження були встановлені алгоритми роботи та траєкторія руху маніпулятора для обкочування, цей спосіб придатний лише для виготовлення горловин з отвором.

James A. Polyblank і Julian M. Allwood розробили параметризовану траєкторію руху інструменту для обкочування на основі квадратичної кривої Безьє [46]. У результаті досліджень вдалось визначити силу обкочуван-

ня. Однак дослідниками не враховано розігрівання заготовки при обкочуванні, що значною мірою чинить вплив на силу деформації.

О. Music з колегами [47] провів дослідження процесу обкочування трубних заготовок і проаналізував появу основних видів дефектів. Але результати роботи спрямовані лише на виготовлення плоских днищ.

1.4 Формування порожнистих виробів з труб ротаційним обкочуванням інструментом тертя

Куванням у профільних штампах на молотах і пресах отримують різні вироби, у тому числі й днища балонів [48–51]. Технологічні обмеження кування роблять цей спосіб малопродуктивним. Крім того, точність розмірів виробу значно залежить від навичок і кваліфікації коваля. Тому кування використовується для виготовлення виробів, отримання яких іншим шляхом неможливе. Заковування кінців труб проводять також на радіально-обтискних машинах [52]. Перед заковуванням кінці труб нагріваються.

Вироби з порожнинами отримують витискуванням [53–57], при цьому деформування заготовки проводять як у холодному, так і в гарячому стані. Для отримання днищ з переходами на трубах використовується обтискання у матрицях [56; 58] у холодному стані. До обмежень на застосування обтискання відносяться осьова стійкість трубних заготовок і граничний коефіцієнт обтискання. Для інтенсифікації процесу обтискання труб його проводять у штампах з електропідігріванням [59] або з електроконтактним підігріванням безпосередньо зони деформації.

Окремі роботи присвячені методам інтенсифікації обтискання без нагрівання [60–64]. Проте цим способом неможливо отримати ділянку сполучення дна з трубою у вигляді торцевої площини, яка перпендикулярна до осі трубчастої заготовки.

При виготовленні складних порожнистих виробів використовують штампування еластичними середовищами [65]. Порожністі періодичні профілі можна виготовляти також за допомогою поперечного [50], поперечно-гвинтового [66; 67], планетарно-гвинтового [68] і поперечно-клинового [69–72] прокатування.

У дрібносерійному виробництві порожністі деталі виготовляють ротаційним давильним обробленням, отримуючи вироби з листової заготовки [73–84]. Ротаційним витягуванням отримують порожністі вироби з заданим розподілом товщини стінки [55; 85].

При масовому виробництві балонів використовують обкочування: роликками в обоймі [77], профільними роликками з поворотом [86–88], валками, що рухаються одночасно в радіальному і осьовому напрямках [89]; роликками, які переміщуються за певною програмою [90–92], двома роликками [93] тощо. Виробники устаткування для обкочування (наприклад, фірм Liefild і X-X Metalform) [94], випускають універсальні машини обкочування вертикального, горизонтального типів, а також спеціального виконання з різними робочими інструментами. Проте при обкочуванні валками й роликками існують і певні технологічні обмеження. До них відноситься неможливість отримання плоских днищ. Крім того, з'являється істотна різниця окружних швидкостей ролика і заготовки в різних точках контактної поверхні. Останній чинник призводить до прискореного зношення робочої поверхні ролика [90]. В описаному процесі необхідно враховувати, що при переході на інші типорозміри виготовлюваних балонів є істотна складність переналаштування машин обкочування.

Обмежені партії виробів простих форм з труб можна виготовити методом взаємного деформування без застосування інструменту [95–97].

При поперечно-гвинтовому обкочуванні різних виробів заготовку формують інструментом у вигляді ролика або бруска, при цьому робоча поверхня інструмента до створюваної заготовки нахилена під кутом φ (рис. 1.6) [98]. Таким чином, деформування заготовки проходить не по усій довжині

виробу, а тільки на ділянці оброблення, яка переміщається уздовж осі заготовки. До недоліків цього методу можна віднести відсутність можливості отримати переходи з нахилом до осі заготовки ϕ , більшим, ніж кут нахилу робочої поверхні.

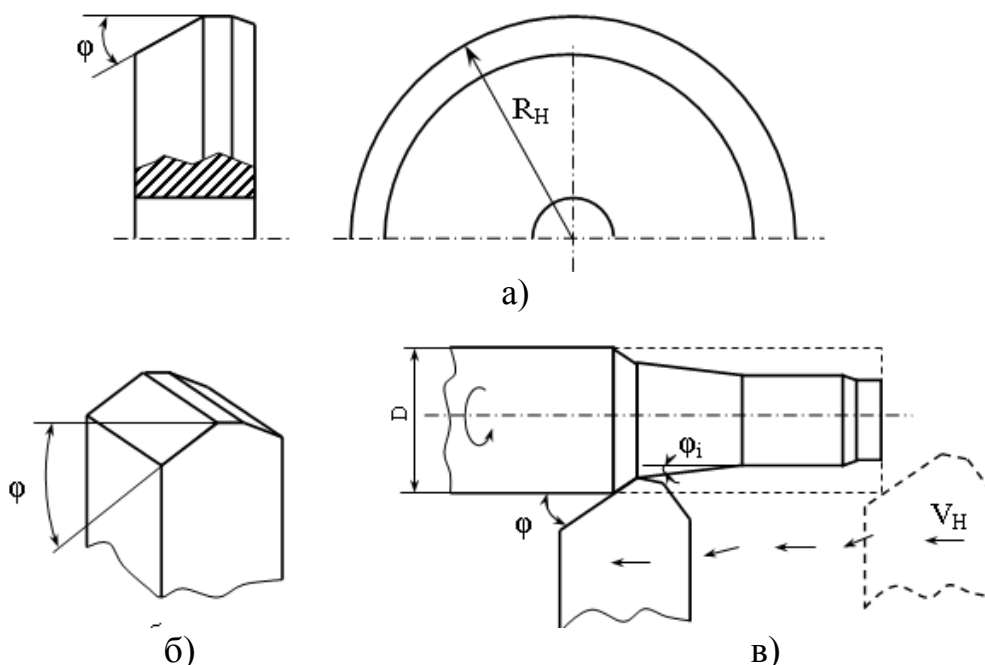
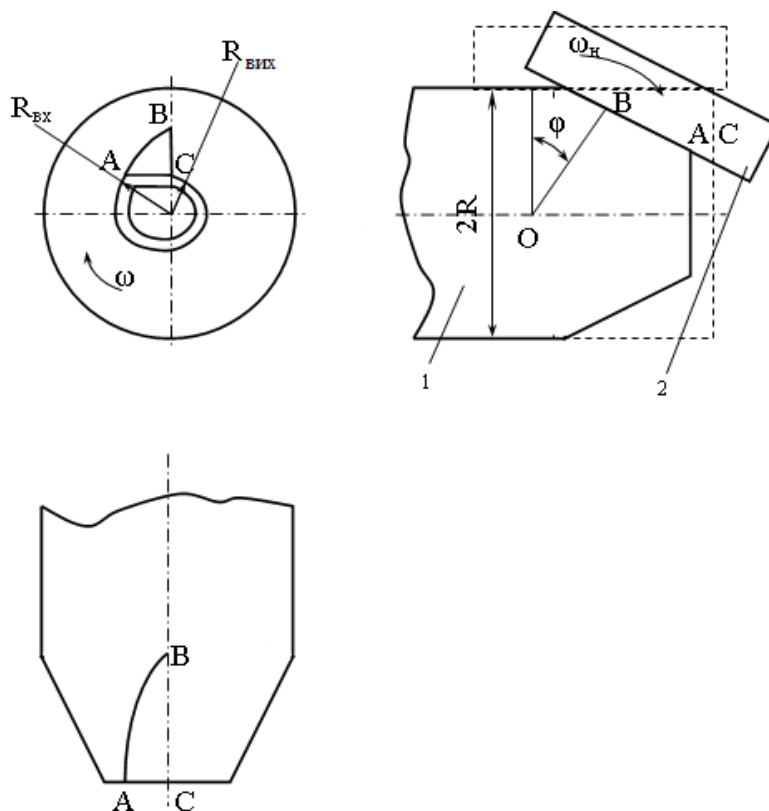


Рисунок 1.6 – Інструмент у вигляді ролика (а) і бруса (б), що застосовується при поперечно-гвинтовому обкочуванні, і схема процесу (в)

Одним зі способів отримання порожнистих виробів є ротаційне обкочування ІТ [48; 51; 99–101]. Суть методу полягає в такому: проводять нагрівання до кувальної температури ділянки, яку піддають деформуванню, далі на обертову трубчасту заготовку тиснуть інструментом тертя, робоча поверхня інструменту виготовляється відповідно до заданих форм виробу. Процес ротаційного обкочування схематично можна подати так (рис. 1.7) [99].

ІТ має зносостійкість, сумірну з роликівим інструментом, 5000 обкочувань [99]. Це забезпечується застосуванням зносостійких металів, а також використанням мастил. При цьому обкочування ІТ має переваги в порівнянні з обкочуванням роликів. Вони полягають в тому, що увесь процес деформування від початку й до зімкнення кромки заготовки здійс-

нюється тільки за один прохід інструменту, який здійснює один простий рух.



1 – заготовка; 2 – інструмент тертя

Рисунок 1.7– Схема процесу ротаційного обкочування інструментом тертя

З середини 1960-х років при активній діяльності дослідників, у тому числі школи В. Г. Капоровича, розпочато широке застосування процесу обкочування інструментом тертя при виготовленні різних виробів машинобудування.

Це вимагало розроблення нових схем ротаційного обкочування й привело до поглибленого вивчення його технологічних можливостей. Аналіз схем різноманітної взаємодії заготовки і інструменту, а також варіантів їх взаємного переміщення дозволив створити розробки великої кількості кінематичних схем машин обкочування [102], багато з яких реалізовано.

Для обкочування заготовок із труб застосовують: одношпindelні машини як з тангенціальним переміщенням інструменту [103], так і з пово-

ротним [100]; планетарні машини при нерухомій заготовці [104; 105], роторні машини обкочування [106; 107].

Обмеження за деформовуваним матеріалом у якості заготовок є одним з головних недоліків ротаційного обкочування інструментом тертя. Використання інструменту тертя замість роликів дозволило:

- провести істотне розширення технологічних можливостей обкочування за геометричними формами отримуваних виробів з створення автоматичних ліній і збільшення продуктивності машин;
- використати тертя між металом інструменту і заготовкою для створення необхідного теплового та напружено-деформованого стану;
- провести спрощення кінематики взаємодії інструменту з заготовкою і конструкцію машини тангенціального обкочування (процес виконується за один хід супорта з інструментом);
- провести спрощення керування верстатами, оскільки програма оброблення заготовки при сталих значеннях швидкості переміщення інструменту й частоти обертання шпинделя задається конструкцією інструменту.

Таким чином, ротаційне обкочування ІТ має значні переваги перед іншими способами формоутворення балонів і ємностей з трубчастих заготовок.

1.5 Способи формування днищ балонів на трубних заготовках ротаційним обкочуванням ІТ

Для отримання днищ балонів високого тиску з труб широко застосовується інструмент поворотного типу (спеціально профільований брусок), який відлито зі зносостійкого сплаву. Балони виготовляються з трубних заготовок з різними розмірами, марками сталей зі співвідношенням діаметра заготовки D до діаметра днища d в інтервалі $D/d = (2...4)$ і товщиною стінки

днища $S_r = (2...3) S_0$ (де S_0 – початкова товщина стінки заготовки), пов'язаною з недеформованою ділянкою заготовки переходом, що має сферичну і тороїдальну ділянки.

Під час впровадження обкочування поворотним інструментом [108–120] вивчалось визначення товщини стінки вздовж твірної виробів, що виготовляються, також визначалися енергосилові параметри процесу. Слід зазначити, що недоліком поворотного інструменту є вузькі технологічні можливості, що не дозволяють отримати днища складної конфігурації.

Для обкочування трубних заготовок з дном застосовують тангенціальний ІТ. Відрізняються ІТ конструктивним оформленням і технологічними можливостями, а загальним для них є те, що їх початкові й кінцеві перерізи визначаються конфігурацією початкової заготовки і формою, яку необхідно отримати у виготовленому виробі, а проміжні перерізи утворюють плавний перехід між вказаними формами. При значній довжині твірної цієї ділянки відбувається різке підвищення енергосилових параметрів процесу і втрата стійкості заготовки, що призводить до скручування. При виготовленні виробів складного профілю зі значною довжиною утвореної ділянки застосовується інструмент з робочою поверхнею, нахиленою під сталим кутом ϕ до осі заготовки і розташованою до траєкторії переміщення інструменту під кутом γ [121; 122] (рис. 1.8).

Такий інструмент простий за конструкцією і не вимагає складної схеми його переміщення. Недоліком цього інструменту є необхідність індивідуального виготовлення для різних профілів.

Конфігурація перехідних перерізів інструменту може бути і відмінною від вищеописаної. Вибір конфігурації перехідних перерізів зазвичай обумовлюється необхідним набором металу в різних діаметральних перерізах виробу й умовами стійкості заготовки в процесі обкочування [123–125]. У процесі формування днищ на трубних заготовках ротаційним обкочуванням, у тому числі і ІТ, отримувана товщина днища залежить від початкової товщини, міри редуціювання і параметрів проведення процесу. Ця товщина сті-

нки не задовольняє вимоги до конкретних виробів. Відомі різні способи її зміни.

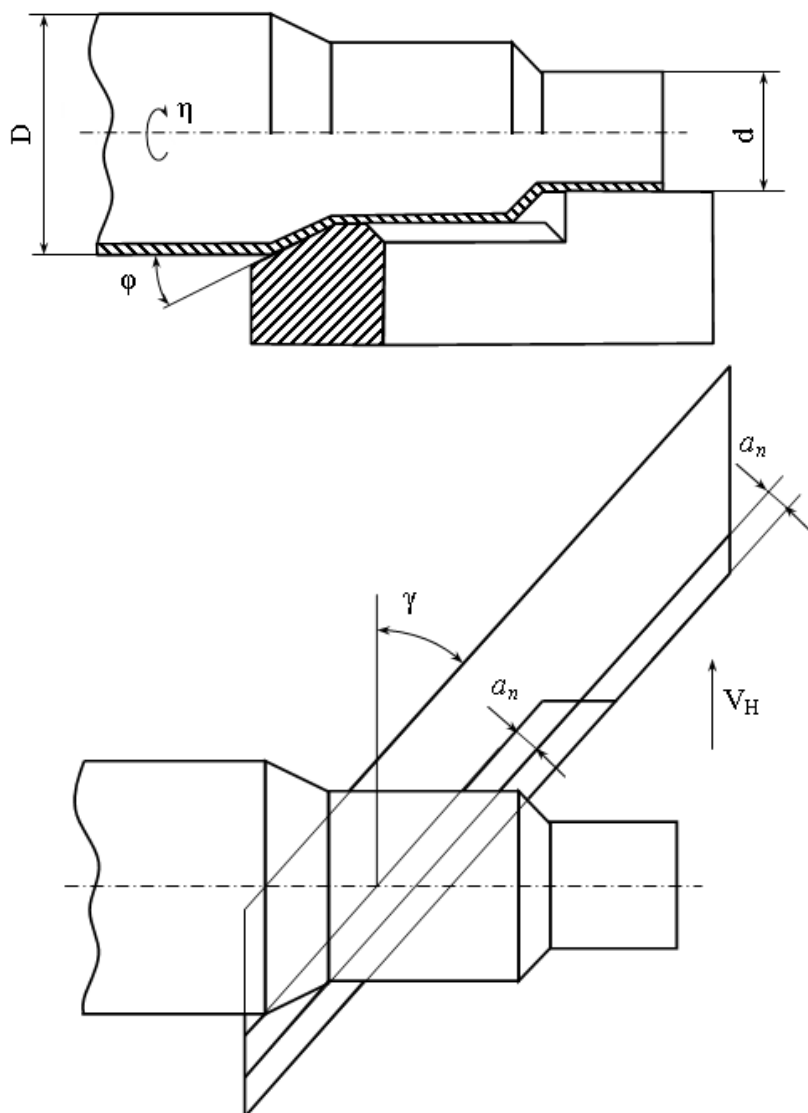


Рисунок 1.8 – Інструмент з робочою поверхнею, нахиленою під сталим кутом ϕ до осі заготовки і розташований під кутом γ до траєкторії його переміщення

Поширеним способом виготовлення є обкочування на формувальному інструменті упорного виступу, що обмежує плин металу уздовж твірної і призводить до збільшення товщини стінки як у днищі, так і у перехідній ділянці [123; 120]. Також це рішення використовують для зменшення довжин отримуваних днищ. Це обмеження застосовують у разі, якщо сили тер-

тя днища об упорний виступ не призводять до виникнення значного крутного моменту, що не викликає скручування сформованого днища.

Для збільшення товщини стінки в днищі застосовують і послідовне обкочування, наприклад, шляхом осьового переміщення інструменту тертя, виконаного у вигляді замкнутої матриці, формують конічне днище, переформують його у сферичне днище [126; 127] з горловиною, забезпечуючи заздалегідь у ньому необхідний об'єм металу.

У ДДМА також запропонований спосіб формування товстостінного днища на тонкостінній трубі [128], при цьому горловина формується поетапно. Усі етапи здійснюють за один хід інструменту. Така горловина використовується в легких металевих конструкціях.

Для збільшення товщини стінки в днищі можливе й попереднє збільшення товщини ділянки труби, що деформується, як обкочуванням [129], так і іншими способами, наприклад електровисадженням [130]. Для зменшення товщини стінки в днищі застосовують попереднє профілювання [131], що виконується або різанням, або розкочуванням.

1.6 Теоретичні й експериментальні дослідження процесів ротаційного обкочування

Аналіз праць П. І. Полухіна, І. М. Потапова, В. І. Залеського, С. І. Борисова; Ю. М. Матвеева, Я. Є. Осади, В. Г. Капоровича, І. І. Соркіна, Є. А. Близнюкова, М. І. Могильного, Я. І. Литвинського, М. Я. Бровмана, Є. А. Колмакова, М. Я. Шехета та інших показав, що дотепер досить детально вивчено процес обкочування сферичних, еліпсоїдних, плоских днищ і «пляшкової» горловини на одношпindelних і роторних машинах обкочування як з поворотним, так і з тангенціальним інструментом.

Значний внесок при цьому в дослідження технології, розроблення устаткування і впровадження способів ротаційного обкочування ІТ зробили співробітники керованої В. Г. Капоровичем галузевої лабораторії обкочування ДДМА: М. П. Найденов, Л. Н. Ващук, В. К. Удовенко, В. Г. Серета, В. С. Рижиков, В. О. Паламарчук, О. В. Маковецький, В. Г. Макшанцев, М. О. Афанасьєва, В. І. Юдін, О. М. Кулік, Я. Є. Пиц та ін. Усі дослідники вивчали процес обкочування інструментом з лінійчастою робочою поверхнею. При використанні цього інструменту зміну кута нахилу до осі шпинделя здійснюють складним переміщенням інструменту (у окремому випадку – поворотом навколо осі, перпендикулярній осі заготовки) або при прямолінійному тангенціальному русі шляхом виготовлення його профілю складної форми. При цьому важливо враховувати залежність зміни кута нахилу робочої поверхні. Ця залежність зазвичай обирається у вигляді кусково-лінійної функції.

В. Г. Капоровичем був проведений якісний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) з використанням методики, застосованої В. С. Смирновим для вивчення поперечно-гвинтового прокатування, який дозволяє пояснити деякі особливості формозмінення при ротаційному обкочуванні [132]. На отримане поле напружень накладається поле напружень, що виникає під дією тангенціальних сил. Побудовані епюри напружень у стінці обкочуваної заготовки дозволили якісно описати механізм її деформування.

У тій самій роботі запропоновано й інші шляхи розв'язання задачі визначення НДС при ротаційному обкочуванні трубчастих заготовок. Розглянуто умову рівноваги елементарної ділянки тонкостінної оболонки, що деформується, за безмоментною теорією (рис. 1.9).

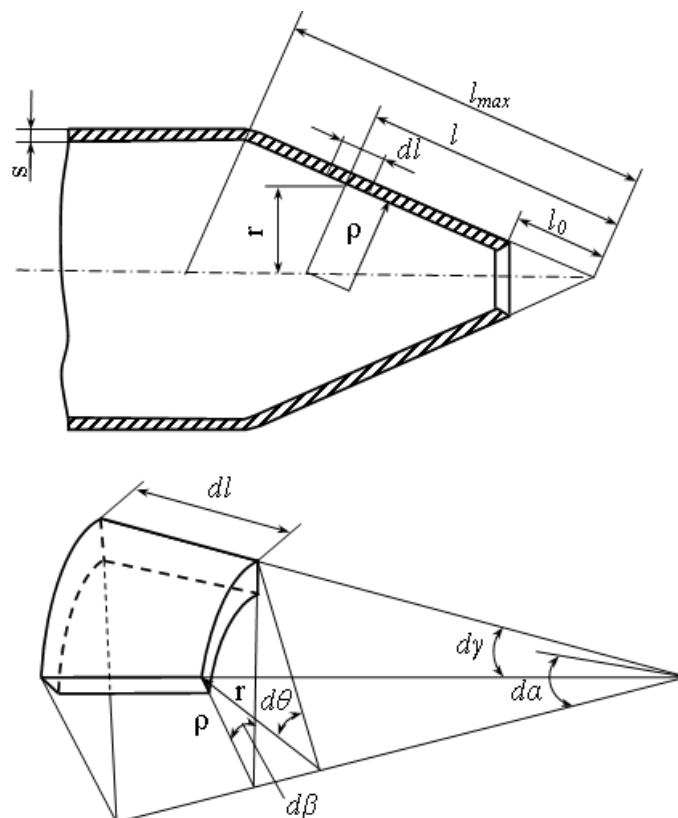


Рисунок 1.9 – Схема до розрахунку НДС тонкостінної заготовки при обкочуванні

У праці [133] Є. А. Близнюкова і С. В. Окара для опису НДС обрали модель, яка пояснює механізм редуціювання тонкостінних трубчастих заготовок багаторазовим згинанням зі стисканням перед контактною поверхнею інструменту. При цьому використано припущення, що схема деформування плоска, скручування відсутнє. Тангенціальні напруження, що виникають від сил тертя, рівномірно розподілено по товщині стінки. Сили, що впливають з боку інструменту на заготовку, зосереджені й спрямовані по нормалі до поверхні інструменту.

Оригінальну методику визначення НДС при обкочуванні запропоновано в роботі [134]. П. І. Полухін і співавтори розглядають рівновагу тонкостінних оболонок за відсутності розподілених моментів за її поверхнею. Далі, вважаючи метал лінійним в'язкопружним середовищем і використовуючи відомий метод [135], О. О. Ільюшин, Б. Є. Победря зводять розв'язання за-

дачі визначення НДС у пластичній області до розв'язання крайової задачі для пружних середовищ. У роботі не наведено числові розрахунки для конкретного випадку й немає порівняння результатів розрахунку з результатами експерименту.

У роботі [136] запропоновано спрощену схему формозмінення, яка припускає миттєве подання інструменту при зафіксованій заготовці з її подальшим деформуванням за один оберт. Запропоновано просте кінематично можливе поле швидкостей, що задовольняє умові нестискуваності, крайовим умовам на границі з інструментом і умові неперервності нормальної компоненти швидкості на границі жорстких зон.

Значна кількість теоретичних рішень присвячена визначенню контактного напруження при ротаційному обкочуванні. Зокрема, у роботі [137] з цією метою розглянуто задачу про тиск плоского штампу на плоский зріз жорсткопластичної товстостінної заготовки нескінченної довжини. Отримані формули для визначення середнього значення нормального контактного напруження, повної сили обкочування дозволили зробити спробу врахувати швидкісні умови процесу. Необхідно зважати на суттєві спрощення, прийняті автором, зокрема використання такої сітки ліній ковзання, коли пластична область має контакт з внутрішнім контуром заготовки в одній точці, що відповідає досить вузькому діапазону обтискань.

У роботі [138] закономірність для визначення середнього значення нормального контактного напруження прийнято відповідно до відомого розв'язання для розподілу несної здатності труби, що перебуває під дією зовнішніх рівномірно розподілених сил [139].

У роботі [140] для визначення нормального контактного напруження й у зоні деформування використано диференціальні рівняння плоского плину в прямокутній системі координат. За припущенням, що складова швидкості точок металу за напрямком кола визначається зменшенням радіусу заготовки і лінійно змінюється за товщиною стінки, отримано відповідний аналітичний вираз.

У роботі [141] із системи диференціальних рівнянь рівноваги й умови пластичності для плоскодеформованого стану після спрощень отримано рівняння для визначення величини середнього тиску металу на інструмент при обкочуванні ексцентрикових переходів на кінцях труб. Це рівняння в роботі [141] не розв'язувалося через надзвичайну складність визначення граничних умов процесу, а використано для критерійного аналізу процесу обкочування. На підставі отриманих критерійних рівнянь отримано загальну залежність процесу обкочування.

У зв'язку з тим, що складний характер формозмінення при обкочуванні не дозволяє побудувати досить точну в широкому діапазоні технологічних параметрів залежність для визначення середнього контактного напруження без залучення експериментальних даних, у роботі [141] запропоновано методику побудови аналітичної залежності типу

$$\frac{p_{cp}}{k} = A\mu^{\gamma_1} \cdot \left(\frac{S_0}{R_0}\right)^{\gamma_2} \cdot \left(\frac{b_{cp}}{R_0}\right)^{\gamma_3},$$

де p_{cp} – середнє нормальне контактне напруження;

k – опір зсуву;

A, γ_i – коефіцієнти;

S_0, R_0 – початкові товщина стінки і радіус труби;

b_{cp} – середнє значення ширини площі контакту;

μ – коефіцієнт тертя.

В. К. Удовенко, використовуючи елементи теорії подібності, математичної статистики й теорії планування експерименту, отримав математичну модель розподілу контактних напружень у зоні деформування й інженерну методику розрахунку енергосилових параметрів процесу обкочування на роторних автоматах [142]. Автор зазначає, що однією з головних умов є теплова подібність процесу деформування, коли разом з дотриманням рівності

температур моделі й натури необхідно забезпечити рівність швидкості деформування й швидкості ковзання заготовки на контактній поверхні.

В. С. Рижикивим [143] при дослідженні основних енергосилових і технологічних параметрів процесу ротаційного обкочування еліпсоїдних і плоских днищ отримано закономірності, які пов'язують максимальні під час процесу значення потужності N , осьову P_z , радіальну P_x і тангенціальну P_y складові повної сили обкочування й відносного витягування δ з технологічними режимами процесу й геометричними розмірами заготовок.

Дослідженню обкочування кінців довгих і криволінійних труб присвячено роботу В. Г. Середи [111]. Вченим додатково проводилося дослідження технології отримання «довгих» переходів (з довжиною зредуцьованого кінця не більше двох діаметрів заготовки). Розв'язувалася задача визначення контактних напружень і характеру їх розподілу при обкочуванні ексцентричних переходів на кінцях труб. В отриманому розв'язку було прийнято припущення про те, що об'єм металу заготовки в місці контакту з інструментом знаходиться в умовах плоскодеформованого стану. Задача в трьохвимірній постановці не розв'язувалась.

О. В. Маковецький [144] досліджував технологічні можливості й технологічні параметри ротаційного обкочування горловини тангенціальним інструментом з гребенями. При цьому автор зробив висновок, що «енергосилові параметри нового процесу не перевищують аналогічних значень традиційного», а «характер зміни кривих, що відповідають вказаним енергосиловим параметрам при обкочуванні інструментом з гребенястою і гладкою поверхнею, ідентичний».

В. О. Паламарчук [141] досліджував параметри інструменту обкочування й зони деформування «в найбільш поширених випадках ротаційного обкочування сфери або конуса на кінцях труби». Дослідник встановив, що при обкочуванні тангенціальним інструментом орієнтація поверхні контакту може бути описана двома кутами φ і θ , що характеризують, відповідно, кут

нахилу дотичної до осі заготовки і кут підйому робочої поверхні інструменту. При цьому були визначені співвідношення, що пов'язують їх.

Значна кількість праць присвячена питанню визначення деформованого стану й розподілу товщини стінки уздовж твірної. Причому під час аналітичного опису процесу зазвичай нехтують витяжкою уздовж твірної [145] і вважають, що заготовка в процесі обкочування є тонкостінною оболонкою. Відомо, що товщина стінки на ділянці деформування збільшується при одночасному зменшенні діаметру, при цьому відношення товщини стінки до діаметра значно відрізняється від величини $S/D = 0,1$. За даними, наведеними авторами роботи [146], деформація товстостінних заготовок при критичному значенні відносної товщини стінки, що визначається рівністю відношення внутрішнього діаметра до зовнішнього $d_{\text{вн}} / d = 0,45$, призводить до витягування стінки навіть у разі відсутності оправки за рахунок виникнення значних розтягувальних напружень.

Ще більша кількість робіт присвячена експериментальному визначенню товщини стінки в отримуваній горловині. Зокрема, у роботі [147] деформований стан визначали експериментально шляхом безпосередніх вимірювань товщини стінки виробу до і після ротаційного обкочування, а також вимірюванням відстаней між рисками, нанесеними на внутрішню поверхню координатної сітки. Відмічено, що в разі малої довжини деформовуваної ділянки при обкочуванні горловини балонів довжина твірної залишається практично незмінною. При більшій довжині цієї ділянки торець заготовки фіксується в осьовому напрямі, а довжина твірної заготовки збільшується, залежно від цього змінюється характер розподілу деформацій.

Аналіз робіт, проведених у галузі ротаційного обкочування, показує, що на сьогодні цей процес вивчений у достатньому обсязі з точки зору визначення енергосилових параметрів при виготовленні різних днищ, горловин балонів високого тиску, переходів, а також розроблення принципів основ, необхідних для проектування устаткування. Аналіз методик проектування технологічного процесу й інструменту дозволив встановити, що най-

більше поширення отримали графоаналітичні методи розрахунку, що базуються, як правило, на емпіричних рішеннях. Однак не встановлено НДС металу заготовки, який дозволив би встановити ефективні параметри процесу тангенціального обкочування ІТ для підвищення герметичності днищ.

1.7 Термошвидкісні параметри ротаційного обкочування труб

Перед ротаційним обкочуванням труби заздалегідь нагрівають до температури 1150...1200 °С. Під час деформування температура їх підвищується, що пов'язано з тепловиділенням під час деформування й тертям об інструмент. До закінчення формування заготовки її температура може досягати 1340 °С при початковій 1150 °С [148]. Для запобігання перегріванню заготовки її охолоджують водою.

Слід зазначити, що вироби зі сталевих труб, отримані гарячим ротаційним обкочуванням, піддають, як правило, подальшому термообробленню. Особливо це стосується балонів, призначених для експлуатації під високим тиском. У той же час велика кількість деталей машинобудування, які не схильні до таких навантажень і виготовляються з низьковуглецевих сталей, може експлуатуватися й без обов'язкового термооброблення. Традиційний спосіб забезпечення потрібного рівня механічних властивостей сталевих виробів – введення легувальних елементів і застосування термічного оброблення. Але цей спосіб призводить до суттєвого збільшення собівартості отриманих заготовок за рахунок підвищення витрат енергії на їх виробництво. Розроблення нових технологічних процесів нагрівання, оброблення тиском і охолодження відкриває широкі можливості підвищення довговічності, надійності роботи машин за рахунок підвищення якості деталей, що входять до їх складу, зниження їх металоємності й собівартості. Тому останнім часом увага приділяється розробленню й дослідженню нових процесів отримання виробів підвищеної якості – термомеханічного оброблення (ТМО).

Питанню отримання необхідних механічних характеристик металу, що обробляється тиском, шляхом застосування ефективних термомеханічних режимів деформування, присвячена значна кількість робіт [149–167]. У них встановлюють кореляційні закономірності між механічними характеристиками й окремими параметрами структури металу, його хімічним складом і режимами оброблення. Наприклад, відомі закономірності найважливіших показників якості матеріалу, зокрема це залежність міцності й в'язкості від величини зерна [153; 154; 168; 169].

У роботі [166] відзначається, що опір деформуванню зростає зі збільшенням вмісту легувальних елементів, зменшенням величини зерна фериту, а також зі збільшенням кількості й зменшенням дисперсності цементиту. При цьому на опір деформуванню сталі чинить переважний вплив величина зерна фериту.

У роботі [151] наведено результати досліджень поєднання операцій термоциклування й деформування сталі 22К, що полягає в в ротаційному обкочуванні (вісім циклів) при температурі 900 °С з обтисканням за прохід 10 %, примусовим охолодженням між проходами до температури 730 °С і подальшим нагріванням. Показано, що деформований метал випробовує циклічні фазові перетворення, які ініціюються й протікають у процесі періодичного пластичного деформування, що дозволяє отримати структуру з сильно подрібненим зерном і істотно підвищити його експлуатаційні характеристики (межі міцності й плинності підвищуються в середньому на 25...30 %, а ударна в'язкість – в 1,5...2 рази).

Висновки за розділом 1

1. Значну кількість виробів, які мають днища, раціонально отримувати тангенційним обкочуванням ІТ. Аналіз стану проблеми дозволив виділити групи питань, дослідженню яких присвячено цю роботу. Їх розв'язання

під час виконання роботи буде сприяти визначенню технічних можливостей процесу гарячого тангенційного обкочування труб, підвищенню техніко-економічних показників продукції, що випускається.

2. Застосування способу оброблення вимагає проведення аналізу процесів формозмінення і взаємодії заготовки з робочою поверхнею інструменту, а відповідно, і визначення границь його використання. Більше того, це питання стосується окремих випадків виробництва виробів із дном, що потребують підвищених експлуатаційних характеристик, які вимагають особливих термомеханічних режимів деформування.

3. Для розроблення раціональних технологічних процесів тангенційного обкочування ІТ необхідно встановити кількісні оцінки формоутворення, отримання достовірних даних про вплив умов тангенціального обкочування, параметрів інструменту, умов протікання процесу на геометрію отримуваних виробів. Вирішення цього завдання потребує математичних і скінченно-елементних моделей для використання у дослідних цілях при проектуванні технології й визначення основних характеристик устаткування з точки зору підвищення точності й міри стабільності результативних геометричних характеристик.

4. Початок робіт у дослідженні процесу ротаційного обкочування інструментом тертя пов'язаний з впровадженням машин тангенціального обкочування для виробництва днищ балонів. На сьогодні активно розширюється номенклатура виробів, які отримують цим способом, при цьому були впроваджені тангенціальний ІТ і розроблені різні схеми устаткування обкочування.

5. Проведений огляд і аналіз способів виготовлення виробів із труб показує, що дотепер практика накопичила значний досвід використання цих способів. Технічні характеристики способів і їх можливості відрізняються в кожному конкретному випадку. Аналіз літератури, присвяченої виробництву днищ, дозволив встановити актуальні задачі для розроблення технології виготовлення днищ із заданими вимогами. Вирішенню цих питань присвячено цю роботу.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТАНГЕНЦІАЛЬНОГО ОБКОЧУВАННЯ ІНСТРУМЕНТОМ ТЕРТЯ

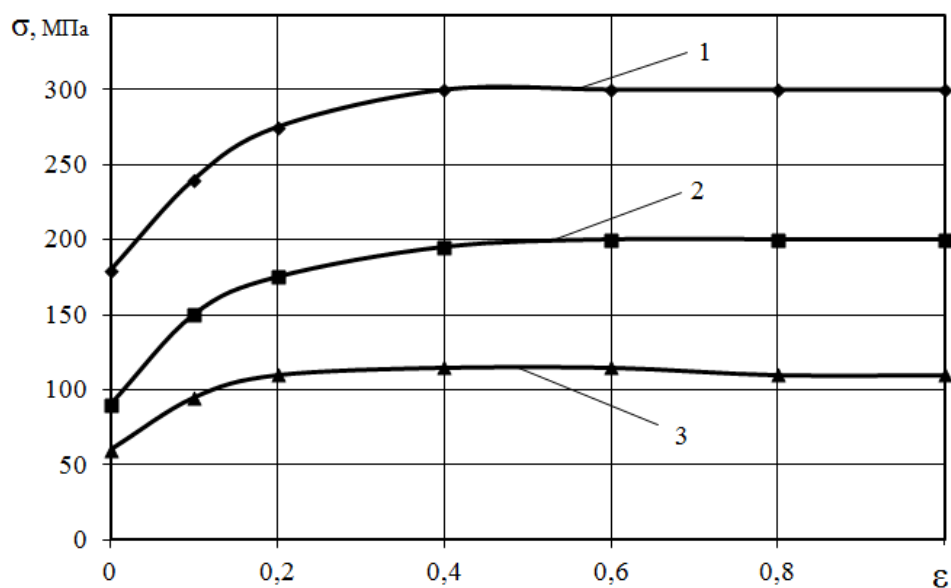
2.1 Методика дослідження МСЕ обкочування сферичних днищ інструментом тертя

На основі літературного огляду було встановлено, що одним з прогресивних методів виробництва днищ балонів є спосіб тангенціального обкочування ІТ. При обкочуванні труб важливим параметром є встановлення розподілу температур за поздовжнім перерізом заготовки, а також встановлення НДС металу труби. Важливий інтерес полягає у встановленні початкової температури трубної заготовки та подачі заготовки в ІТ для різних геометричних параметрів труб [170]. Важливий науковий і практичний інтерес представляє визначення механізму впливу тангенціального обкочування ІТ на формування днища в залежності від геометричних параметрів труб і термошвидкісних умов деформування. Встановлення НДС металу труби та механізму формування днища доцільно проводити методом скінченних елементів (МСЕ) [171]. Для цього моделювання розроблено спеціальну методику досліджень. Для досліджуваного матеріалу обрано конструкційну сталь 34ХН.

На рисунках 2.1–2.2 наведено механічні властивості та теплофізичні характеристики сталі 34ХН.

Вихідними даними та граничними умовами для моделювання процесу обкочування ІТ були: модуль Юнга для цієї сталі – $2 \cdot 10^5$ МПа; коефіцієнт Пуассона – 0,32, температура інструменту – 30 °С, коефіцієнт тертя по Зібелю – 0,35. Число скінченних елементів задавалося 80 000. Температура підігрівання заготовки – 900 °С; 1050 °С та 1200 °С, частота обертання

заготовки – 1150 об / хв, швидкість подавання інструменту – 0,5 мм / с, діаметр труби – 90 мм, товщина стінки варіювалася в діапазоні 9 мм; 6 мм і 4,5 мм.



1 – при $t = 800$ °C; 2 – при $t = 1000$ °C; 3 – при $t = 1200$ °C

Рисунок 2.1 – Опір деформуванню сталі 34ХН при різних температурах [171]

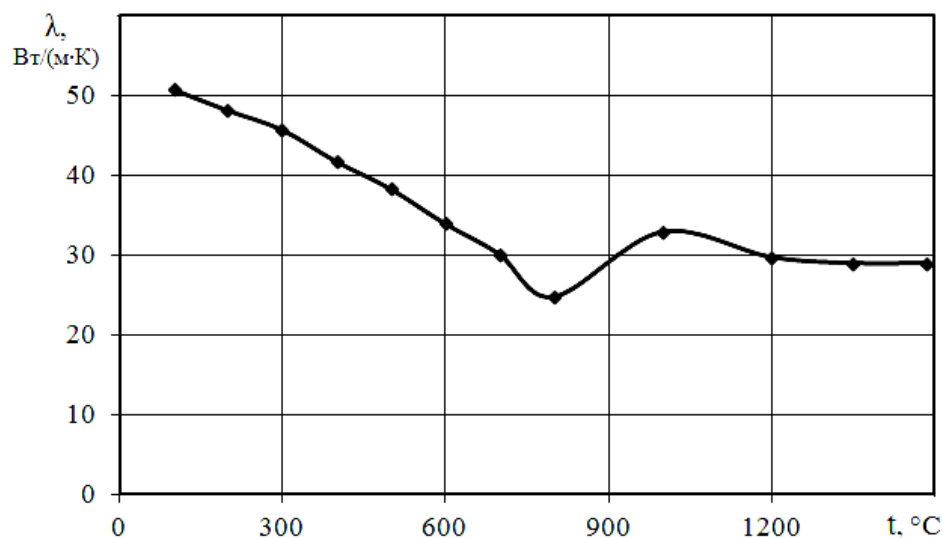


Рисунок 2.2 – Залежність теплопровідності сталі 34ХН від температури [171]

З метою отримання універсальних результатів для можливості їх перенесення на інші матеріали та розміри заготовок доцільно досліджувати

відносні параметри. Для встановлення впливу температури на процес формування днища був обраний параметр гомологічної температури (відношення температури нагрівання до температури плавлення). При температурі плавлення сталі 34ХН близько 1500 °С гомологічна температура ($t_{гом}$) дослідження буде варіюватися у діапазоні 0,6; 0,7 та 0,8 відповідно. Також був заданий відносний діапазон варіювання співвідношення діаметра труби і товщини стінки $D/s = 10; 15; 20$. Варіювання відносної товщини стінки дозволить визначити оптимальний типорозмір трубних заготовок, які можна обкочувати ІТ.

Подача трубної заготовки в ІТ варіювалась у діапазоні 70 мм; 80 мм і 90 мм. Відносна подача – вільна частина заготовки, яка обкочувалася ІТ (l/D), варіювалася в діапазоні 0,8; 0,9 та 1,0. Для встановлення впливу температури на обкочування днища приймалася відносна подача заготовки в ІТ, яка дорівнювала $l/D = 0,8$ і була сталою. Спроектовано спеціальний ІТ для обкочування сферичних днищ (рис. 2.3) [172].

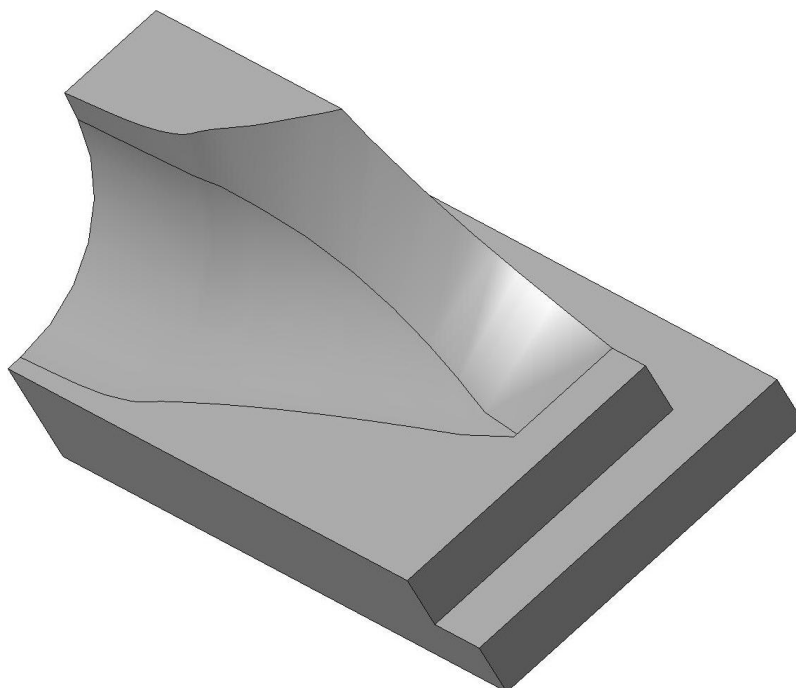


Рисунок 2.3 – Тривимірна модель ІТ для тангенціального обкочування днища

Розроблено тривимірну модель для моделювання МСЕ процесу тангенціального обкочування ІТ (рис. 2.4).

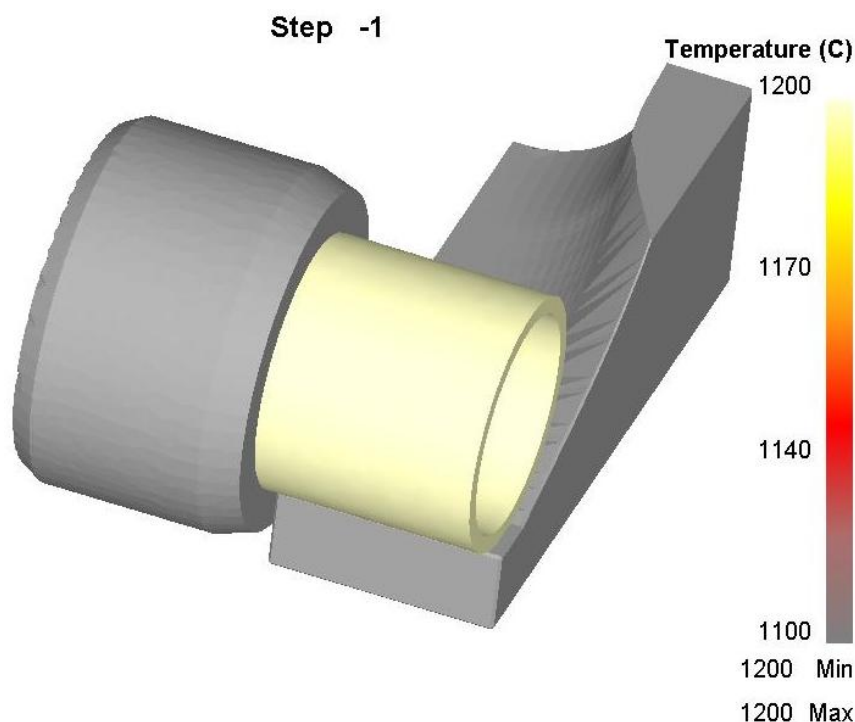


Рисунок 2.4 – Скінченно-елементна модель процесу тангенціального обкочування ІТ трубних заготовок на початковому етапі

На першому етапі, відповідно до запропонованої методики дослідження, встановлювався вплив 2 факторів (температура нагрівання заготовки до обкочування та відносна товщина стінки заготовки). Зазначені фактори варіювалися на 3 рівнях для можливості встановлення математичної моделі 2-го ступеня. Для встановлення цієї моделі необхідно промоделювати 9 схем обкочування.

За результатами моделювання встановлено: градієнт температур уздовж трубної заготовки (рис. 2.5), розподіл інтенсивності логарифмічних деформацій, середніх напружень та інтенсивності напружень. За цими даними встановлювався показник жорсткості схеми напруженого стану днища в місці змикання стінок, а також формозмінення заготовки при тангенціальному обкочуванні ІТ.

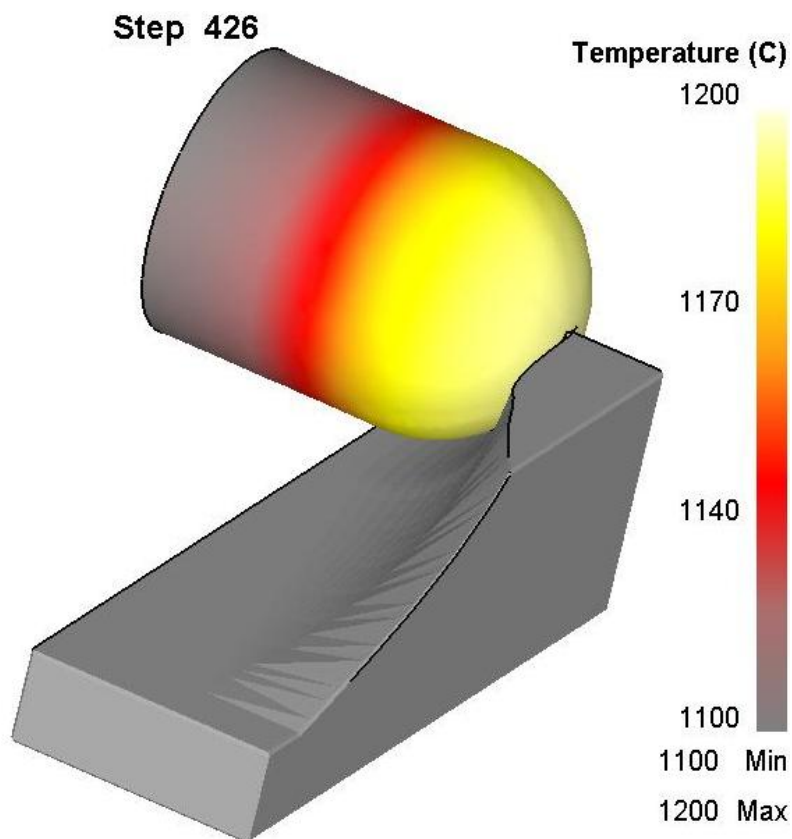


Рисунок 2.5 – Скінченно-елементна модель процесу тангенціального обко-
чування ІТ на завершальному етапі

За результатами планування скінчено-елементного моделювання буде встановлена закономірність показника схеми напруженого стану днища у місті змикання стінок заготовки в залежності від різних відносних діаметрів труби D/s та гомологічної температури нагрівання труби ($t_{гом}$).

Після встановлення раціональної гомологічної температури нагрівання трубних заготовок, яка забезпечує повне закриття отвору, необхідно визначити рекомендовану подачу заготовки l/D , при різній відносній товщині стінки труби (D/s), яка б сприяла закриттю отвору у днищі та появі високого рівня стискаючих напружень при високій температурі для заварювання днища [173]. За цим етапом необхідно додатково дослідити 9 схем процесу тангенціального обкочування ІТ при встановленій вище температурі нагрівання заготовок при різних значеннях відносної подачі та відносній товщині стінки.

На третьому етапі дослідження необхідно перевірити вплив операції підсадки сферичного днища на формування НДС у місці змикання стінок труби та енергосилові параметри процесу, як це було запропоновано у патенті [29]. Для цього необхідно було після обкочування сферичного днища підсадити його на різний ступінь деформації. Ступінь деформації обчислювався

$$\varepsilon = \frac{R - H_{\text{дн}}}{R},$$

де R – радіус днища;

$H_{\text{дн}}$ – поточна висота днища.

Для цього були розроблені 3D скінчено-елементні моделі процесу підсадки сферичного днища (рис. 2.6).

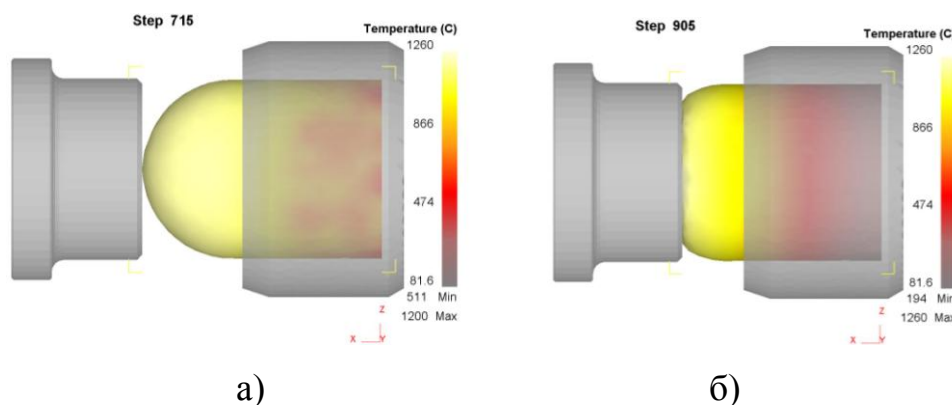


Рисунок 2.6 – 3D моделі процесу підсадки сферичного днища: а – початковий етап; б – завершальний етап

Підсадка проводилась на два ступеня деформації: 15 % та 30 %. За результатами досліджень необхідно встановити ефективну ступінь підсадки, яка сприяє підвищенню якості днища.

2.2 Планування процесу моделювання тангенціального обкочування ІТ

Проектування процесу тангенціального обкочування ІТ сферичних днищ стане можливим на основі рекомендацій, які будуть встановлені після проведення досліджень МСЕ. Тангенціальне обкочування відноситься до тривимірних задач обробки тиском. Деформування трубної заготовки процесами тангенціального обкочування буде характеризуватися закриттям отвору та зменшенням довжини труби, а також збільшенням товщини днища. НДС заготовки в процесі тангенціального обкочування залежить від таких основних факторів: зовнішній діаметр і товщина стінки труби, початкова температура обкочування та величина подачі. Для встановлення закономірностей цих процесів доцільно використовувати плани другого порядку. До таких планів відносяться плани повного факторного експерименту (ПФЕ) [174]. Плани ПФЕ дозволяють встановити великий спектр інформації [175]. Однак обмеженням цього плану є доцільність їх використання при незначній кількості факторів. Зазначений план задовольняє завданням, які поставлені в дослідженні. Кодова позначка факторів (x) визначається через натуральне значення (X_i) [176]:

$$x_i = \frac{X_i - X_i^0}{\Delta X_i},$$

де x_i – кодова позначка фактора;

X_i – натуральна позначка фактора;

X_i^0 – натуральна позначка основного рівня;

ΔX_i – інтервал варіювання.

Дослідження тангенціального обкочування є складною науковою задачею. На цей процес чинить вплив значна кількість факторів. Для

оптимізації витрат часу для дослідження процесу доцільно залишити тільки основні фактори, які значною мірою впливають на результат. Швидкість подавання інструменту, кутова швидкість обертання заготовки та коефіцієнт тертя під час моделювання можна прийняти сталими [177]. З теорії оброблення металів тиском відомо, що марка сталі не чинить значного впливу на формозмінення заготовки в процесі деформування [177].

Аналіз літературних даних з дослідження процесу обкочування (див. розділ 1) дозволив визначити, що основними факторами, які впливають на НДС металу труби, є температура деформування, відносна товщина стінки труби (D/s) і відносна подача заготовки в інструмент (l/D). Крім цього, на практиці заготовки зі сферичним днищем обкочуються в конкретному діапазоні відносної товщини стінки пустотілої заготовки (D/s), яка є першим основним параметром і варіюється в діапазоні 10...20. Балони з пустотілих заготовок з відносною товщиною стінки (D/s), меншою, ніж 10, при обкочуванні не використовуються внаслідок зниження технологічності процесу обкочування (такі заготовки доцільно виготовляти зворотним витискуванням). У результаті це співвідношення є крайньою границею при дослідженні. Відносна товщина стінки труби, більша від 20, буде призводити до втрати стійкості заготовки при тангенціальному обкочуванні ІТ, що пояснюється тонкою стінкою труби, яка обкочується [178]. У результаті ця межа буде нижньою границею. Середній діапазон відносної товщини стінки (D/s) пустотілої заготовки становить 15.

Другим фактором, який чинить вплив на заварювання отвору днища, є початкова температура заготовки до обкочування [99]. Для універсальності встановлюваних результатів було вирішено використовувати гомологічну температуру (t_{20M}). У процесі обкочування ІТ температура буде підвищуватися. Умовою заварювання металу днища труби є висока температура, яка повинна знаходитись близько 0,8 температури плавлення. Низька температура не буде сприяти заварюванню стінок труби [179], а зависока

може призвести до перегрівання та перепалення металу заготовки, що в результаті знизить механічні властивості виробів.

Третім важливим параметром, який чинить вплив на формозмінення заготовки при тангенціальному обкочуванні ІТ, є відносна подача труби в ІТ (l/D). Невеликий об'єм металу заготовки не призведе до повного закриття отвору труби при обкочуванні. Значна відносна подача заготовки в ІТ буде призводити до невиправданого збільшення товщини днища, що впливатиме на підвищення витрат металу, збільшення маси виробу, а також збільшення витрат електроенергії на процес обкочування. Мінімальна подача заготовки в інструмент розрахована з умови розгортання половини довжини сферичного днища, яка для діаметра труби 90 мм складає 70 мм. Максимальна подача заготовки дорівнює діаметру труби (90 мм). Середнім рівнем для цього фактора буде подача заготовки 80 мм. З метою перенесення результатів моделювання на інші розміри пустотілих заготовок (для забезпечення універсальності встановлених закономірностей) дослідження проводимуться у відносних величинах (l/D) подачі заготовки в ІТ. У відносному вигляді цей фактор буде варіюватися в діапазоні 0,8; 0,9 і 1,0.

Обрані три фактори значно збільшать кількість досліджень, тому було прийняте рішення розбити моделювання на два етапи. На першому етапі встановлюватиметься рекомендована температура підігрівання заготовки, яка після обкочування не буде призводити до перегрівання металу. При цьому буде варіюватися відносна товщина стінки труби при сталій відносній подачі заготовки ($l/D = 0,8$) [180].

На другому етапі після встановлення температури нагрівання необхідно буде встановити вплив відносної подачі заготовки в ІТ при змінній товщині стінки на механізм закриття отвору днища [181].

За результатами планування першого етапу дослідження процесів тангенціального обкочування ІТ обрані 2 фактори, що чинять основний вплив на зазначений процес. Вплив обраних факторів на заварювання стінки отвору труби має нелінійну закономірність, для її встановлення потрібні три

точки на кожен фактор. У результаті доцільно використовувати плани другого порядку [174]. Для цього можна використати повнофакторний план по типу 3^n [176]. Обрані фактори в закодованому та натуральному вигляді наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Фактори першого етапу дослідження при моделюванні процесу тангенціального обкочування ІТ по типу 3^2

| Фактори дослідження та інтервали їх варіювання | X_1 | X_2 |
|---|------------------|-------|
| | $t_{\text{гом}}$ | D/s |
| Інтервал варіювання ΔX_i | 0,1 | 5 |
| Нижній рівень $X_i = -1$ | 0,6 | 10 |
| Середній рівень $X_i = 0$ | 0,7 | 15 |
| Верхній рівень $X_i = +1$ | 0,8 | 20 |

За результатами планування другого етапу дослідження процесів тангенціального обкочування ІТ також обрані 2 фактори, що чинять основний вплив на зазначений процес. Вплив обраних факторів на заварювання стінки отвору труби також має нелінійну закономірність, для її встановлення потрібні три точки на кожен фактор. У результаті доцільно використовувати повнофакторний план по типу 3^n . Обрані фактори в закодованому та натуральному вигляді наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Фактори другого етапу дослідження при моделюванні процесу тангенціального обкочування ІТ по типу 3^2

| Фактори дослідження та інтервали їх варіювання | X_1 | X_2 |
|---|-------|-------|
| | D/s | l/D |
| Інтервал варіювання ΔX_i | 5 | 0,1 |
| Нижній рівень $X_i = -1$ | 10 | 0,8 |
| Середній рівень $X_i = 0$ | 15 | 0,9 |
| Верхній рівень $X_i = +1$ | 20 | 1,0 |

Кількісно встановити ступінь заварювання стінок отвору труби можна на основі показника схеми напруженого стану (η) металу труби в зоні отво-

ру днища, тому функцією відгуку обрано цей показник. Показник схеми напруженого стану дозволить встановити знак і величину напружень у місці змикання стінок труби в безрозмірному вигляді, що дозволить перенести ці результати на матеріали, які не використовувалися в дослідженні.

Запропонована методика полягала в тому, що на торці пустотілої заготовки із зовнішнього та внутрішнього боку труби маркірувалися контрольні точки (вузли сітки скінченних елементів), за якими відстежувався показник η у місці змикання стінок днища. Для визначення цього показника встановлюється напружений стан. Показник напруженого стану визначається за формулою [157]

$$\eta = \frac{3\sigma_{cp}}{\sigma_i} ,$$

де σ_{cp} – середні напруження, МПа;

σ_i – інтенсивність напружень, МПа.

За результатами моделювання визначені графічні закономірності показника напруженого стану заготовки в зоні змикання стінок на кінцевому етапі обкочування для різних геометричних параметрів труб і відносної її подачі в ІТ. Для дослідження впливу двох факторів на трьох рівнях необхідно провести $3^2 = 9$ досліджень. У результаті буде отримано високу точність коефіцієнтів регресії [182; 183]. План-матрицю проведення досліджень наведено в таблиці 2.3 В останньому стовпчику таблиці 2.3 вказано значення функції відгуку Y_{ug} (показник схеми напруженого стану металу заготовки).

Рівняння регресії може бути представлено поліномом другого ступеня [182]

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^8 b_i \times x_i + \sum_{i=1}^8 b_{ij} \times x_i \times x_j + \sum_{i=1}^8 b_i \times x_i^2 .$$

Таблиця 2.3 – План-матриця математичного дослідження процесу тангенціального обкочування ІТ

| № | Кодова позначка | | Натуральна позначка | | Y_{ug} |
|---|-----------------|-------|---------------------|-------|----------|
| | X_1 | X_2 | D/s | l/D | η |
| 1 | -1 | -1 | 10 | 0,8 | 1,97 |
| 2 | 0 | -1 | 15 | 0,8 | 1,2 |
| 3 | +1 | -1 | 20 | 0,8 | 1,51 |
| 4 | -1 | 0 | 10 | 0,9 | -2,96 |
| 5 | 0 | 0 | 15 | 0,9 | -4,24 |
| 6 | +1 | 0 | 20 | 0,9 | -3,77 |
| 7 | -1 | +1 | 10 | 1,0 | -3,1 |
| 8 | 0 | +1 | 15 | 1,0 | -3,81 |
| 9 | +1 | +1 | 20 | 1,0 | -3,38 |

За результатами планування досліджень отримуємо закономірності, що описують вплив режимів обкочування на показник схеми напруженого стану заготовки в осьовій зоні днища. Перехід від умовних параметрів до натуральних проводиться за такими формулами [182]:

$$X_1 = \frac{D/s - 15}{5}, \quad X_2 = \frac{l/D - 0,9}{0,1}.$$

2.3 Методика й устаткування для проведення експериментальних досліджень, вимірювальна й реєструвальна апаратура, оцінювання погрешностей вимірів

Експериментальні дослідження проводили на лабораторному стані для обкочування, створеному на базі модернізованого токарного верстата, оснащеного механізмами й устаткуванням, що забезпечують реалізацію процесу обкочування трубчастих заготовок, а також контроль і реєстрацію параметрів технологічного процесу.

Лабораторний обкатний стан (рис. 2.7) складається зі станини 1, на якій встановлені передня бабка 2, задня бабка 3 і поздовжній супорт 4. У передній бабці 2 розміщений шпindel 15, оснащений цанговим патроном 5, у якому за допомогою пневмоциліндра закріплювали заготовку. Піноль 6 задньої бабки 3 з формувальним інструментом 7 переміщували в осьовому напрямку за допомогою гідроциліндра 8. Також за допомогою гідроциліндра 8 приводили в рух поперечний супорт 9, розміщений на поздовжньому супорті. Тангенціальний інструмент тертя 10 закріплювали на поперечному супорті 9 з використанням столу тензометрування 11.

Допоміжне устаткування стану для обкочування складається з компресора, гідростанції й індукційної високочастотної установки. Нагрівання заготовки 12 перед обкочуванням здійснювали в індукторі 13, з'єднаному з індукційною установкою за допомогою гнучких тоководів, що охолоджуються водою. Пристрій переміщення 14 забезпечував переміщення індуктора 13 в осьовому напрямку й відведення його з технологічної зони обкочування.

Технічну характеристику лабораторного стану наведено в таблиці 2.4. Під час експериментальних досліджень реєструвалися такі параметри: сила обкочування на тангенціальному ІТ (радіальна P_x , тангенціальна P_y і осьова P_z), потужність головного приводу стану для обкочування, температура деформовуваної ділянки в процесі попереднього нагрівання T_0 і подальшого деформування T ; переміщення поперечного супорта й пінолі.

Для вимірювання й реєстрації цих параметрів застосовувалися: тензометричний стіл, месдоза пінолі, ходографи переміщення супорта і пінолі, а також стандартна тензометрична та вимірювально-реєструвальна апаратура: осцилограф Н105, чотирьохканальний тензометричний підсилювач ТА-5, перетворювач потужності ПО22.5, фотоелектричний пірометр ФЕП-4М, стабілізовані випрямлячі ТЕС-9 (рис. 2.8)

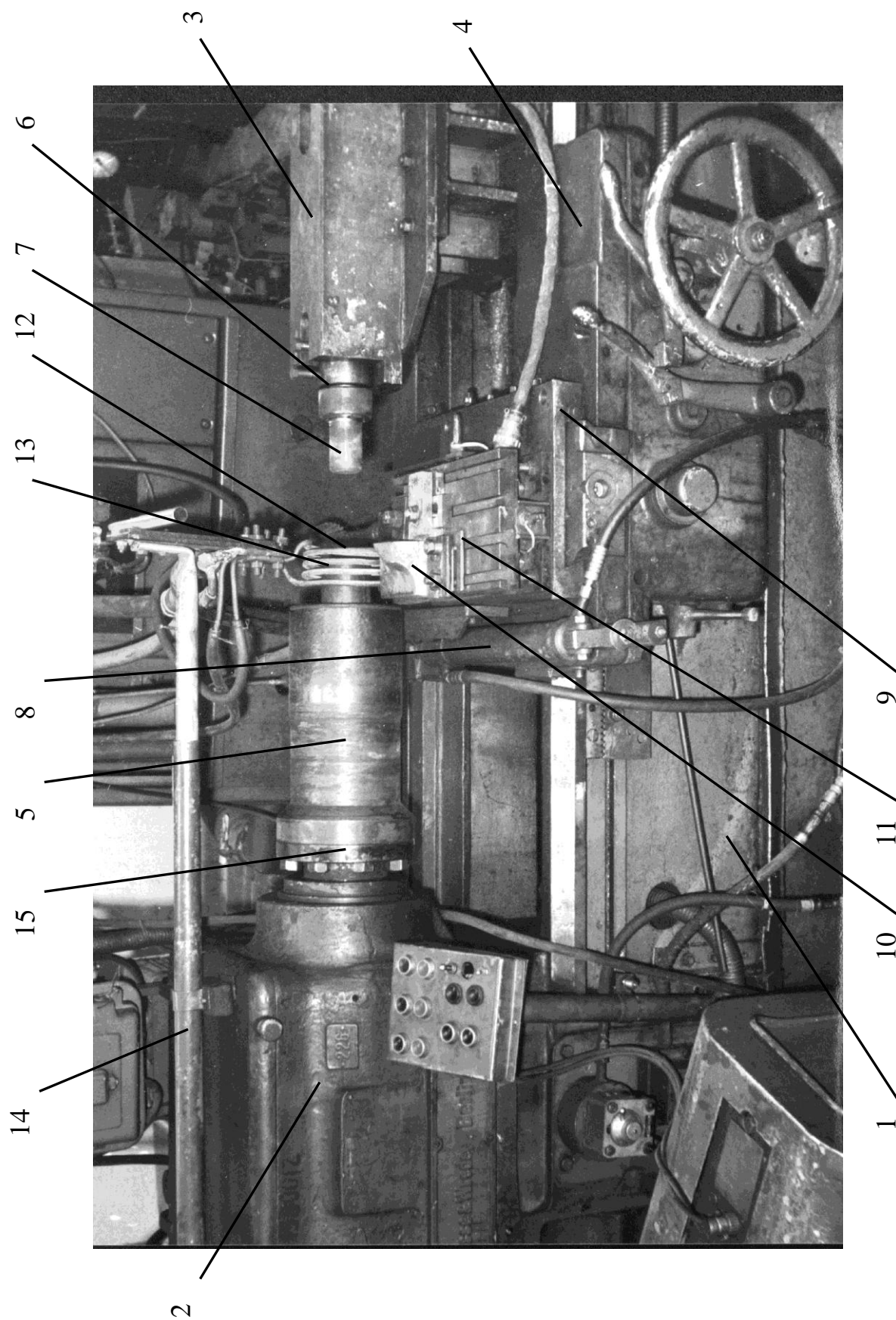


Рисунок 2.7 – Лабораторний стан для обточування

Таблиця 2.4 – Технічна характеристика лабораторного стану для обкочування

| Найменування параметра | Одиниці вимірювання | Значення |
|--|---------------------|-----------|
| Максимальний діаметр заготовки | мм | 120 |
| Максимальна довжина заготовки | мм | 450 |
| Потужність головного приводу | кВт | 30 |
| Кутова швидкість обертання шпинделя | с ⁻¹ | 34,6/69,2 |
| Максимальна сила на штоці пневмоциліндру за-тискання заготовки | кН | 42 |
| Хід поперечного супорта | мм | 400 |
| Швидкість переміщення поперечного супорта | мм/с | 0,4...40 |
| Діаметр гідроциліндру поперечного супорта | мм | 55 |
| Максимальна сила на штоці гідроциліндра попе-речного (тангенціального) супорта | кН | 28 |
| Хід піноли задньої бабки | мм | 200 |
| Швидкість руху пінолі | мм/с | 0,4...50 |
| Діаметр гідроциліндра привода пінолі | мм | 50 |
| Максимальна сила на штоці гідроциліндра пінолі | кН | 23,5 |
| Робочий тиск у пневмосистемі | МПа | 0,4...0,6 |
| Потужність приводу пневмокомпресору | кВт | 3,0 |
| Робочий тиск у гідросистемі | МПа | 12 |
| Потужність приводу гідростанції | кВт | 3,0 |
| Частота струму індукційної нагрівальної уста-новки | кГц | 2,4 |
| Потужність генератора СВЧ | кВА | 100 |

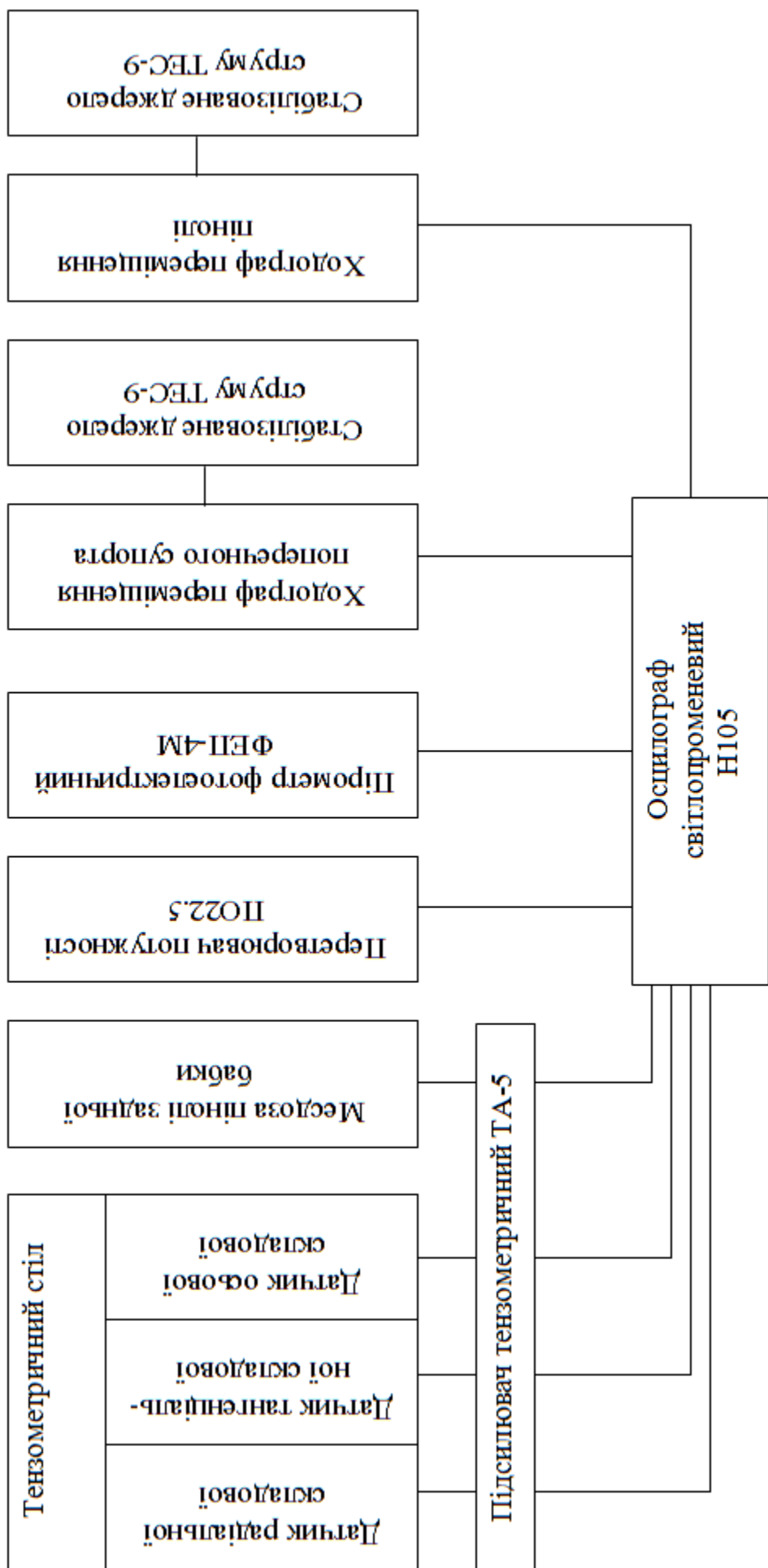


Рисунок 2.8 – Блок-схема вимірювально-реєструвальної апаратури ФЕП

Тензометричний стіл (рис. 2.9) призначений для реєстрації складових повної сили деформування, яка виникає при взаємодії в процесі обкочування закріпленого на ньому тангенціального інструменту й заготовки [150].

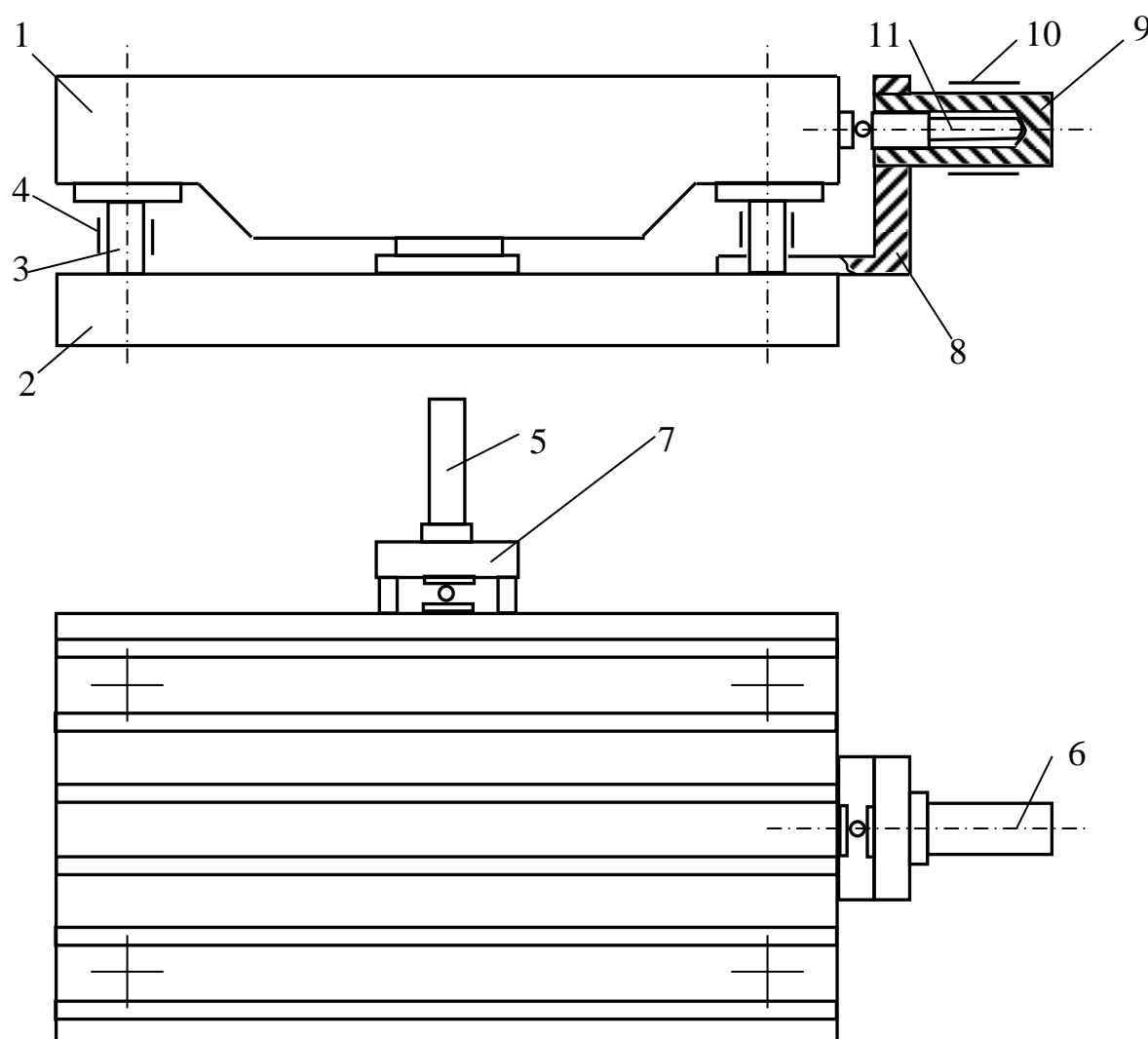


Рисунок 2.9 – Тензометричний стіл

Тензометричний стіл є трьохкоординатним силоримувальним пристроєм і містить верхню 1 і нижню 2 плити, сполучені між собою пружними елементами 3 з наклеєними на них тензорезисторами 4, призначеними для вимірювання радіальної складової повної сили обкочування. При дії на стіл вертикально спрямованої сили відбувається стискування пружних елементів 3, що викликає зміну опору наклеєних на них тензорезисторів 4. Розташування тензорезисторів 4 на протилежних сторонах стрижнів 3

дозволяє реєструвати тільки стискання стрижнів і виключає реєстрацію сил обкочування, що призводять до горизонтального зміщення верхньої плити 1 відносно нижньої 2 і, відповідно, до вигину елементів 3.

Для реєстрації тангенціальної і осьової складових повної сили обкочування силовимірвальний пристрій оснащено месдозами 5 і 6. Месдози встановлені в кронштейнах 7 і 8, жорстко закріплених на нижній плиті, і містять циліндр 9 з наклеєними на нього тензорезисторами 10 і центральним стрижнем 11. Під дією сил, вектор яких розташований у горизонтальній площині, відбувається вигин пружних елементів 3 і зміщення верхньої плити 1 відносно нижньої 2. Це зміщення викликає переміщення центрального стрижня 11, що упирається у верхню плиту 1, що, у свою чергу, призводить до зміни розтягувальних напружень у циліндрі 9 і, відповідно, до опору наклеєних на ньому тензорезисторів 10. Тарування столу здійснювали прямим методом безпосередньо на стані для обкочування шляхом навантаження силами відомих величини і напрямку. При цьому використали динамометр стискання й гвинтовий домкрат.

Для вимірювання на осьової сили на інструменті застосовували месдозу (рис. 2.10), розміщену між штоком гідроциліндра 1 задньої бабки 2 і піноллю 3, яка має порожнистий циліндр 4 з наклеєними резисторами 5. Пряме тарування також проводили за допомогою гвинтового домкрата й динамометра стискання [150].

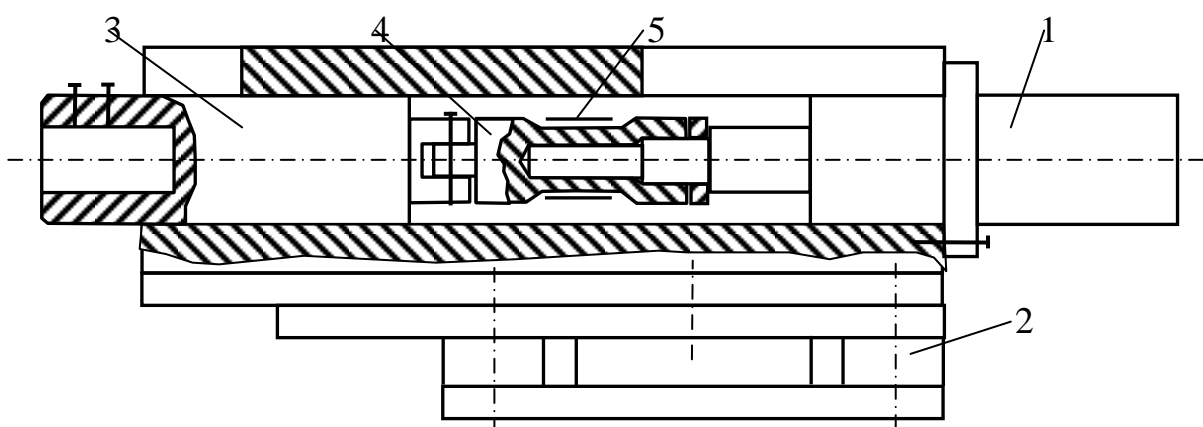


Рисунок 2.10 – Задня бабка обкочувального стану з месдозою для вимірювання сили підсадки

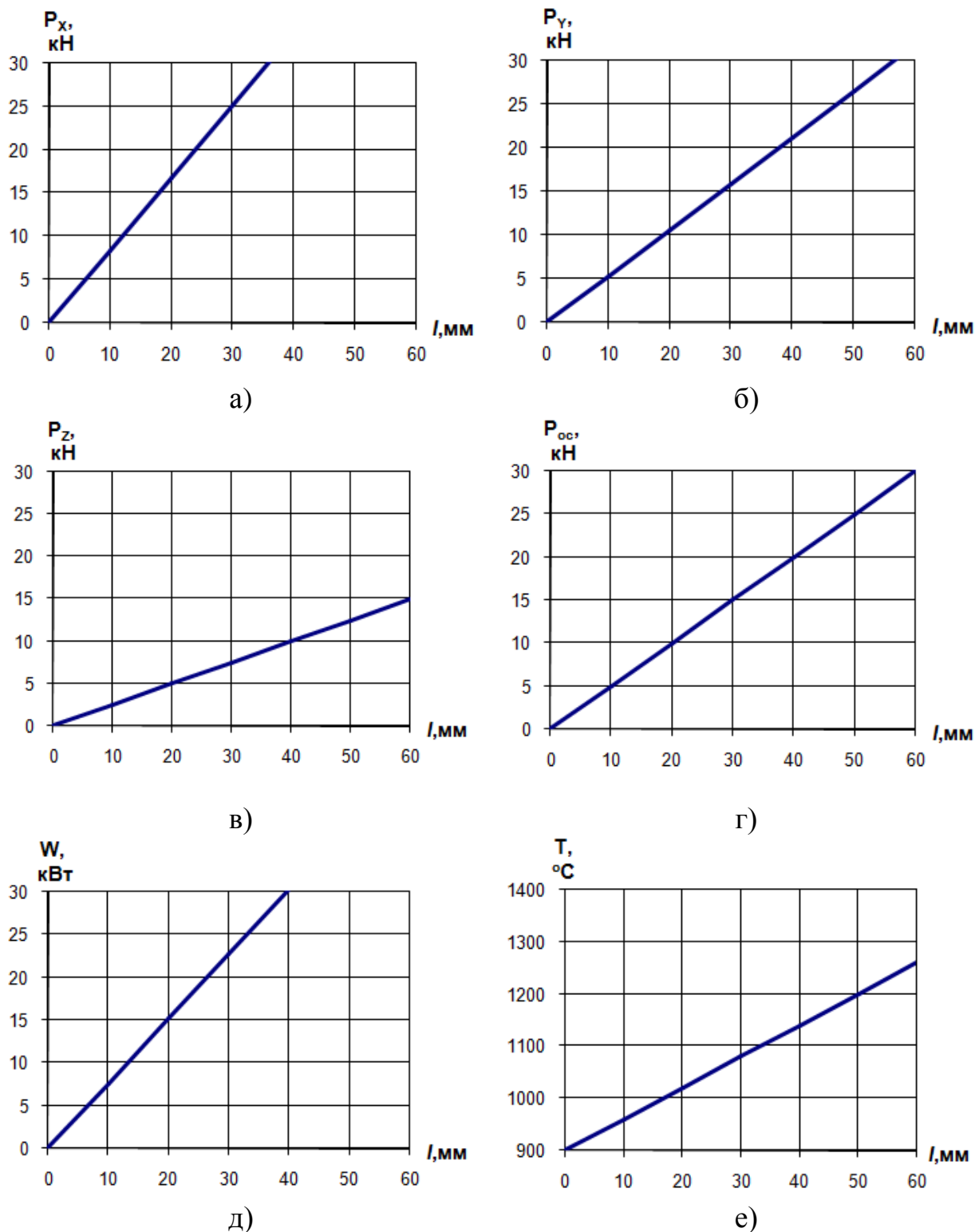
Ходографи поперечного супорту й пінолі являли собою стрижні з електроізоляційного матеріалу, на які з кроком 2 мм навито спіраль з константанового дроту, підключеного до стабілізованого джерела струму. Стрижні закріплювали нерухомо відносно поздовжнього супорта й корпусу задньої бабки. Електричний сигнал знімали за допомогою рухомого повзункового контакту, закріпленого відповідно на поперечному супорті й пінолі. Вимірюючи кількість імпульсів від моменту початку руху й частоту їх реєстрації, встановили положення інструментів і швидкості їх переміщення.

Для вимірювання активної потужності трифазного струму, споживаного електродвигуном обертання шпинделя, застосовували стандартний перетворювач потужності ПО 22.5, що працює на ефекті Холу. Тарували вимірювальну схему й контролювали свідчення за зразковим ватметром.

Отримані при проведенні експериментальних досліджень дані розшифровували за допомогою тарировочних графіків. З метою контролю за правильністю функціонування датчиків і вимірювально-реєструвальної апаратури тарування проводили триразово до й після кожної серії експериментів з подальшим статистичним обробленням результатів за методикою, наведеною в додатку А [182]. Значення основних розрахованих величин наведено в таблиці 2.5, а тарувальні графіки – на рисунку 2.11.

Таблиця 2.5 – Результати статистичного оброблення тарувальних графіків

| Назва параметра | Позначення параметра | P_x | P_y | P_z | P_{oc} | W | T |
|-------------------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|----------------|
| Значення критерію Кохрена | σ | 0,29 | 0,55 | 0,49 | 0,43 | 0,42 | 0,636 |
| Дисперсія відтворення | $S_{\{l\}}^2$ | 0,431 | 0,402 | 0,226 | 0,328 | 0,98 | 0,916 |
| Рівняння тарувального графіку | $y = kl + b$ | $y = 0,84 l$ | $y = 0,53 l$ | $y = 0,25 l$ | $y = 0,5 l$ | $y = 0,76 l$ | $y = 6l + 900$ |



а – радіальної P_x , б – тангенціальної P_y складових сили обточування тангенціальним інструментом, в – осьової P_z складової сили обточування тангенціальним інструментом; г – осьової сили на пінолі P_{oc} ; д – потужності, що споживається електродвигуном обертання шпинделя W ; е – температури заготовки T

Рисунок 2.11 – Тарировочні графіки сил, потужності та температури обточування

Металографічний аналіз заготовок після обкочування проводили в ЦЗЛ ПрАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ), а також на кафедрі ОМТ ДДМА. Виготовлення мікрошліфів виконували за стандартною методикою [184]. Підготовлені мікрошліфи, протравлені 4% розчином азотної кислоти у спирті, досліджували на металографічних мікроскопах.

Висновки за розділом 2

1. Для розроблення раціональних технологічних процесів тангенційного обкочування ІТ необхідним є встановлення кількісних оцінок формоутворення, отримання достовірних даних про вплив умов тангенціального обкочування, параметрів інструменту, впливу умов протікання процесу на геометрію отримуваних виробів. Вирішення цього завдання потребує розроблення математичних і скінченно-елементних моделей для використання в дослідних цілях при проектуванні технології й визначення основних характеристик устаткування з точки зору підвищення точності й міри стабільності результативних геометричних характеристик.

2. Розроблено методику дослідження МСЕ обкочування сферичних днищ інструментом тертя. Методика дозволяє встановити напружено-деформований стан металу пустотілої заготовки в процесі обкочування ІТ. Розроблена методика дозволяє на першому етапі встановити розподіл температур в об'ємі заготовки. З урахуванням встановленого поля температур визначається розподіл інтенсивностей логарифмічних деформацій і параметрів напруженого стану.

3. Для перевірки отриманих теоретичних результатів розроблено методику експериментальних досліджень з використанням теорії планування експерименту. Розроблена методика дозволяє перевірити базові показники механічних властивостей днищ сталевих заготовок. Методика дозволяє оцінити ступінь закриття та заварювання осьового отвору днища та встановити макроструктуру металу днища.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛУ ПРИ ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ ДНИЩ БАЛОНІВ І ЄМНОСТЕЙ

3.1 Аналіз енергосилових параметрів процесу пластичного деформування днищ на основі теорії оболонок і пластин

Однією з технологічних схем з підвищення міцності балонів і ємностей різного призначення є, як вже було відмічено раніше (див. розд. 1), забезпечення додаткового пластичного деформування сферичних або еліпсоїдних днищ, отриманих заздалегідь шляхом обкочування заготовок із труб [99]. Окрім підвищення загального рівня характеристик міцності, реалізація цього заходу сприятиме підвищенню точності й поліпшенню геометричних форм отримуваних металовиробів при одночасному підвищенні їх герметичності. З урахуванням того, що напружено-деформований характер стану металу оброблюваної заготовки в цьому разі має досить складний характер, це робить необхідним проведення додаткових теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на уточнення початкових даних, а також на вдосконалення відповідних технологій і устаткування.

При стискуванні днища балона плитою відбувається вигинання його частини поверні, яку на ділянці АВ (рис. 3.1) можна навести у вигляді круглої пластини, що є частиною оболонки. Одночасно відбувається й певне деформування зовнішніх зон, розташованих лівіше за переріз, що відповідає точці А, і правіше за переріз, що відповідає точці В, але ця деформація набагато менша, оскільки нагрівання, що виникає при деформуванні металу, відбувається саме на ділянці АВ, і саме в цій зоні опір деформуванню набагато менший, ніж на тих ділянках оболонки, які з плитою безпосередньо не кон-

тактують. На цій стадії розрахунку приймаємо середню величину товщини оболонки [185]. З урахуванням схеми деформування (див. рис. 3.1) можна зробити висновок, що зовнішні шари оболонки стиснуті, а внутрішні шари будуть розтягнутими.

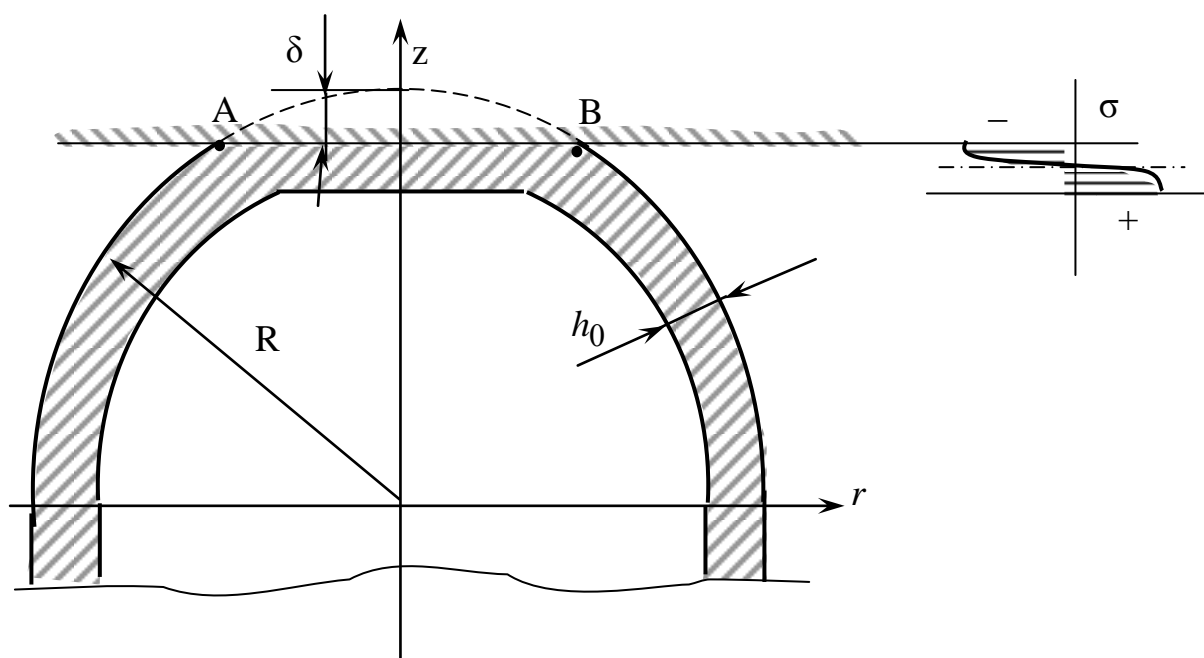


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема процесу деформування днища балона

Означене є небажаним, оскільки стискувальні напруження сприяють усуненню пористості й заліковуванню дефектів, а розтягувальні напруження можуть призвести до розкриття тріщин і розвитку інших дефектів [99]. Одночасно ділянка оболонки АВ піддається стисканню, оскільки довжина хорди менша, ніж довжина відповідної дуги. Слід з'ясувати, за яких умов стискання перевищує вигин.

Завищуючи величину деформації вигину, тобто вважаючи справедливим припущення про повне випрямлення ділянки оболонки на ділянці АВ, величину максимальної деформації розтягування можна визначити як

$$\varepsilon_p = h_0 / (2R), \quad (3.1)$$

де R – початковий радіус сферичної оболонки (див. рис. 3.1).

Одночасно з цим, коли довжина дуги AB дорівнювала $R\theta$ (рис. 3.2), а довжина відповідної їй хорди AB дорівнювала $2R\sin(\theta/2)$, то деформація стискання оболонки буде відповідати величині

$$\varepsilon_c = 1 - 2\sin(\theta/2)/\theta, \quad (3.2)$$

де θ – величина відповідного центрального кута (рис. 3.2).

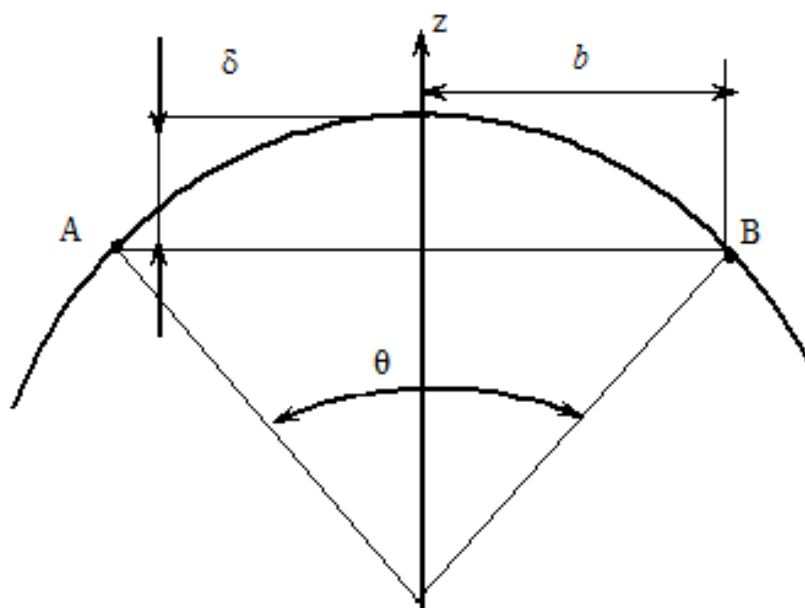


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема процесу змінення довжини ділянки оболонки

Прийнявши, що $L_{AB} = 2b$, $b = \sqrt{R^2 - (R - \delta)^2} = \sqrt{2R\delta - \delta^2}$ і $\theta = 2\arcsin(b/R) = 2\arcsin\sqrt{2\delta/R - \delta^2/R^2}$, умову перебільшення деформації стискання за абсолютною величиною можна подати у вигляді

$$\varepsilon_c = 1 - \sqrt{2\delta/R - \delta^2/R^2} / \arcsin\sqrt{2\delta/R - \delta^2/R^2} > \varepsilon_p = h_0/(2R), \quad (3.3)$$

де δ – величина переміщення верхньої точки сферичної оболонки під час її пластичного деформування (див. рис. 3.1, 3.2).

Залежність (3.3), що ілюструється графічно рисунком 3.3, може бути використана для визначення співвідношення, яке забезпечує наявність деформації стискання у всьому об'ємі зони пластичного формозмінення металу.

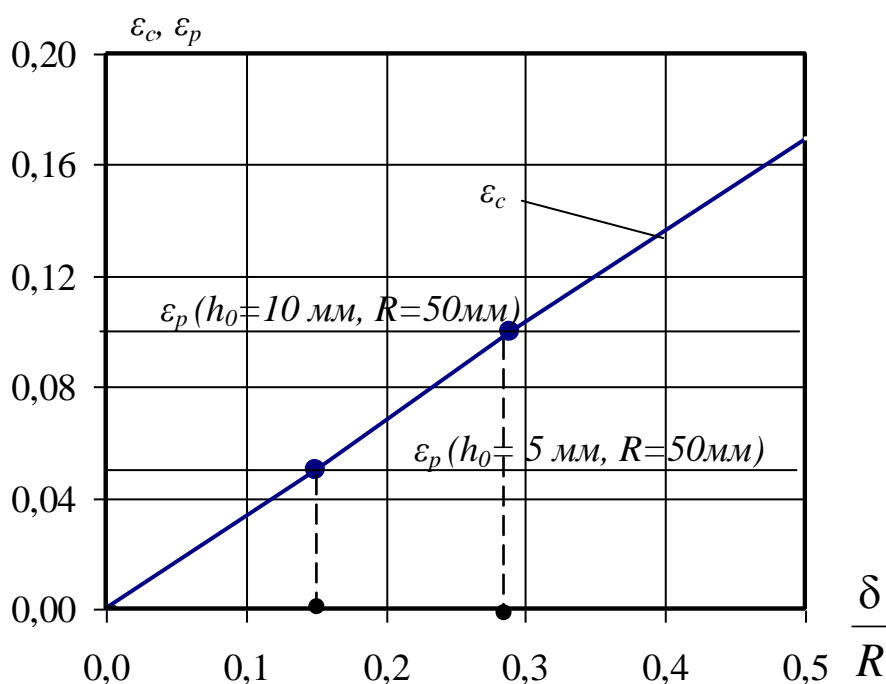


Рисунок 3.3 – Розрахунковий розподіл деформацій розтягування ϵ_p і стискання ϵ_c у залежності від співвідношення переміщення δ і радіуса R сферичної оболонки під час її обкочування

Більш точний аналіз вигину пластини, згідно з результатами робіт [186; 187], можна провести з використанням рівняння рівноваги

$$r \frac{dM_r}{dr} + M_r - M_\theta + \int_0^r p(r) r dr = 0, \quad (3.4)$$

умови плинності

$$M_r^2 - M_r M_\theta + M_\theta^2 = M_S^2 = \sigma_T^2 h_0^4 / 16, \quad (3.5)$$

та умови, що впливає з рівнянь Леві-Мізеса:

$$r \frac{d^2 W}{dr^2} = \frac{2M_r - M_\theta}{2M_\theta - M_r} \cdot \frac{dW}{dr}, \quad (3.6)$$

де M_S – граничний пластичний момент;

M_r, M_θ – радіальний та кутовий моменти;

σ_T – напруження текучості матеріалу заготовки, що деформується, при заданих: ступені, швидкості і температурі деформування [187];

W – величина переміщення.

Зазвичай при заданій функції $p(r)$ розв'язок системи трьох рівнянь (3.4)–(3.6) визначають три невідомі функції, а саме $M_r(r)$, $M_\theta(r)$ и $W(r)$. Такий підхід є звичним при розрахунку на міцність резервуарів, будівельних та інших конструкцій, коли задані навантаження, а визначенню підлягають переміщення й граничні напруження [188].

Проте в завданнях оброблення тиском сили зазвичай є невідомими, і саме їх визначення є одним з основних завдань. У таких завданнях з певною мірою точності задані переміщення, навантаження, тиск (тобто функція $W(r)$).

Необхідно також врахувати можливість використання теорії вигину пластин, що допускається для пологих оболонок. У початковій стадії деформування (див. рис. 3.1) оболонка є сферичною. Як показали результати роботи М. І. Єрхова, оболонка та пластини мають однакову здатність відносно дії на них навантажень, при $b^2 < 3Rh_0/2$ [189], відповідно навантаження для пластини і оболонки збігаються при $b < \sqrt{3Rh_0/2}$ (рис. 3.4), наприклад при $R = 100$ мм, $h_0 = 10$ мм, коли $b < \sqrt{3 \cdot 100 \cdot 10/2} \approx 39$ мм. Ця умова зазвичай ви-

конується, а, крім того, при великих величинах b оболонка вже розплющена на ділянці АВ (див. рис. 3.2) і близька за формою до пластини.

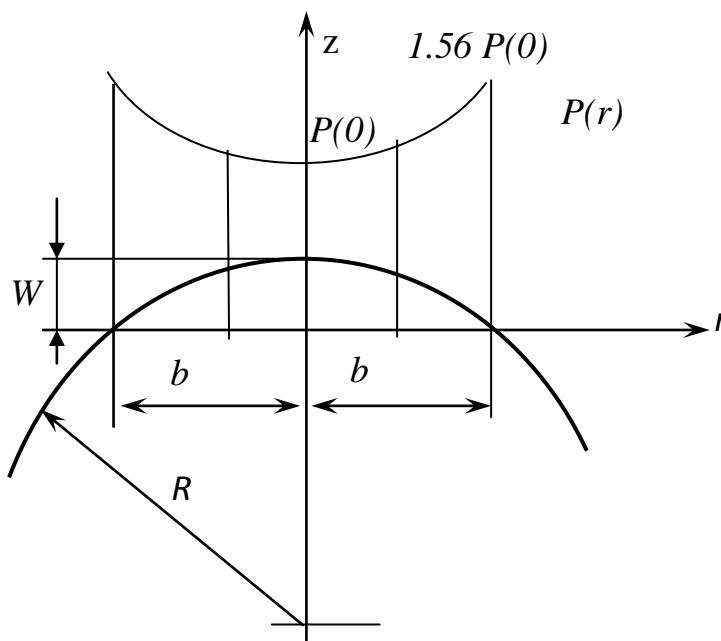


Рисунок 3.4 – Розрахунковий розподіл нормальних контактних напружень у зоні деформування

Оскільки функція прогину $W(r)$ не входить безпосередньо до основних рівнянь (3.4)–(3.6), (до цих рівнянь входять тільки похідні функції W ($W' = dW/dr$ і $W'' = d^2W/dr^2$)), то введемо нову функцію

$$\varphi(r) = rW''/W' = r d^2W/dr^2 \cdot (dW/dr)^{-1}. \quad (3.7)$$

Враховуючи це, зі співвідношення (3.6) можна встановити

$$M_\theta = M_r(2 + \varphi)/(2\varphi + 1), \quad (3.8)$$

де φ – кут між віссю балону та променем, котрий проходить через точку поверхні днища;

що дозволяє виключити функцію M_θ , підставивши її до умови плинності (3.5):

$$\begin{aligned}
M_r^2 - M_r M_\theta + M_\theta^2 &= M_r^2 - M_r^2 (2 + \varphi)/(2\varphi + 1) + (M_r (2 + \varphi)/(2\varphi + 1))^2 = M_S^2; \\
M_r^2 (4\varphi^2 + 4\varphi + 1 - 4\varphi - 2\varphi^2 - 2 - \varphi + 4 + 4\varphi + \varphi^2) / (2\varphi + 1)^2 &= M_S^2 = \sigma_T^2 h_0^4 / 16; \\
M_r^2 (3\varphi^2 + 3\varphi + 3) / (2\varphi + 1)^2 &= M_S^2,
\end{aligned}$$

де, враховуючи (3.8), отримаємо:

$$M_r = M_S (2\varphi + 1) / \sqrt{3(\varphi^2 + \varphi + 1)}, \quad M_\theta = M_S (2 + \varphi) / \sqrt{3(\varphi^2 + \varphi + 1)}. \quad (3.9)$$

Таким чином, M_r і M_θ можна виразити через функцію $\varphi(r)$.

При $M_S = \sigma_T h_0^2 / 4 = k\sqrt{3}h_0^2 / 4$ (k – стала пластичності) маємо:

$$M_r = kh_0^2 (2\varphi + 1) / (4\sqrt{\varphi^2 + \varphi + 1}), \quad M_\theta = kh_0^2 (2 + \varphi) / (4\sqrt{\varphi^2 + \varphi + 1}). \quad (3.10)$$

Рівняння рівноваги в цьому випадку можна записати у такому вигляді:

$$d(M_r \cdot r) / dr - M_\theta + \int_0^r p(r) r dr = 0. \quad (3.11)$$

Після підстановки M_r і M_θ згідно з (3.10) отримаємо:

$$\frac{kh_0^2}{4} \cdot \frac{d}{dr} \left[\frac{r(2\varphi + 1)}{\sqrt{\varphi^2 + \varphi + 1}} \right] - \frac{kh_0^2}{4} \cdot \frac{(2 + \varphi)}{\sqrt{\varphi^2 + \varphi + 1}} + \int_0^r p(r) r dr = 0; \quad (3.12)$$

$$2\pi \cdot \frac{kh_0^2}{4} \cdot \left(\frac{d}{dr} \left[\frac{r(2\varphi + 1)}{\sqrt{\varphi^2 + \varphi + 1}} \right] - \frac{2 + \varphi}{\sqrt{\varphi^2 + \varphi + 1}} \right) + 2\pi \int_0^r p(r) r dr = 0, \quad (3.13)$$

враховуючи це, сила деформування може бути визначена так:

$$P = -\frac{\pi k h_0^2}{2} \cdot \left(\frac{d}{dr} \left[\frac{r(2\varphi+1)}{\sqrt{\varphi^2 + \varphi + 1}} \right] - \frac{2+\varphi}{\sqrt{\varphi^2 + \varphi + 1}} \right) \Bigg|_{r=b}, \quad (3.14)$$

де $P = \int_0^b 2\pi p(r) dr$.

У результаті розрахунків визначимо силу:

$$|P| = \frac{\pi \sigma_T h_0^2}{2\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{\varphi-1}{\sqrt{\varphi^2 + \varphi + 1}} + \frac{3\varphi' r}{2\sqrt{(\varphi^2 + \varphi + 1)^3}} \right) \Bigg|_{r=b}. \quad (3.15)$$

В іншому вигляді рівняння (3.15) можна записати так:

$$|P| = \frac{\pi \sigma_T h_0^2}{2\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{\varphi^3 - 1 + 1.5\varphi' r}{\sqrt{(\varphi^2 + \varphi + 1)^3}} \right| \Bigg|_{r=b}. \quad (3.16)$$

Наведемо приклади деяких функцій φ .

При $W = \sqrt{R^2 - r^2} - \sqrt{R^2 - b^2}$:

$$\begin{aligned} \varphi(r) &= R^2 / (R^2 - r^2); & \varphi'(r) &= 2R^2 r / (R^2 - r^2)^2; \\ \varphi(b) &= \frac{1}{1 - b^2/R^2}; & \varphi'(b) &= \frac{2b}{R^2(1 - b^2/R^2)^2}; \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\varphi^2 + \varphi + 1 = \frac{3\left(1 - b^2/R^2 + \frac{1}{3}b^4/R^4\right)}{\left(1 - b^2/R^2\right)^2}.$$

Сила деформування в цьому випадку буде складати

$$\begin{aligned}
|P| &= \frac{\pi\sigma_T h_0^2}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{\left| \left(1 - b^2/R^2\right)^{-3} - 1 + 3b^2/R^2 \cdot \left(1 - b^2/R^2\right)^{-2} \right| \left(1 - b^2/R^2\right)^3}{3 \cdot \sqrt{\left(1 - b^2/R^2 + \frac{1}{3}b^4/R^4\right)^3}} = \\
&= \frac{\pi\sigma_T h_0^2}{18} \cdot \frac{6b^2}{R^2} \cdot \frac{1 - b^2/R^2 + \frac{1}{6}b^4/R^4}{\sqrt{\left(1 - b^2/R^2 + \frac{1}{3}b^4/R^4\right)^3}} \approx \frac{\pi\sigma_T h_0^2 b^2}{3R^2} \approx 1.05 \frac{\sigma_T h_0^2 b^2}{R^2}. \quad (3.18)
\end{aligned}$$

Враховуючи, що $b^2/R^2 \approx 2\delta/R$, отримаємо $P \approx 2,1\sigma_T h_0^2 \delta/R$,
 $p_c \approx 0,34\sigma_T h_0^2/R^2$, тобто

$$P = 2,1\sigma_T h_0^2 \delta/R, \quad (3.19)$$

де p_c – середній питомий тиск у зоні деформування.

Далі розглянемо визначення нормальних напружень $p(r)$ на контактній поверхні деформувального інструменту. З рівняння (3.14) можна встановити, що

$$\int_0^r p(r) \cdot r dr = -\frac{kh_0^2}{2} \cdot \left[\frac{\varphi - 1}{\sqrt{\varphi^2 + \varphi + 1}} + \frac{3\varphi' r}{2\sqrt{(\varphi^2 + \varphi + 1)^3}} \right]; \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned}
p(r) \cdot r &= -\frac{kh_0^2}{2} \cdot \frac{d}{dr} \left[\frac{\varphi - 1}{\sqrt{\varphi^2 + \varphi + 1}} + \frac{3\varphi' r}{2\sqrt{(\varphi^2 + \varphi + 1)^3}} \right] = \\
&= -\frac{kh_0^2}{2} \left[\frac{3}{2} \varphi' \frac{\varphi + 2}{\sqrt{(\varphi^2 + \varphi + 1)^3}} + \frac{3}{2} \varphi'' r \frac{1}{\sqrt{(\varphi^2 + \varphi + 1)^3}} - \frac{9}{4} \varphi'^2 r \frac{2\varphi + 1}{\sqrt{(\varphi^2 + \varphi + 1)^5}} \right], \quad (3.21)
\end{aligned}$$

звідки

$$p(r) = -\frac{3kh_0^2}{8\sqrt{(\varphi^2 + \varphi + 1)^3}} \left[\varphi' \cdot \frac{\varphi + 2}{r} + \varphi'' - \frac{3}{2} \varphi'^2 \cdot \frac{2\varphi + 1}{\varphi^2 + \varphi + 1} \right]. \quad (3.22)$$

Рівняння (3.22) також можна записати у вигляді

$$p(r) = -\frac{3kh_0^2}{8\sqrt{(\varphi^2 + \varphi + 1)^3}} \left[\varphi' \cdot \frac{\varphi + 2}{r} + \varphi'' - \frac{3}{2} \varphi' \cdot \frac{d}{dr} \ln(\varphi^2 + \varphi + 1) \right], \quad (3.23)$$

що й визначає функцію $p(r)$ через функцію $\varphi(r)$ та її похідні.

Введена функція $\varphi(r)$ є співвідношенням радіальної й тангенціальної компонент тензора швидкості деформування або співвідношенням величин кривини деформованої пластини або оболонки, що дорівнюють W'' і W'/r . Ця функція дозволяє розв'язувати не рівняння четвертого порядку, як завжди прийнято в теорії оболонок або пластин, а тільки другого порядку. Функція $\varphi(r)$ та її похідні в цілому визначають напруження $p(r)$. Приймаючи певні функції $W(r)$ і $\varphi(r)$, можна визначити тиск $p(r)$ і силу деформації.

Розглянемо в якості опису переміщення контактної поверхні функцію

$$W = W_0 \cos(0,5\pi r/b). \quad (3.24)$$

Визначимо функцію φ диференціюванням W :

$$W' = -0,5W_0 \pi/b \cdot \sin(0,5\pi r/b); \quad W'' = -0,25W_0 (\pi/b)^2 \cdot \cos(0,5\pi r/b);$$

$$\varphi(r) = \frac{0,25rW_0 (\pi/b)^2 \cos(0,5\pi r/b)}{0,5W_0 \pi/b \sin(0,5\pi r/b)} = 0,5\pi r/b \cdot \operatorname{ctg}(0,5\pi r/b), \quad (3.25)$$

де W_0 – максимальний прогин за віссю (при $r = 0$).

Позначивши через $u = 0,5\pi r/b$, запишемо

$$\varphi(r) = u \operatorname{ctg}(u);$$

$$\varphi'(r) = (\operatorname{ctg}(u) - u/\sin^2 u) \cdot 0,5\pi/b, \quad \varphi''(r) = (-2/\sin^2 u + 2u \cos u/\sin^3 u) \cdot (0,5\pi/b)^2$$

або

$$\begin{aligned} \varphi'(r) &= \pi(0,5 \sin 2u - u)/(2b \sin^2 u); \\ \varphi''(r) &= 2(0,5\pi/b)^2 (u \cos u - \sin u)/\sin^3 u. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Знайдемо значення цих функцій при $r \rightarrow 0$, $u \rightarrow 0$:

$$\begin{aligned} \varphi(0) &= \lim_{u \rightarrow 0} u \operatorname{ctg}(u) = 1; \\ \varphi'(0) &= \lim_{u \rightarrow 0} [\pi(0,5 \sin 2u - u)/(2b \sin^2 u)] = 0; \\ \varphi''(0) &= \lim_{u \rightarrow 0} [2(0,5\pi/b)^2 (u \cos u - \sin u)/\sin^3 u] = -\pi^2/(6b^2). \end{aligned} \quad (3.27)$$

У випадку $r = b$ і $u = 0,5\pi$ отримаємо $\varphi(b) = 0$, $\varphi'(b) = -0,25\pi^2/b$, $\varphi''(b) = -0,5\pi^2/b^2$. Враховуючи це, відповідно до залежності (3.16) визначимо силу:

$$f = \left| \frac{\varphi^3 - 1 + 1,5\varphi'r}{\sqrt{(\varphi^2 + \varphi + 1)^3}} \right|_{r=b} = \left| -1 - \frac{3\pi^2}{8} \right| \approx 4,69$$

і середнє нормальне напруження:

$$|P| = \pi\sigma_T h_0^2 / 2\sqrt{3} \cdot f = 4,26\sigma_T h_0^2; \quad (3.28)$$

$$p_c = P/(\pi b^2) = 1,36\sigma_T h_0^2 / b^2. \quad (3.29)$$

Залежності (3.28) і (3.29) визначають силу і середнє нормальне контактне напруження.

Якщо переміщення прийняти згідно з залежностями (див. рис 3.4)

$$W = \sqrt{R^2 - r^2} - \sqrt{R^2 - b^2}; \quad W' = -r/\sqrt{R^2 - r^2}; \quad W'' = -R^2/\sqrt{(R^2 - r^2)^3}, \quad (3.30)$$

то отримаємо функцію $\varphi(r) = R^2/(R^2 - r^2)$, тому $\varphi'(r) = 2R^2r/(R^2 - r^2)^2$ та $\varphi''(r) = 2R^2(R^2 + 3r^2)/(R^2 - r^2)^3$. З останніх співвідношень при $r = 0$ отримаємо:

$$\varphi(0) = 1; \quad \varphi'(0) = 0; \quad \varphi''(0) = 2/R^2, \quad (3.31)$$

а при $r = b$

$$\begin{aligned} \varphi(b) &= (1 - b^2/R^2)^{-1}; \quad \varphi'(b) = 2b/R^2(1 - b^2/R^2)^{-2}; \\ \varphi''(b) &= 2/R^2(1 + 3b^2/R^2)(1 - b^2/R^2)^{-3}, \end{aligned} \quad (3.32)$$

і сила деформування, як було показано вище, може бути визначена за формулою (3.19). У якості умови плинності можна застосовувати й умову плинності Сен-Венана: $\sigma_1 - \sigma_3 = 2k$ або $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T$, де $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ – головні напруження, й у цьому випадку за модулем $|\sigma_1| = |\sigma_\theta|$, $|\sigma_2| = |\sigma_r|$, $|\sigma_3| = 0$. Ця умова плинності припускає $M_\theta = M_S = \sigma_T h_0^2/16$ [190], що дозволяє визначати одну з невідомих величин, а саме M_θ . А з рівняння рівноваги (3.4) можна виразити напруження як функцію M_r :

$$\frac{d(M_r \cdot r)}{dr} - M_s + \int_0^r P(r)rdr = 0. \quad (3.33)$$

Після диференціювання отримаємо

$$\begin{aligned} d^2(M_r \cdot r)/dr^2 &= -P(r)r; \\ P(r) &= -d^2(M_r \cdot r)/dr^2 / r. \end{aligned} \quad (3.34)$$

З рівняння (3.6) можна отримати

$$\varphi(r) = (2M_r - M_s)/(2M_s - M_r),$$

де $\varphi(r) = rW''/W' = r d^2W/dr^2 \cdot (dW/dr)^{-1}$;

$$M_r = M_s(2\varphi + 1)/(2 + \varphi), \quad (3.35)$$

або $M_r \cdot r = M_s r(2\varphi + 1)/(2 + \varphi)$, тому з (3.34) отримаємо залежність для визначення контактної напруженості, що припускає використання умови плинності Сен-Венана:

$$p(r) = -\frac{M_s}{r} \cdot \frac{d^2}{dr^2} \left[\frac{r(2\varphi + 1)}{2 + \varphi} \right]. \quad (3.36)$$

З рівняння (3.33) отримаємо

$$2\pi \int_0^r p(r)rdr = 2\pi \left[M_s - \frac{d(M_r \cdot r)}{dr} \right], \quad (3.37)$$

враховуючи це, $p = 2\pi M_s \left[1 - \frac{d}{dr} \left(\frac{M_r r}{M_s} \right) \right]$ при $r = b$, та врахувавши, що

при $r = b$ $M_r = M_\theta = M_s$,

$$P = 2\pi M_s \left[\frac{d}{dr} \left(\frac{M_r r}{M_s} \right) \Big|_{r=0} - \frac{d}{dr} \left(\frac{M_r r}{M_s} \right) \Big|_{r=b} \right]. \quad (3.38)$$

Слід зазначити, що цей метод дозволяє, враховуючи умови плинності Сен-Венана, визначити силу деформування навіть при невідомому законі розподілу контактних нормальних напружень у зоні деформування, тобто знайти силу P при невідомій функції $p(r)$. Такою є особливість системи рівнянь (3.4)–(3.6).

З (3.37) можна записати

$$\begin{aligned} P &= 2\pi \int_0^r p(r) r dr = 2\pi M_s \left[1 - \frac{d}{dr} \left(\frac{r(2\varphi+1)}{2+\varphi} \right) \right] \Big|_{r=b} = \\ &= \frac{-\pi \sigma_T h_0^2}{2} \left[\frac{\varphi-1}{\varphi+2} + \frac{3r\varphi'}{(\varphi+2)^2} \right] \Big|_{r=b}, \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$|P| = \frac{\pi \sigma_T h_0^2}{2(\varphi+2)^2} \left[\varphi^2 + \varphi - 2 + 3r\varphi' \right] \Big|_{r=b}. \quad (3.40)$$

Що стосується нормальних контактних напружень, то з (3.37) шляхом диференціювання можна отримати

$$\begin{aligned} p(r)r &= -\frac{d^2}{dr^2} (M_r r) = -\frac{d^2}{dr^2} \left[\frac{M_s r(2\varphi+1)}{2+\varphi} \right] = M_s \frac{d}{dr} \left[\frac{2\varphi+1}{2+\varphi} + \frac{2\varphi' r}{2+\varphi} - \frac{r\varphi'(2\varphi+1)}{(2+\varphi)^2} \right] = \\ &= M_s \frac{d}{dr} \left[\frac{2\varphi+1}{2+\varphi} + \frac{3r\varphi'}{(2+\varphi)^2} \right] = M_s \left[\frac{2\varphi'}{2+\varphi} - \frac{(2\varphi+1)\varphi'}{(2+\varphi)^2} + \frac{3\varphi'}{(2+\varphi)^2} + \frac{3\varphi'' r}{(2+\varphi)^2} - \frac{6r\varphi'^2}{(2+\varphi)^3} \right] = \\ &= M_s \left[\frac{6\varphi'}{(2+\varphi)^2} + \frac{3\varphi'' r}{(2+\varphi)^2} - \frac{6r\varphi'^2}{(2+\varphi)^3} \right], \end{aligned}$$

звідки

$$p(r) = 3M_s \left[2\varphi'/r + \varphi'' - 2\varphi'^2/(2+\varphi) \right] / (2+\varphi)^2. \quad (3.41)$$

Наприклад, при $W = \sqrt{R^2 - r^2} - \sqrt{R^2 - b^2}$ з урахуванням співвідношень (3.30)–(3.32) отримаємо

$$p(r) = \frac{\pi\sigma_T h_0^2}{2} \cdot \frac{b^2}{R^2} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{1 - 2b^2/(3R^2)} + \frac{2}{3(1 - 2b^2/(3R^2))^2} \right] =$$

$$= \frac{\pi\sigma_T h_0^2}{6} \cdot \frac{b^2}{R^2} \cdot \frac{3 - 2b^2/(3R^2)}{(1 - 2b^2/(3R^2))^2} \approx \frac{\pi\sigma_T h_0^2}{2} \cdot \frac{b^2}{R^2} \cdot \frac{1}{(1 - 2b^2/(3R^2))^2}. \quad (3.42)$$

При $b/R \ll 1$ і $b/R \approx \sqrt{2\delta/R}$ можна визначити

$$|P| \approx \pi\sigma_T h_0^2 \delta / R, \quad (3.43)$$

а стосовно середнього нормального контактного напруження

$$p_c = |P| / (\pi b^2) = 0,5\sigma_T h_0^2 / R^2. \quad (3.44)$$

У цілому при використанні умови пластичності Сен-Венана $P = 3,14\sigma_T h_0^2 \delta / R$, а виходячи з умови Мізеса, $P = 2,16\sigma_T h_0^2 \delta / R$, тобто умова плинності Сен-Венана представляє енергосилові параметри більш високими, ніж при розрахунках з умовою Мізеса.

Що стосується напружень $p(r)$, то згідно з виразом (3.40) вони збігаються:

$$p(r) = \frac{3\sigma_T h_0^2 (R^2 - r^2)^2}{4(3R^2 - 2r^2)^2} \left[\frac{2R^2}{(R^2 - r^2)^2} + \frac{2R^2 (R^2 - r^2)^2}{(R^2 - r^2)^3} - \frac{8r^2 R^4}{(R^2 - r^2)^3 (3R^2 - 2r^2)} \right], \quad (3.45)$$

звідки

$$p(r) = \frac{\sigma_T h_0^2}{12R^2 \left(1 - 2r^2/(3R^2)\right)^2} \left[2 + \frac{2(R^2 - r^2)^2}{(R^2 - r^2)} - \frac{8r^2 R^2}{(R^2 - r^2)(3R^2 - 2r^2)} \right], \quad (3.46)$$

або

$$p(r) = \frac{\sigma_T h_0^2}{3R^2 \left(1 - 2r^2/(3R^2)\right)^3} \cdot \frac{1 - r^2/(3R^2) - 2r^4/(3R^4)}{1 - r^2/R^2}. \quad (3.47)$$

При $r = 0$ $p(0) = \sigma_T h_0^2 / (3R^2)$, а при $r = b$

$$p(b) = \frac{\sigma_T h_0^2}{3R^2 \left(1 - 2b^2/(3R^2)\right)^3} \cdot \frac{1 - b^2/(3R^2) - 2b^4/(3R^4)}{1 - b^2/R^2}.$$

У випадку, коли $b^2/R^2 = 2\delta/R \ll 1$,

$$\begin{aligned} p(b) &\approx \sigma_T h_0^2 / (3R^2) \cdot (1 + 7b^2/(3R^2)); \\ p(b) &= p(0) \cdot (1 + 14\delta/(3R)), \end{aligned} \quad (3.48)$$

тобто напруження збільшуються ближче до краю зони деформування.

При малих розмірах зони деформування і $b/R \ll 1$ напруження $p(r)$ буде близьким до сталої величини. Відзначимо, що отримані результати і формули припустимо використовувати тільки при $|M_\theta| > |M_r|$, M_θ і M_r одного знаку. З виразу (3.35) можна встановити, що для цього необхідним є виконання умови

$$M_r = M_S(2\varphi + 1)/(2 + \varphi) \leq M_S, \text{ тобто } \varphi < 1, \quad (3.49)$$

інакше неприпустимо приймати умову плинності у вигляді $M_\theta = M_S$.

Наприклад, якщо прийняти степеневий закон $W = W_0(1 - r^n/b^n)$, де n – стала, то отримаємо $\varphi = \text{const} = n - 1$ і при $n > 2$ ця умова буде порушеною.

Якщо $-2 < \varphi < -0.5$, то $M_r < 0$. Оскільки величини M_θ і M_r у цьому випадку будуть різного знаку, то умова $M_\theta = M_S$ буде також неприпустимою. При цьому необхідно або приймати $M_\theta - M_r = 2k$, або використовувати умову текучості Мізеса, яка зазвичай є більш точною.

Тепер розглянемо приклад розв'язання при $W = W_0 \cos(\pi r/2b)$, де W_0 – максимальний прогин у центрі пластини. При $r = b$ $W = 0$, функція $\varphi(r) = 0,5\pi/b \operatorname{ctg}(0,5\pi r/b)$ (з виразу (3.25)).

Із співвідношень (3.27) $\lim_{r \rightarrow 0} \varphi = 1$, а при $r = b$ $\varphi(b) = 0$, тобто φ не перебільшує одиницю.

Визначимо з (3.35), (3.25) і $u = 0,5\pi r/b$:

$$M_r \cdot r = \frac{M_S r (2\varphi + 1)}{2 + \varphi} = M_S \left[2r - \frac{3r}{2 + u \operatorname{ctg} u} \right]. \quad (3.50)$$

Обчислимо похідну:

$$\frac{d}{dr}(M_r \cdot r) = M_S \left[2 - \frac{3}{2 + u \operatorname{ctg} u} + \frac{1.5r\pi \left(\operatorname{ctg} u - \frac{u}{\sin^2 u} \right) / b}{(2 + u \operatorname{ctg} u)^2} \right],$$

або

$$\frac{d}{dr}(M_r \cdot r) = M_S \left[2 - \frac{3}{2 + u \operatorname{ctg} u} + \frac{3 \left(u \operatorname{ctg} u - \frac{u^2}{\sin^2 u} \right)}{(2 + u \operatorname{ctg} u)^2} \right]. \quad (3.51)$$

У такій формі легко визначити похідні при $r = u = 0$; $r = b$; $u = 0,5\pi$, щоб використати формулу (3.14):

$$\frac{d}{dr}(M_r \cdot r)(0) = M_S \left[2 - \frac{3}{2+1} + \frac{3(1-1)}{(2+1)^2} \right] = M_S;$$

$$\frac{d}{dr}(M_r \cdot r)(b) = M_S \left[2 - \frac{3}{2+0} + \frac{3(0-0,25\pi^2)}{(2+0)^2} \right] = M_S \left[0,5 - \frac{3}{16} \pi^2 \right].$$

$$\text{Тоді } P = 2\pi M_S \left(1 - \frac{1}{2} + \frac{3}{16} \pi^2 \right) = \pi M_S \left(1 + \frac{3}{8} \pi^2 \right) \approx 4,72\pi M_S;$$

$$P = 4,72\pi \sigma_T h_0^2 / 4 = 1,17\pi \sigma_T h_0^2,$$

а середнє напруження $p_c = 1,174\sigma_T h_0^2 / b^2$.

Якщо скористатися формулою (3.40), то отримаємо

$$|P| = \frac{\pi \sigma_T h_0^2}{2} \left[\frac{u \operatorname{ctgu} - 1}{u \operatorname{ctgu} + 2} + \frac{3r}{2b} \frac{0,5 \sin 2u - u}{(u \operatorname{ctgu} + 2) \sin^2 u} \right]_{r=b},$$

що при $r = b; u = 0,5\pi$ відповідає

$$|P| = \frac{\pi \sigma_T h_0^2}{2} \left| -\frac{1}{2} + \frac{3\pi}{2} \cdot \frac{\left(-\frac{\pi}{2}\right)}{4} \right| = \frac{\pi \sigma_T h_0^2}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{3\pi^2}{16} \right); P = 1,174\pi \sigma_T h_0^2,$$

а середнє нормальне дотичне напруження $p_c = 1,174\sigma_T h_0^2 / b^2$.

Умова плинності Мізеса дає в цьому випадку $P = 4,26\sigma_T h^2$,
 $P_c = 1,36\sigma_T h_0^2 / b^2$ – величини, що перебільшують на 16 % дані розрахунку
із застосуванням умови плинності Сен-Венана.

Розподіл тиску згідно з залежністю (3.41)

$$p(r) = \frac{3\sigma_T h_0^2 \pi^2}{16(1 + 0,5u \operatorname{ctgu})^2 b^2} \left[\frac{0,5 \sin 2u - u}{2u \sin^2 u} + \frac{u - \sin u}{2 \sin^3 u} - \frac{(0,5 \sin 2u - u)^2}{\sin^4 u} \right],$$

та, наприклад, при $u \rightarrow 0$

$$p(0) = \frac{3\sigma_T h_0^2 \pi^2}{16 \cdot 2,25 \cdot b^2} \left[-\frac{1}{3} + \frac{1}{12} \right], \quad |P(0)| = 0,2\sigma_T h_0^2 / b^2.$$

Біля краю зони деформації при $r = b; u = 0,5\pi$:

$$p(b) = \frac{3\sigma_T h_0^2 \pi^2}{16b^2} \left[-\frac{1}{2} + \frac{\pi-1}{4} - \frac{\pi^2}{4} \right]; \quad |P(b)| = \frac{3\sigma_T h_0^2 \pi^2}{16b^2} \cdot 2,68 = 4,95 \frac{\sigma_T h_0^2}{b^2}.$$

Характерним є різке збільшення тиску до країв зони деформування, де він приблизно в 25 разів вищий, ніж у центрі.

Середнє нормальне контактне напруження збільшується зі зменшенням b (рис. 3.5), але зазвичай воно не може перебільшити величину $3\sigma_T$, оскільки при цьому, згідно з формулою Прандля [187], буде реалізовано локальне вигинання матеріалу, і більший тиск реалізувати не можна (див. рис. 3.5).

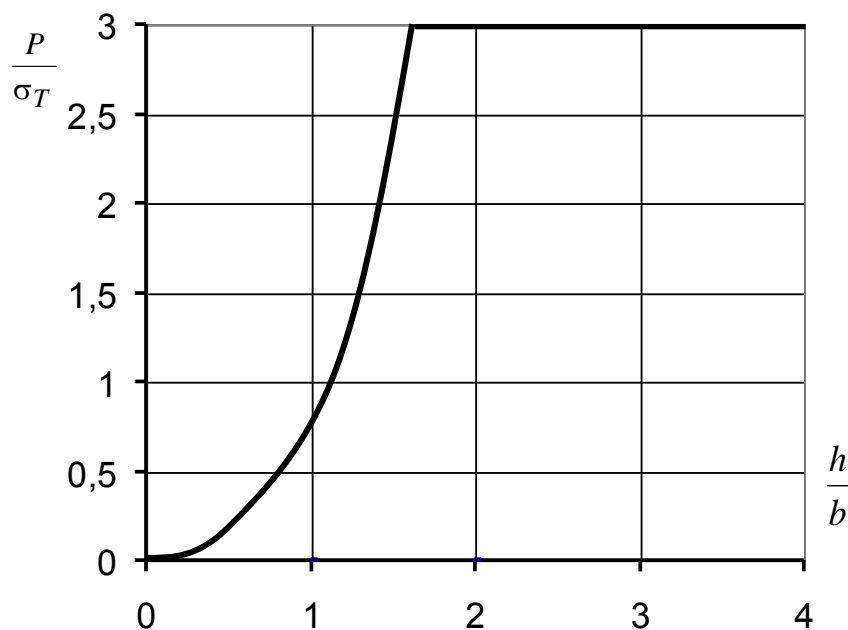


Рисунок 3.5 – Графік $P(r)$ при $W = W_0 \cos(0,5\pi r/b)$

При $h_0^2/b < 1$ співвідношення $p/\sigma_T < 1,17$ і, наприклад (для випадку, що розглянуто вище) при $h = 0,01$ м, $b = 4,16 \cdot 10^{-2}$, $h_0^2/b = 0,24$, $p = 0,068\sigma_T = 6,8 \cdot 10^6$ Н · м⁻². При цьому в початковій стадії процесу, наприклад при $\delta = 2$ мм, $b = \sqrt{2 \cdot 0,2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 2,83 \cdot 10^{-2}$ м, $h_0^2/b = 1$, $p/\sigma_T = 14,4 \cdot 10^{-2}$; а при $\delta = 0,5$ мм, $b = 10^{-2}$ м, $h_0^2/b = 1$ – $p = 1,174\sigma_T = 117,4$ МПа.

Для пластини з затиснутими краями $p = 0,25 \cdot 22,9\kappa h_0^2/b^2 = 3,3\sigma_T h_0^2/b^2$, $P = 10,36\sigma_T h_0^2$, і помітно, що ці величини більші, ніж при прогині у вигляді косинусоїди, отримані згідно з формулами (3.36) – (3.41). До результатів, які наведено в [191], були близькими і дані О. С. Григорьєва [192], але варто зазначити, що порівняння з даними, отриманими в результаті випробовувань, показує, що розрахункові прогини перебільшені.

Повертаючись до точнішої умови Мізеса, при $W = \sqrt{R^2 - r^2} - \sqrt{R^2 - b^2}$, $\varphi(r) = R^2/(R^2 - r^2)$ і за формулою (3.22) визначаємо напруження в центрі зони деформування:

$$\varphi(0) = 1, \varphi^2 + \varphi + 1 = 3, \varphi'(0) = 0, \varphi''(0) = 2/R^2;$$

$$p(0) = -\frac{3kh^2}{8 \cdot 3\sqrt{3}} \left[\frac{6}{R^2} + \frac{2}{R^2} \right] = \frac{kh^2}{R^2\sqrt{3}} = 0,33\sigma_T h^2/R^2.$$

При $r = b$ отримаємо

$$|p(b)| = \frac{kh_0^2}{8\sqrt{3}R^2 \left(1 - \frac{b^2}{R^2} + \frac{b^4}{3R^4}\right)^{1,5}} \left[6 - 4\frac{b^2}{R^2} - 3\frac{b^2}{R^2} \cdot \frac{\left(3 - \frac{b^2}{R^2}\right)}{\left(1 - \frac{b^2}{R^2} + \frac{b^4}{3R^4}\right)} \right] \approx$$

$$\approx \frac{3kh_0^2}{8\sqrt{3}R^2} \left[1 + \frac{2b^2}{3R^2} + \frac{b^2}{2R^2} \left(1 + \frac{2b^2}{3R^2}\right) \right] \left(1 + \frac{3b^2}{2R^2}\right), \quad (3.52)$$

а при $\delta/R \ll 1$ $p(b) \approx 0,125\sigma_T h_0^2/R^2$.

Зазначимо, що розбіжності між умовами Мізеса і Сен-Венана ілюструються на рисунку 3.6, на якому для випадку $p = const$ побудовано графіки вигинальних моментів на основі розрахунків за методом В. В. Соколовського [193]. Тут наведено криві $M_r(r)$ і $M_\theta(r)$ (у безрозмірному вигляді, тобто на рисунку 3.6 побудовано криві $M_r(r)/M_S(r)$ і $M_\theta(r)/M_S(r)$). Ці лінії побудовано при усередненому тиску $p = const$, до того ж неперервні лінії відповідають умові плинності Мізеса, а пунктирні – умові Сен-Венана.

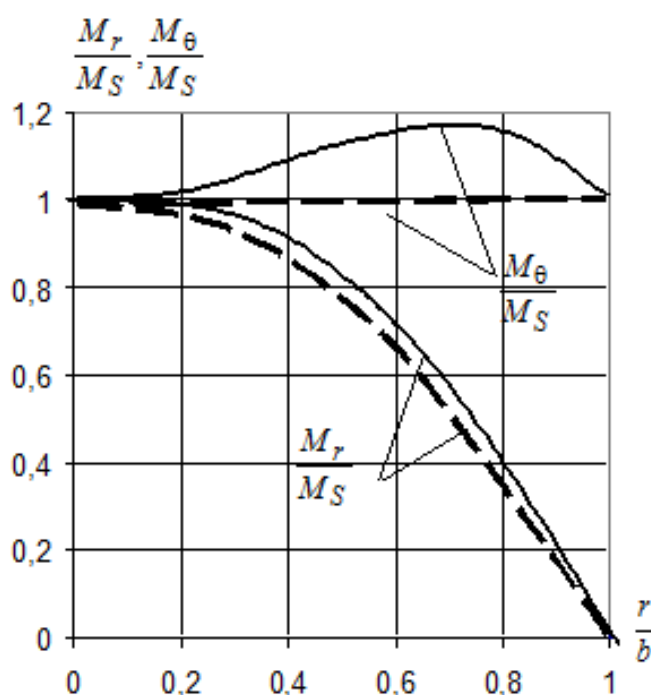


Рисунок 3.6 – Графіки M_r/M_S , M_θ/M_S при $p = const$, побудовані з використанням умов плинності Мізеса (суцільні лінії) і Сен-Венана (пунктирні лінії)

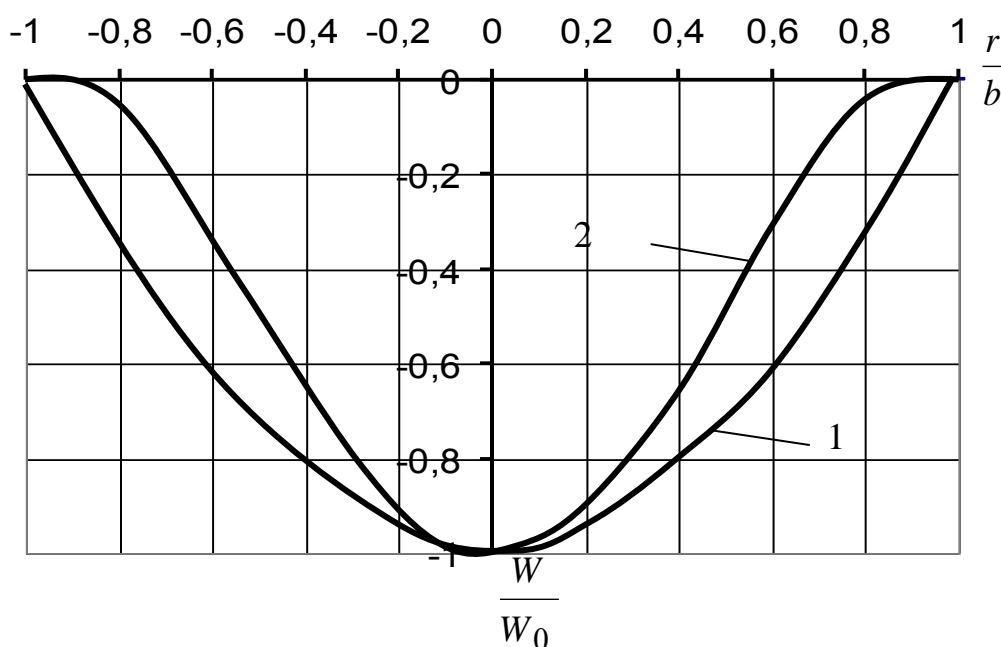
Різниця в самих функціях $M_r(r)$ і $M_\theta(r)$ є невеликою, але до рівнянь рівноваги входить похідна dM_r/dr , для якої розбіжність може бути більш значною. У [194] рекомендовано при використанні умови плинності Сен-Венана збільшувати M_S у 1,08 разу.

Відповідно до умови Сен-Венана можна отримати занижені значення напруження на 20...30 %.

Тепер розглянемо деформування при зміні прогину за іншим законом, а саме

$$W = W_0 \cos^2(0.5 \pi r/b) = W_0 \cos^2 u. \quad (3.53)$$

Для цього випадку при $r = 0$ $W = W_0 = W_{\max}$, а при $r = b$ $W = 0$, але, крім цього, виконується умова $dW/dr(b) = 0$, що відповідає вже пластині із затисненими (а не опертими) краями. Порівняння функцій зроблене на рисунку 3.7, де побудовано графіки функцій $W_0 \cos(0.5 \pi r/b)$ – лінія 1 і $W_0 \cos^2(0.5 \pi r/b)$ – лінія 2. Для лінії 1 похідна $dW/dr(b) \neq 0$, і це не відповідає справжньому деформованому стану, оскільки реального «злому» кривої профілю днища балона (з кутовою точкою) немає.



$$1 - W_0 \cos(0.5 \pi r/b); 2 - W_0 \cos^2(0.5 \pi r/b)$$

Рисунок 3.7 – Порівняльні графіки функцій

Для лінії 2 $dW/dr = 0$ і при $r = 0$, і при $r = b$. Зазвичай такими функціями описують деформації затиснених пластин. Виходячи із залежності (3.53),

$$W' = -0,5W_0 \pi/b \cdot \sin 2u, \quad W'' = -0,5W_0 \pi^2/b^2 \cdot \cos 2u.$$

Визначимо функцію $\varphi(r) = W''r/W' = \pi r/b \cdot \operatorname{ctg} 2u$,

$$\varphi(r) = 2u \operatorname{ctg} 2u. \quad (3.54)$$

Відмітимо, що для кривої 2 на рисунку 3.7 є точки перегину, де $W'' = 0$, тобто $\cos 2u = 0$, що виконується при $u = \pi/4$, $r = 0,5b$. Для кривої 1 (див. рис. 3.7) точок перегину немає і кривина завжди додатна.

Для функції $W = W_0 \cos(0,5\pi r/b)$ функція $\varphi = u \operatorname{ctg} u$, що нагадує за формою (3.54), але відмінності між цими двома функціями дуже значні.

При $u \rightarrow 0 \quad \lim_{u \rightarrow 0} \varphi(u) = \lim_{u \rightarrow 0} 2u \operatorname{ctg} 2u = 1$, але при $u \rightarrow 0,5\pi \quad \operatorname{ctg} 2u \rightarrow -\infty$.

Визначимо похідні:

$$\varphi' = \pi \left[2 \operatorname{ctg} 2u - 4u/\sin^2 2u \right] / (2b) = \frac{\pi}{b \sin^2 2u} (\cos 2u \sin 2u - 2u);$$

$$\varphi'' = \left(\frac{\pi}{2b} \right)^2 \left[-\frac{u}{\sin^2 2u} - \frac{4}{\sin^2 2u} + \frac{16u \cos 2u}{\sin^3 2u} \right];$$

$$\varphi' = \frac{\pi}{b \sin^2 2u} (0,5 \sin 4u - 2u), \quad \varphi'' = \frac{2\pi^2}{b^2 \sin^2 2u} (2 \cos 2u - \sin 2u). \quad (3.55)$$

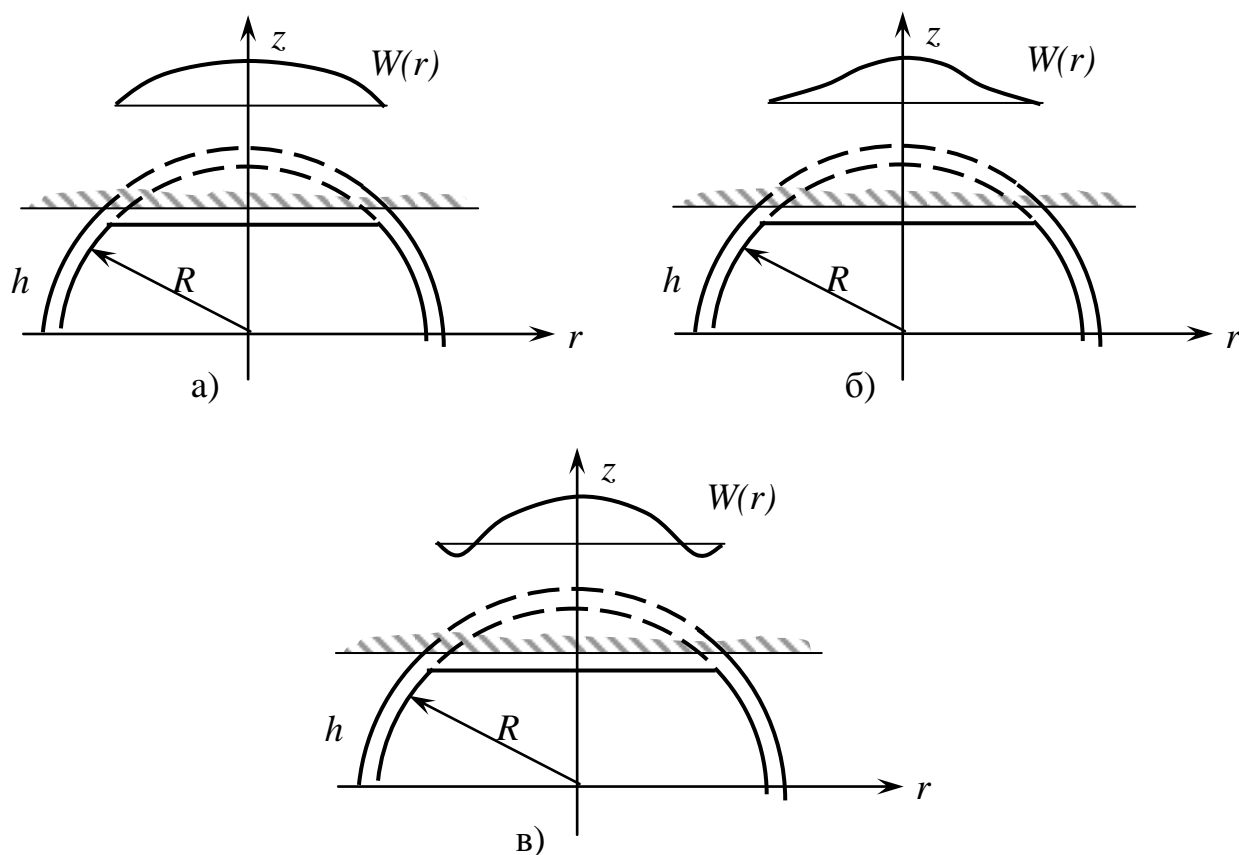
Записавши $P = \pi \sigma_T h_0^2 / 2\sqrt{3} \cdot f(r/b) \Big|_{r=b}$, де $f(u) = -\frac{\varphi^3 - 1 + 1,5\varphi'r}{(\varphi^2 + \varphi + 1)^{1,5}}$,

$u = 0,5\pi r/b$, визначимо функції, що встановлюють величину r/b . Результати розрахунку наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку функцій φ , φ' , φ'' , f і $P(r/b)$ при прогині $W = W_0 \cos^2(0,5\pi r/b)$

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------|
| $\frac{r}{b}$ | 0 | 0,1 | 0,25 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,67 | 0,75 | 0,833 | 0,9 | 1 |
| $u = \frac{\pi r}{2b}$ | 0 | $0,05\pi$ | $0,125\pi$ | $0,2\pi$ | $0,25\pi$ | $0,3\pi$ | $0,335\pi$ | $0,375\pi$ | $0,416\pi$ | $0,45\pi$ | $0,5\pi$ |
| $\varphi(u)$ | 1,0 | 0,96 | 0,785 | 0,41 | 0 | -0,614 | -1,2 | -2,36 | -4,615 | -8,7 | $-\infty$ |
| $\varphi'(u)$ | 0 | $-\frac{0,7}{b}$ | $-\frac{1,78}{b}$ | $-\frac{2,35}{b}$ | $-\frac{4,93}{b}$ | $-\frac{5,53}{b}$ | $-\frac{10,58}{b}$ | $-\frac{14,9}{b}$ | $-\frac{38,5}{b}$ | $-\frac{103,2}{b}$ | $-\infty$ |
| $\varphi''(u)$ | $-\frac{6,5}{b^2}$ | $-\frac{5,264}{b^2}$ | $-\frac{8,46}{b^2}$ | $-\frac{13}{b^2}$ | $-\frac{19,7}{b^2}$ | $-\frac{34,8}{b^2}$ | $-\frac{80,6}{b^2}$ | $-\frac{133}{b^2}$ | $-\frac{440}{b^2}$ | $-\frac{2029}{b^2}$ | $-\infty$ |
| $f(u)$ | 0 | 0,039 | 0,32 | 0,8 | 3,465 | 13,06 | 4,81 | 3,55 | 1,98 | 1,43 | 1 |
| $P(r/b)$ | $1,1\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $1,18\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $1,94\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $4\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $16,45\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $11\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $-15\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $-4,22\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $-2,09\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $-\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | 0 |

На рисунку 3.8 показано схеми деформування, зокрема на рисунку 3.8, а зі зміню прогину за формулою $W = W_0 \cos(0,5\pi r/b)$.



а – зміна прогину за законом $W = W_0 \cos(0,5\pi r/b)$; б – зміна прогину за законом $W = W_0 \cos^2(0,5\pi r/b)$, в – реальна схема деформування

Рисунок 3.8 – Схеми деформування оболонки

У цьому випадку при $r = b$ похідна dW/dr має розрив. Прогин за схемою $W = W_0 \cos^2(0,5\pi r/b)$ проілюстровано на рисунку 3.8, б. У цьому випадку на краю зони деформування $dW/dr = 0$. Реальну схему деформування показано на рисунку 3.8, в. При цьому у країв зони деформування відбувається розплющення й роздача заготовки, присутні малі за розміром ділянки, де прогин W навіть змінює знак. На рисунку 3.8 показано схеми епюр прогинів для усіх трьох випадків.

На рисунку 3.9 показано епюри напруження $p(r)$ і функції $f(u)$ за розрахунком згідно з формулою (3.54).

Результати представляють інтерес, оскільки видно, що функція $f(u)$ не зростає монотонно увесь час (пунктир на рис. 3.9), а зростає до максимуму при $r = 0,6b$ і дорівнює $f = 13$.

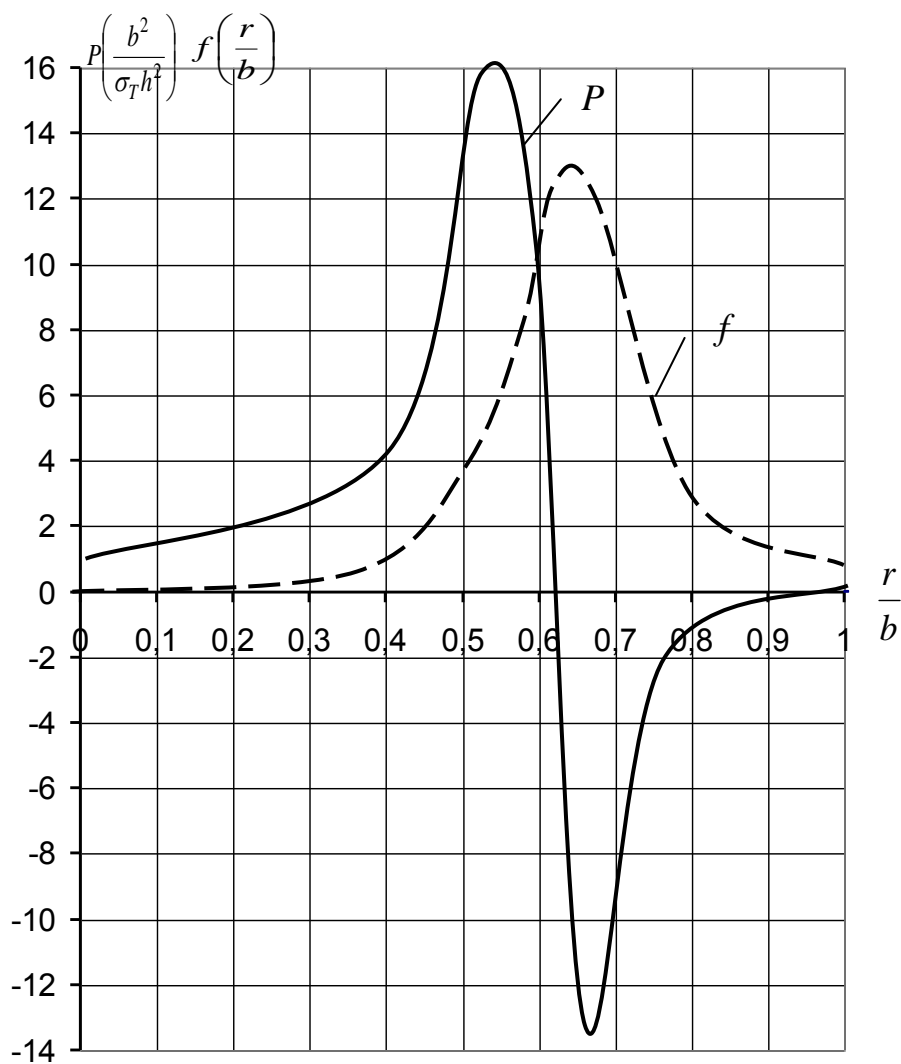


Рисунок 3.9 – Графіки $P(b^2/\sigma_T h^2)$ і $f(r/b)$ при $W = W_0 \cos^2(0,5\pi r/b)$

Якщо використати максимальну величину для розрахунку сил, то отримаємо силу

$$P = \pi \sigma_T h_0^2 / (2\sqrt{3}) \cdot 13 = 11,8 \sigma_T h_0^2, \quad (3.56)$$

а середній тиск

$$p_c = 3,75 \sigma_T h_0^2 / b^2. \quad (3.57)$$

Напруження максимальне при $r = 0,5b$, потім воно зменшується і при $r = 0,61b$ дорівнює 0, а при $r > 0,61$ тиск стає від'ємним. Насправді тут тиск не прикладений, і це означає, що в цих умовах прогин згідно з (3.54) забезпечити реальним деформувальним інструментом неможливо. Фактично умова $p(u) < 0$ неможлива, і (3.56), (3.57) дають завищені значення сил і напружень деформування.

За результатами, що наведено на рисунку 3.7, слід зазначити, що для забезпечення прогину згідно з кривою 2 напруження прикладене вниз у центральній зоні оболонки і вгору – у кільцевій зоні поблизу країв. Якщо це не виконано, то забезпечити прогин згідно з кривою 2 не можливо.

У таблиці 3.2 наведено результати розрахунку функцій φ , φ' , φ'' і $p(r/b)$ при реалізації функції прогину $W = W_0 \cos(0,5\pi r/b)$. На рисунку 3.10 наведено графік розподілу напружень в зоні деформування.

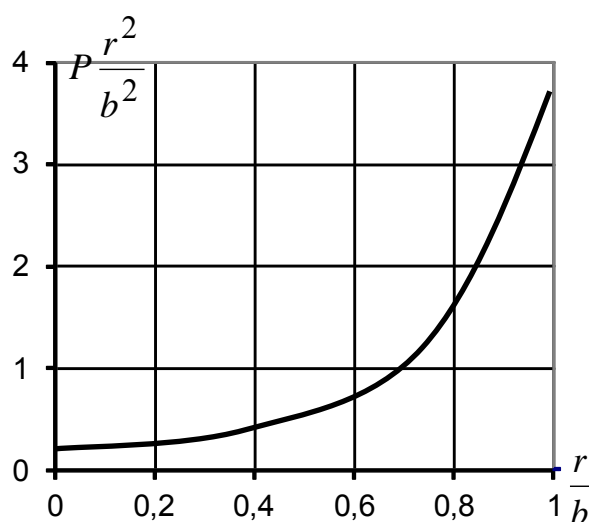


Рисунок 3.10 – Розподіл напруження в зоні деформування при $W = W_0 \cos(0,5\pi r/b)$

Функція f при $r=b$ дорівнює $f=-4.69$, а середнє напруження $p=1,36\sigma_T h_0^2/b^2$. З рисунку 3.10 і таблиці 3.2 видно, що напруження при $r/b < 0,5$ менше, ніж $0,5\sigma_T h_0^2/b^2$, а до країв напруження різко зростає до $3,57\sigma_T h_0^2/b^2$:

$$P = \pi\sigma_T h_0^2 / (2\sqrt{3}) \cdot 4,69 = 4,26\sigma_T h_0^2. \quad (3.58)$$

Для розрахунків енергосилових параметрів необхідно знати величину межі плинності (опір деформуванню), яка залежить від трьох параметрів: ступеня ε , швидкості $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dr$ і температури t деформування (див. [194]). З початку 1960-х років для вибору межі плинності використовують експериментальні дані, отримані на кулачкових пластомірах.

Ці дані вдало апроксимують формулами вигляду [184]

$$\sigma_T = \sigma_0 \varepsilon^{n_1} \dot{\varepsilon}^{n_2} \exp(-n_3 t), \quad (3.59)$$

де σ_0 , n_1 , n_2 , n_3 – сталі величини для цієї марки сталі.

Наприклад, для вуглецевої сталі $n_1 = 0,25$, $n_2 = 0,14 \dots 0,15$, $n_3 = (2,5 \dots 3,0) \cdot 10^{-3}$, $\sigma_0 = 1250 \dots 1400$ МПа [184].

При осаджуванні сферичного днища балона приймемо, що на деякій малій ділянці відбувається розплющення ділянки оболонки і її вигинання від кривини R^{-1} до кривини, що дорівнює 0. Визначаємо ступінь деформування

$$\varepsilon = 0,5 h_0 / R, \quad (3.60)$$

де h_0 – деяка усереднена товщина оболонки на цій ділянці.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку функцій φ , φ' , φ'' , f і $p(r/b)$ при прогині $W = W_0 \cos(0.5\pi r/b)$

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $\frac{r}{b}$ | 0 | 0,1 | 0,25 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,67 | 0,75 | 0,833 | 0,9 | 1 |
| $u = \frac{\pi r}{2b}$ | 0 | $0,05\pi$ | $0,125\pi$ | $0,2\pi$ | $0,25\pi$ | $0,3\pi$ | $0,335\pi$ | $0,375\pi$ | $0,416\pi$ | $0,45\pi$ | $0,5\pi$ |
| $\varphi(u)$ | 1,0 | 0,99 | 0,953 | 0,87 | 0,785 | 0,69 | 0,607 | 0,49 | 0,35 | 0,233 | 0 |
| $\varphi'(u)$ | 0 | $-\frac{0,126}{b}$ | $-\frac{0,475}{b}$ | $-\frac{0,69}{b}$ | $-\frac{0,894}{b}$ | $-\frac{1,14}{b}$ | $-\frac{1,66}{b}$ | $-\frac{1,53}{b}$ | $-\frac{1,79}{b}$ | $-\frac{2,16}{b}$ | $-\frac{2,46}{b}$ |
| $\varphi''(u)$ | $-\frac{1,64}{b^2}$ | $-\frac{3,6}{b^2}$ | $-\frac{1,7}{b^2}$ | $-\frac{2}{b^2}$ | $-\frac{2,12}{b^2}$ | $-\frac{2,36}{b^2}$ | $-\frac{2,6}{b^2}$ | $-\frac{2,93}{b^2}$ | $-\frac{3,37}{b^2}$ | $-\frac{3,9}{b^2}$ | $-\frac{4,93}{b^2}$ |
| $p(r/b)$ | $0,27\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $0,32\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $0,33\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $0,39\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $0,49\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $0,65\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $1,07\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $1,15\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $1,69\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $2,64\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ | $3,57\sigma_T \frac{h^2}{b^2}$ |

Середня швидкість деформування $\dot{\varepsilon} = \varepsilon/\tau_0$, де τ_0 – час протікання процесу. Якщо ми здійснюємо переміщення плити при стискуванні на величину δ (див. рис. 3.1), переміщаючи плиту зі швидкістю v_0 , тоді час цієї операції становитиме $\tau_0 = \delta/v_0$, а швидкість деформування

$$\dot{\varepsilon} = 0,5h_0v_0/(R\delta). \quad (3.61)$$

Наприклад, якщо $h = 30$ мм, $R = 100$ мм, $\delta = 5$ мм, $v_0 = 5$ мм/с, $\tau_0 = 1$ с, то отримаємо $\varepsilon = 0,15$, $\dot{\varepsilon} = 0,15\text{с}^{-1}$; і для вуглецевої сталі, прийнявши $\sigma_0 = 1330 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{n_2}$, $n_1 = 0,25$, $n_2 = 0,14$, $n_3 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ зр}^{-1}$ [184], при температурі 900°C отримаємо

$$\sigma_T = 1330 \cdot 0,15^{0,25} \cdot 0,15^{0,14} \exp(-2,5 \cdot 0,9) = 67,9 \text{ МПа}.$$

У ряді випадків у розрахунках виходять епюри напруження з сильним його зростанням до країв зони деформування (див. рис. 3.10). Зазначене відображає реальну картину пластичного плину. Припустимо, що на першій стадії деформування оболонка стискається плитою, яка зайняла положення АВ (рис. 3.11). Далі, продовжуючи стискання, плита переміщується в положення CD. Розглядаючи формозмінення в процесі переміщення інструменту від положення АВ у положення CD, можна зробити висновок, що основне деформування вигину має місце на краях: на ділянках AC і BD, де відбувається істотне вигинання оболонки і змінення її кривини. Саме тут діє максимальне напруження (у кільцевій зоні на границі зони деформування). Ділянки оболонки, розташовані поблизу осі z (див. рис. 3.11), при зміні форми з переходом від АВ до CD залишаються плоскими (чи з невеликою кривиною), тут істотний пластичний вигин не відбувається. Тому і напруження тут невеликі (див. рис. 3.10). Тільки на самому початку процесу деформування при точковому контакті (коли

тиск близький до величини $3\sigma_T$ згідно з формулою Л. Прандтля) у центрі діє значне напруження, а далі, у міру деформування оболонки, напруження в центрі зони контакту оболонки з інструментом знижуються, а по краях різко зростають.

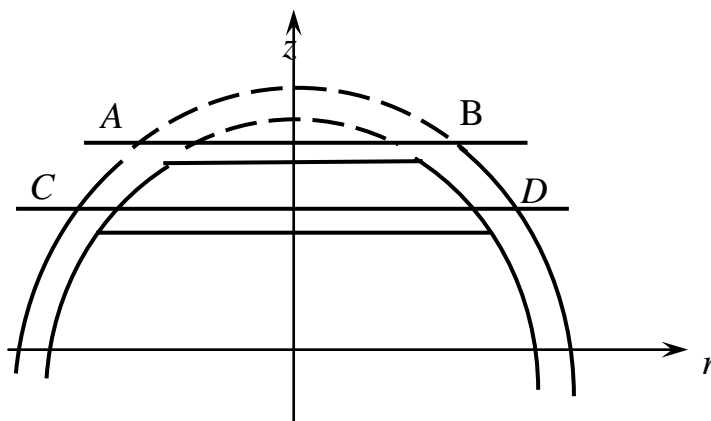


Рисунок 3.11 – Схема деформування оболонки

Таким чином, процес вигинання, розглянутий у цьому розділі, пов'язаний з розподілом напруження різного знаку по товщині оболонки, яка деформується, що може призвести до розтягувальних напружень поблизу внутрішньої поверхні [195]. Такі напруження можуть викликати розвиток дефектів, тріщин, та не сприяють усуненню цих недоліків.

Поліпшити схему напруженого стану можна, якщо осаджування оболонки поєднати з бічним її обтисканням, як показано на рисунку 3.12.

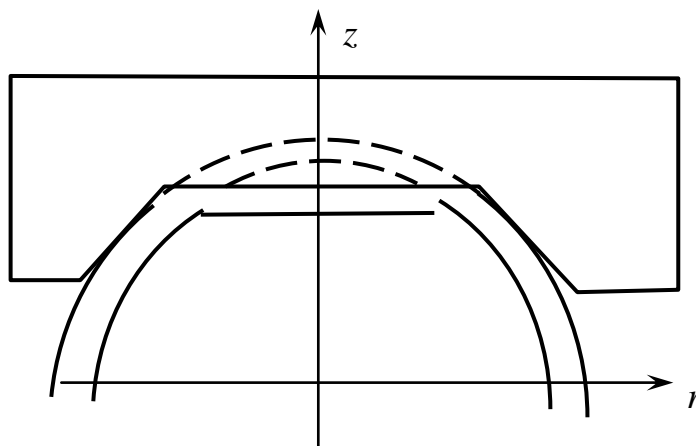


Рисунок 3.12 – Схема деформування з бічним стисканням

У цьому разі, окрім вигину, при дії сили уздовж осі z діє бічний тиск, який забезпечує стискання металу до осі симетрії z [196], що сприяє значному поліпшенню його структури і «заліковуванню», тобто усуненню дефектів, пір різного роду, несущільностей тощо.

У цьому розділі була розрахункова функція $\varphi = rW''/W'$, яка фактично є відношенням ступеня деформації (радіального, пропорційного W'' і величині W'/r).

Зазначене дозволило отримати рівняння

$$p(r) = \frac{\sigma_T \sqrt{3} h_0^2}{8(\varphi^2 + \varphi + 1)^{1.5}} \left[\frac{\varphi'}{r} (2 + \varphi) + \varphi'' - \frac{1.5\varphi'^2 (2\varphi + 1)}{\varphi^2 + \varphi + 1} \right]. \quad (3.62)$$

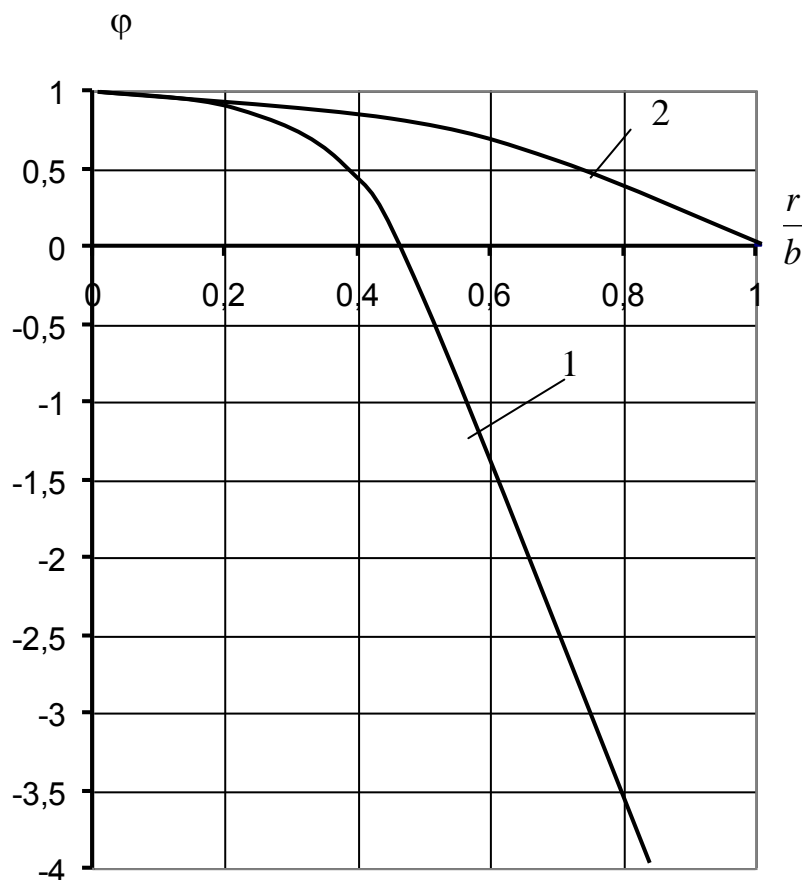
Фактично напруження p визначено рівняннями, що містять похідні прогину W аж до четвертого порядку. Ця характерна особливість вигину, що досить часто має місце і при пружних деформаціях, де застосоване лінійне рівняння С. Жермен [187], і при пластичних, де рівняння є нелінійними [189].

Введення функції φ дозволяє розглядати рівняння другого порядку $F(r, p, \varphi, \varphi', \varphi'') = 0$, а якщо знайти φ , то визначення прогину W ускладнень не викликає. Дійсно, з формули $\varphi = rW''/W'$ можна визначити, що $d \ln W'/dr = \varphi/r$, звідки

$$\begin{aligned} \ln W' &= C_1 + \int \frac{\varphi}{r} dr; \quad W' = C_1 e^{\int \frac{\varphi}{r} dr}, \\ W(r) &= C_2 + C_1 \int \exp\left(\int \frac{\varphi}{r} dr\right) dr. \end{aligned} \quad (3.63)$$

Розділення рівняння четвертого порядку на два рівняння другого порядку в ряді випадків є зручним і спрощує розрахунки.

Графіки функцій $\varphi(r/b)$ для двох розглянутих задач наведено на рисунку 3.13 ($W = W_0 \cos(0,5\pi r/b)$ – лінія 1 і $W = W_0 \cos^2(0,5\pi r/b)$ – лінія 2).



1 – при $W = W_0 \cos(0,5\pi r/b)$; 2 – при $W = W_0 \cos^2(0,5\pi r/b)$

Рисунок 3.13 – Порівняльні графіки $\varphi(r/b)$

Рівняння (3.62) можна розв'язувати будь-яким з відомих способів. У центрі пластини при $r = 0$ має бути виконана крайова умова $\varphi = 1$ – вона забезпечує необхідну умову $M_r = M_0$ при $r = 0$.

На краю пластини при $r = b$, якщо край затиснений, то $\varphi \rightarrow \infty$, а при опертому краї пластини $M_r = 0$; $\varphi = 0,5$.

Можна ввести обернену функцію $\psi(r) = 1/\varphi = W'/(rW'')$, для якої має місце рівняння

$$p(r) = \frac{\sigma_T \sqrt{3} h_0^2}{8(\psi^2 + \psi + 1)^{1.5}} \left[\frac{\psi'}{r} (2 + \psi) + \psi \psi'' - \frac{\psi'^2 (1.5\psi^3 + \psi^2 - 2\psi - 2)}{\psi^2 + \psi + 1} \right]. \quad (3.64)$$

У цьому разі для затисненої на краях пластини мають місце крайові умови $\psi = 1$ при $r = 0$ і $\psi = 0$ при $r = b$.

Цікавим є випадок, коли $\varphi = const$. У цьому разі із (3.60) випливає, що при $\varphi' = \varphi'' = 0$; $p(r) = 0$, і із рівняння рівноваги маємо,

що $\int_0^r p \cdot r dr = const$, це можливо при дії в центрі зосередженої сили P .

На інших ділянках поверхні усюди, окрім точки $r = 0$, напруження $p(r) = 0$. Тоді величини M_r і M_θ могли б бути постійними величинами. Але умова $M_r = M_\theta$ при $r = 0$ свідчить про те, що у разі, коли величини M_r і M_θ стали, ця рівність виконана усюди, тобто $(M_r - M_\theta) = 0$, а значить $p = 0$. Це означає, що використовувана модель жорстко-пластичного середовища може бути застосовна не завжди (не для будь-якої функції $W(r)$). Для ряду функцій, наприклад $W = W_0(1 - r^n/b^n)$, де W_0 , n – сталі, $\varphi = n - 1 = const$, це означає, що неможливо при пластині ідеально жорсткого пластичного матеріалу забезпечити таку функцію прогину. У цих випадках необхідно використати складнішу модель пружно-пластичного середовища, яке проте вимагає і виконання доволі трудомістких розрахунків.

3.2 Аналіз енергосилових параметрів процесу пластичного деформування днищ на основі методу верхньої оцінки

З точки зору методу верхньої оцінки [197] механізм пластичного деформування днищ балонів і ємностей можна подати у вигляді руху жорст-

кого інструменту з плоскою робочою поверхнею, що переміщається уздовж осі заготовки z зі швидкістю v_0 (рис. 3.14).

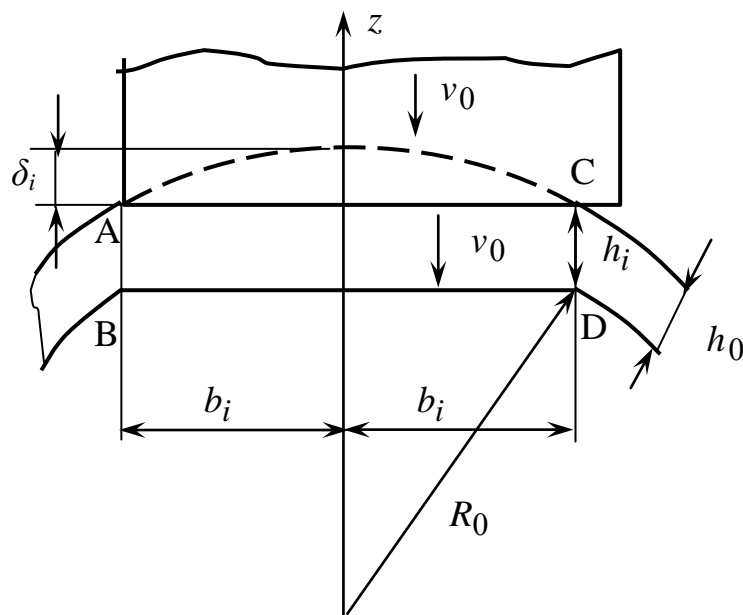


Рисунок 3.14 – Розрахункова схема до аналізу процесу пластичного деформування днища на основі методу верхньої оцінки

При цьому в i -й момент часу ділянка сферичного днища у вигляді диска радіусом b_i переміщається спільно з інструментом з тією самою швидкістю, внаслідок чого по циліндричній поверхні AD і BC відбувається відносний зсув металу, потужність якого дорівнює [150]

$$N_{1i} = 2\pi K_i b_i h_i v_0, \quad (3.65)$$

де K_i – опір зсуву матеріалу деформовуваної заготовки за цих температурно-деформаційних умов.

Виходячи з чисто геометричних співвідношень (див. рис. 3.14),

$$h_i = \sqrt{(R_0 + h_0)^2 - b_i^2} - \sqrt{R_0^2 - b_i^2}; \quad (3.66)$$

$$b_i = \sqrt{R_0^2 - (R_0 - \delta_i)^2} = \sqrt{2R_0\delta_i - \delta_i^2}, \quad (3.67)$$

тобто поточне значення товщини h_i можна подати як функцію величини переміщення деформувального інструменту δ_i :

$$\begin{aligned} h_i &= \sqrt{(R_0 + h_0)^2 - 2R_0\delta_i + \delta_i^2} - \sqrt{R_0^2 - 2R_0\delta_i + \delta_i^2} = \\ &= R_0 \left(\sqrt{1 + 2\frac{h_0}{R_0} + \frac{h_0^2}{R_0^2} - \frac{2\delta_i}{R_0} - \frac{\delta_i^2}{R_0^2}} - \sqrt{1 - \frac{2\delta_i}{R_0} + \frac{\delta_i^2}{R_0^2}} \right). \end{aligned} \quad (3.68)$$

Згідно з співвідношеннями (3.67) і (3.68), а також враховуючи рівність потужностей внутрішніх N_{1i} (3.65) і зовнішніх $N_{2i} = P_i v_0$ сил, величину сили деформування в i -й момент часу можна визначити як

$$\begin{aligned} P_i = 2\pi K_i b_i h_i = 2\pi K_i R_0^2 \sqrt{\frac{2\delta_i}{R_0} + \frac{\delta_i^2}{R_0^2}} \left(\sqrt{\left(1 + \frac{h_0}{R_0}\right)^2 - \frac{2\delta_i}{R_0} + \frac{\delta_i^2}{R_0^2}} - \right. \\ \left. - \sqrt{1 - \frac{2\delta_i}{R_0} + \frac{\delta_i^2}{R_0^2}} \right), \end{aligned} \quad (3.69)$$

або, скориставшись допоміжною безрозмірною змінною у вигляді

$$a_{\delta_i} = 2\delta_i/R_0 - (\delta_i/R_0)^2 = (\delta_i/R_0)(2 - \delta_i/R_0),$$

$$P_i = 2\pi K_i R_0^2 \sqrt{a_{\delta_i}} \left(\sqrt{\left(1 + h_0/R_0\right)^2 - a_{\delta_i}} - \sqrt{1 - a_{\delta_i}} \right). \quad (3.70)$$

Як приклад результатів чисельної реалізації залежностей (3.69) і (3.70) на рисунку 3.15 наведено розрахункові показники приведеної безрозмірної сили пластичного деформування в залежності від відносного значення переміщення деформувального інструменту [198]. Аналіз наведених результатів показав, що зі збільшенням відносних показників δ_i/R_0 і h_0/R_0 значення приведеної сили деформування зростає дуже істотно.

З урахуванням можливого обертання заготовки на поверхні круга АС (див. рис. 3.14) діє не лише сила деформування, а і крутний момент, що визначається як:

$$M_i = \int_0^b 2\pi r_i^2 \tau_{ki} dr = 2p_i \mu_i b_i / 3, \quad (3.71)$$

де μ_i – поточне в даний момент часу значення коефіцієнта зовнішнього тертя, що характеризує згідно, з $\tau_i = p_i \mu_i$ величину дотичного напруження на контактній поверхні деформувального інструменту й оброблюваної заготовки.

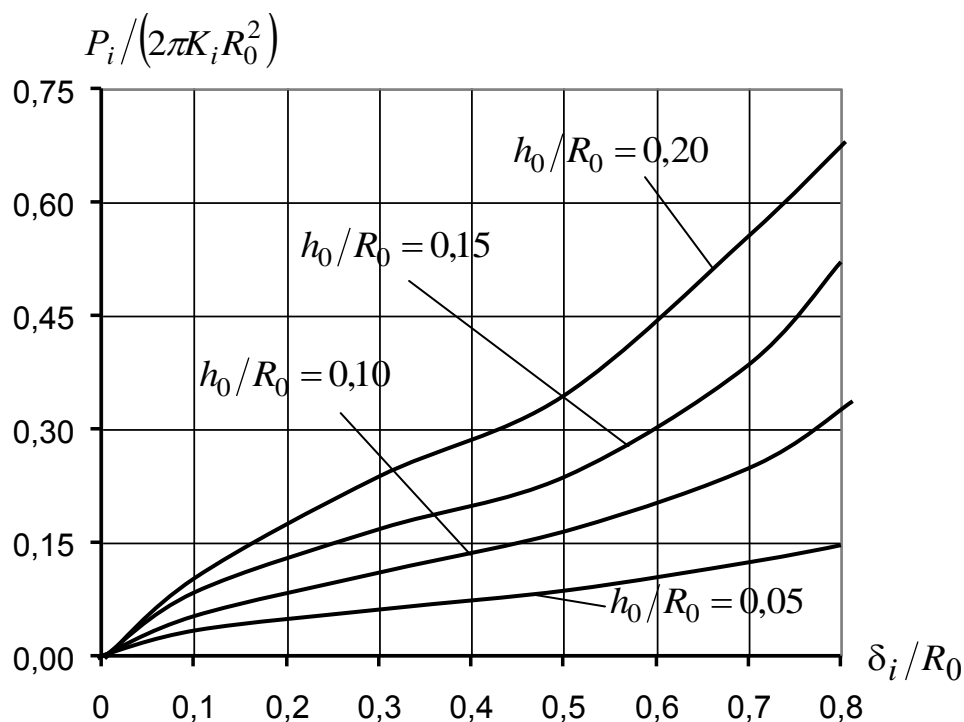


Рисунок 3.15 – Розрахункові розподіли приведенного безрозмірного значення сили пластичного деформування сферичного днища в залежності від відносного переміщення деформувального інструменту

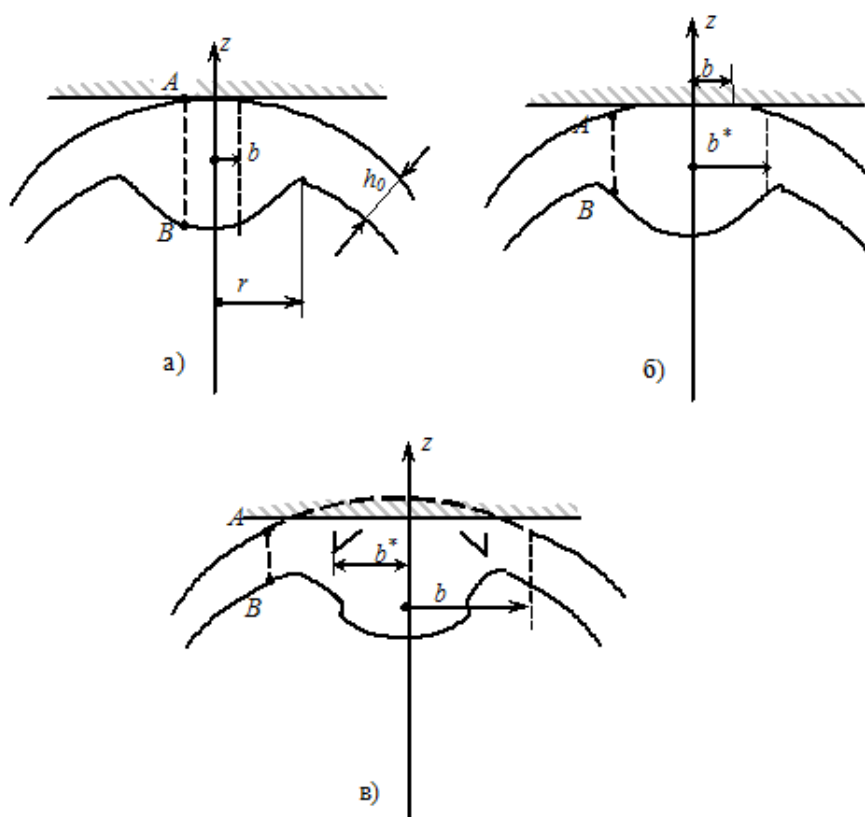
Тут слід зазначити, що на поверхні диска AD і BC, що утворюється, діють не лише дотичні напруження зсуву $\tau_{rzi} = P_i / (2\pi b_i h_i)$, але й дотичні напруження від скручування $\tau_{r\theta i} = M_i / (2\pi b_i^2 h_i) = P_i \mu_i / (3\pi b_i h_i)$, а оскільки

$\tau_{rzi}^2 + \tau_{r\theta i}^2 = K_i^2$, то уточнене значення сили деформування може бути визначене як

$$P_i = 2\pi K_i b_i h_i / \sqrt{1 + 4\mu_i^2 / 9}, \quad (3.72)$$

але при реальних значеннях $\mu_i = 0,2 \dots 0,3$ ступінь уточнювання не перебільшує 1,0...2,0 %.

Слід зазначити, що однією з особливостей сферичних або еліпсоїдних днищ, отриманих з трубних заготовок шляхом обкочування, є нестабільність їх товщини, обумовлена специфікою пластичної плинності металу при реалізації різних технологічних схем процесу обкочування. В цьому разі розрахункові схеми процесу пластичної деформації днища проілюстровані рисунком 3.16, при цьому змінення початкових геометричних параметрів робить необхідним і відповідне змінення методів, що використовуються для розрахунку.



а – початкова стадія; б – середина процесу; в – кінцева стадія

Рисунок 3.16 – Схеми пластичного деформування днища змінної товщини

На початку процесу пластичного деформування днища, тобто при малих значеннях δ і $b(\delta)$, деформування відбувається за схемою, розглянутою раніше (див. рис. 3.16, а), і поверхнею зсуву є циліндр з поверхнею АВ. Проте надалі внаслідок несталості товщини днища $h(b)$ схема деформування може змінитися, при цьому з усієї множини можливих значень радіуса b переважною є величина b^* (рис. 3.16, б), що відповідає мінімуму сили P і потужності, тобто

$$dP/db = 2\pi K_i d[bh(b)]/db = 0. \quad (3.73)$$

Звідси величина b^* може бути визначена згідно з умовою

$$b dh/db + h(b) = 0. \quad (3.74)$$

Аналіз результатів досліджень показав, що для днищ, отриманих шляхом обкочування заготовок з труб, поточне значення товщини можна навести у вигляді параболічної залежності

$$h(b) = h_{\max} - \Delta h b^2 / r^2, \quad (3.75)$$

де h_{\max} – максимальне значення товщини днища за напрямком вісі заготовки, тобто при $b = 0$; $\Delta h = h_{\max} - h_0$ – різниця товщини за віссю ($b = 0$) і за периферією ($b = r$) днища.

Згідно з рівняннями (3.74) і (3.75) отримаємо

$$b \left(-\frac{2b\Delta h}{r^2} \right) + h_{\max} - \frac{\Delta h b^2}{r^2} = 0, \text{ звідки } \frac{b^*}{r} = \sqrt{\frac{h_{\max}}{3\Delta h}}, \quad (3.76)$$

причому використати формулу (3.76), можна тільки для випадків $h_{\max}/(3\Delta h) < 1$, тобто якщо товщина днища у різних місцях суттєво відрізняється.

Рішення, аналогічне до (3.76), може бути отримане й у числовому вигляді шляхом перебору радіусів b_i , визначенням значень товщини,

що відповідають їм h_i і розрахунком сили $P_i = 2\pi K_i b_i h_i$ з подальшим вибором умов реалізації, що забезпечують мінімальне значення сили деформування. При цьому характер функціонального зв'язку $h(b)$ може бути використаний будь-якої міри складності.

На першій стадії процесу пластичного деформування днища величина радіуса $b_i(\delta)$ мала, і сила $P = 2\pi K_i b_i h_i(b_i)$ менша, ніж $P(b^*)$, оскільки при $\delta \rightarrow 0$ $b = \sqrt{2R\delta - \delta^2} \rightarrow 0$, а, відповідно, $P(b) \rightarrow 0$. Цій стадії процесу пластичного деформування днища (див. рис. 3.16, а) відповідають графіки на ділянках ОА для сили P (рис. 3.17, а) і радіуса b (див. рис. 3.17, б).

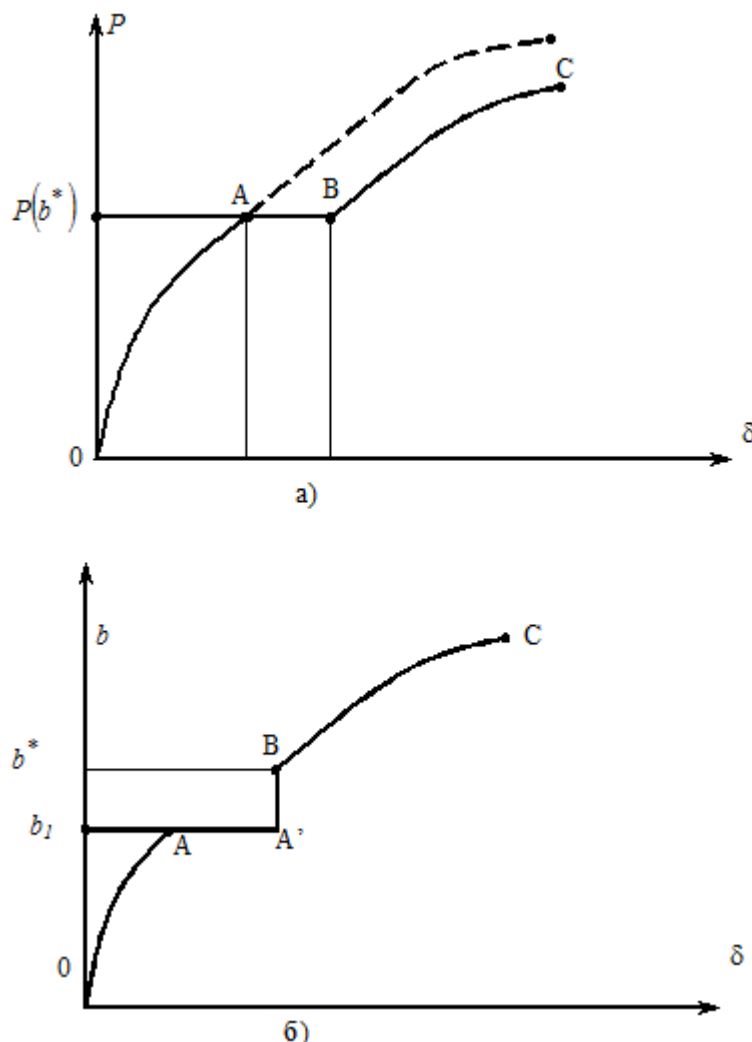


Рисунок 3.17 – Графіки при біфуркації:

а – сили $P(\delta)$; б – радіусу $b(\delta)$

Але в точці А при деякій величині b_1 визначається виразом

$$\frac{2\pi}{\sqrt{3}} \sigma_T b \left(h_{\max} - \frac{\Delta h b^2}{r^2} \right) = \frac{4}{9} \pi \sigma_T r h_{\max} \sqrt{\frac{h_{\max}}{\Delta h}},$$

$$b h_{\max} - \frac{\Delta h b^3}{r^2} = \frac{2}{3\sqrt{3}} r h_{\max} \sqrt{\frac{h_{\max}}{\Delta h}} \quad (3.77)$$

або

$$\frac{b}{r} - \frac{\Delta h}{h_{\max}} \left(\frac{b}{r} \right)^3 = \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{h_{\max}}{\Delta h}}, \quad (3.78)$$

і розв'язанням цього кубічного рівняння

$$\frac{b_1}{r} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{h_{\max}}{\Delta h}}, \quad (3.79)$$

що збігається з формулою (3.76). Тобто якщо сила $P(b^*)$ стає такою, що дорінює, а потім і меншою, за $P(b)$, реалізується схема, наведена на рисунку 3.16, б. Поверхня зсуву АВ має радіус $b^* > b(\delta)$, і саме тут відбувається зсув металу деформовуваної заготовки.

Незважаючи на те, що радіус цього циліндра більший, ніж природний радіус b , тут буде меншою товщина, і в результаті площа зсуву виявляється меншою, ніж круга радіуса b . Відбувається біфуркація – змінення схеми деформування доти, доки величина радіуса b не зросте настільки, що станеться зіткнення деформувальної плити з поверхнею оболонки, що деформується, при деякій величині $b > b^*$ (див. рис. 3.16). Якщо в точці А відбувається перша біфуркація, то друга відбувається в точці В, і далі процес відбувається природно, тобто зі збільшенням сили згідно з лінією ВС (рис. 3.17, а). Іноді на ділянці АВ сила P може не залишатися сталою, а буде трохи зменшуватися.

Ширина зони контакту інструменту і заготовки, що деформується на ділянці AA' (див. рис. 3.17, б), залишається сталою аж до появи другого круга контакту. Тоді радіус b відразу зростає стрибкоподібно відповідно до лінії A'B (див. рис. 3.17, б), а після цього величина b знову зростає на ділянці BC. Величина вертикального переміщення на другій стадії процесу відповідає величині $\Delta\delta$:

$$b - b^* = \sqrt{2R\Delta\delta}; \quad \Delta\delta = 0.5(b - b^*)^2 / R. \quad (3.80)$$

У цьому завданні розглядається можливість реалізації вірогідних шляхів розвитку пластичного деформування. В роботах проводився аналіз процесу порушення стійкості [199] переважно для циліндричних і сферичних [200] оболонки. У роботі [201] розглянуто можливості появи нестійкого «деформованого стану» і «нестійкості процесу деформування». У нашому випадку напружено-деформований стан стійкий, а можливе порушення стійкості процесу, що призводить до швидкого змінення форми зони деформування (її діаметра, який швидко стрибкоподібно зростає). Далі при русі деформувального інструменту вниз відбувається різке збільшення довжини зони контакту інструменту з заготовкою, що деформується, і знову схема деформування змінюється (це точка другої біфуркації) [202]. З декількох кінематично можливих процесів деформування реалізується той, для якого потрібно є менша потужність пластичного змінення. У цьому завданні на першій стадії процесу менша потужність при розташуванні зони зсуву (межі жорстких зон) на геометричній межі зони контакту інструменту із заготовкою. Потім такою межею є циліндр більшого діаметра, ніж межі зони контакту з інструментом (оскільки там менша товщина заготовки), а далі межа зони деформування знову збігається з межею зони контакту деформувальної плити з інструментом.

Наближена дуже проста формула для верхньої межі сили деформування має вигляд:

$$P_i = 2\pi K_i b_i h_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{Ti} \pi K_i b_i h_i = 3.63 \sigma_{Ti} b_i h_i. \quad (3.81)$$

Аналогічно для усереднених значень нормального контактного напруження

$$P_c = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \frac{h}{b} = 1.15 \sigma_T \frac{h}{b}, \quad (3.82)$$

де h – вибрана товщина зони зрушення повинна відповідати реальній товщині днища.

3.3 Аналіз температурного режиму при пластичному деформуванні днища балонів і ємностей

При деформуванні оболонки робочим інструментом у процесі пластичного формозмінення балона (рис. 3.18), що обертається, відбувається нагрівання за рахунок тертя ковзання.

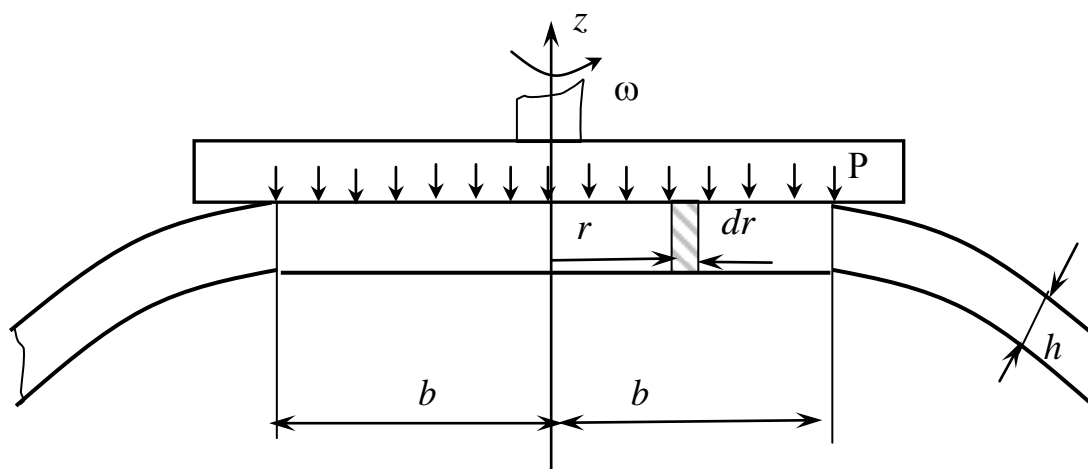


Рисунок 3.18 – Схема до розрахунку теплового режиму зони пластичного формозмінення днища

На контактній поверхні у формі круга на кожній ділянці виділяється теплова потужність, що дорівнює [150]

$$dQ = 2\pi\mu p r v dr, \quad (3.83)$$

де μ – коефіцієнт тертя ковзання;

p – питома нормальне контактне напруження;

v – швидкість ковзання, яка у разі обертання балона з кутовою швидкістю ω довкола осі z дорівнює $v = \omega r$, враховуючи це,

$$dQ = 2\pi\mu p \omega r^2 dr. \quad (3.84)$$

Якщо усереднити нормальні контактні напруження $p(r)$ і прийняти їх сталими, що дорівнюють $p = \text{const} = P/(\pi b^2)$, то

$$Q = \int_0^b 2\pi\mu p \omega r^2 dr = 2\pi\mu p \omega b^3 / 3. \quad (3.85)$$

Це тепло поступає в деформований метал і в деформувальний інструмент. Задача про розподіл температури при нагріванні тіл на поверхні (рис. 3.19) розглянута в багатьох роботах (див. розділ 1). Вивчено процеси розподілення температурних полів на поверхні контакту двох тіл.

У роботі [203] розглянуто розподіл температури при ковзанні з такими високими швидкостями, що можливе навіть оплавлення однієї з поверхонь. При цьому розглянуто не звичайні параболічні рівняння теплопровідності, а гіперболічні рівняння поширення теплових хвиль, що враховують швидкість поширення, які дорівнюють $(2...4) \cdot 10^3$ м/с.

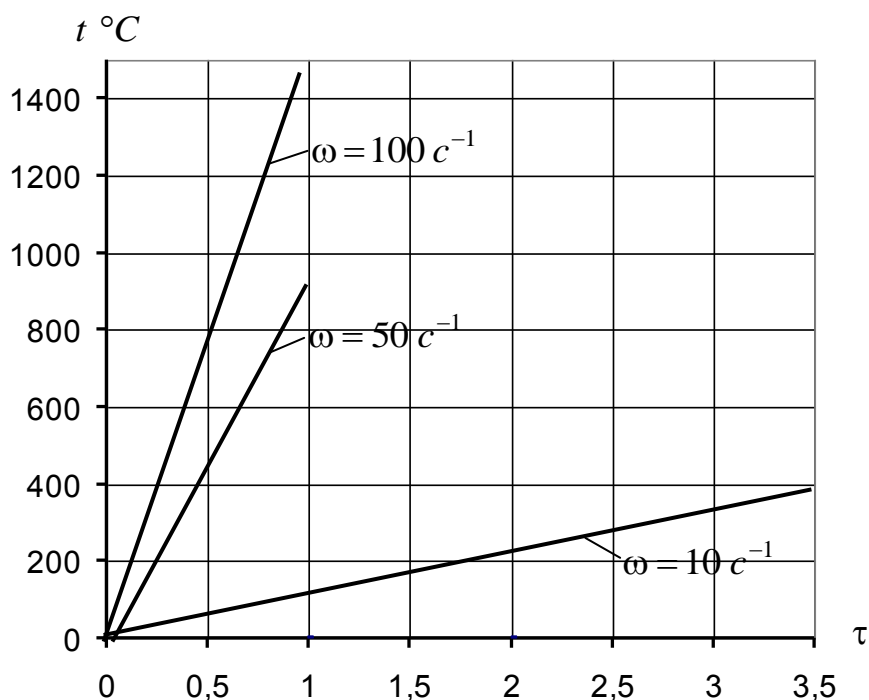


Рисунок 3.19 – Графіки $t(\tau)$ при різних величинах ω [203]

У нашому завданні такий розгляд не потрібен. Зі звичайних диференціальних рівнянь виходить, що контакт двох тіл з температурами поверхонь t_1 і t_2 приводить до теплової рівноваги при температурі контактної поверхні $t_k = (t_1 c + t_2) / (c + 1)$, $c = \sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1 / (\lambda_2 \rho_2 c_2)}$, де λ_1 , λ_2 – коефіцієнти теплопровідності матеріалів тіл, що контактують; ρ_1 , ρ_2 – густина матеріалів тіл, що контактують; c_1 , c_2 – коефіцієнти теплоємності цих матеріалів. Якщо теплові властивості матеріалів однакові ($\lambda_1 = \lambda_2$, $\rho_1 = \rho_2$, $c_1 = c_2$), то $c = 1$ і $t_k = (t_1 + t_2) / 2$ – температура дорівнює середній величині t_1, t_2 . Приймавши рівність теплових характеристик двох матеріалів і умову симетрії, вважатимемо, що тепла потужність, що виділяється, розподіляється порівну між двома тілами, які контактують, що загалом підтверджується наявними експериментальними даними.

Усереднивши температуру в об'ємі циліндра радіуса b і товщиною h_0 [204], припустимо, що на його нагрівання поступає за час $d\tau$ тепло, яке дорівнює (рис.3.18)

$$dQ_1 = \mu \rho \omega b^3 d\tau / 3, \quad (3.86)$$

а з внутрішньої поверхні відбувається охолодження і втрачається тепло

$$dQ_2 = -\alpha \pi b^2 d\tau, \quad (3.87)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі.

Температуру навколишнього середовища приймаємо такою, що дорівнює нулю. За час $d\tau$ температура виділеного елемента зростає на dt , при цьому

$$c \rho d\tau \pi b^2 h_0 = dQ_1 + dQ_2 = (\mu \rho \omega b^3 / 3 - \alpha \pi b^2 t) d\tau. \quad (3.88)$$

Отримаємо диференціальне рівняння

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\mu \rho \omega b^3}{3 c \rho \pi b^2 h_0} - \frac{\alpha \pi b^2 t}{c \rho \pi b^2 h_0} = \frac{\mu \rho \omega b}{3 c \rho h_0} - \frac{\alpha t}{c \rho h_0}. \quad (3.89)$$

Його інтеграл

$$\tau = C_1 + \int \frac{dt}{\left(\frac{\mu \rho \omega b}{3 c \rho h_0} - \frac{\alpha t}{c \rho h_0} \right)} = C_1 - \frac{c \rho h_0}{\alpha} \ln \left[\frac{\mu \rho \omega b}{3 c \rho h_0} - \frac{\alpha t}{c \rho h_0} \right], \quad (3.90)$$

Звідки

$$\ln \left[\frac{\mu \rho \omega b}{3 c \rho h_0} - \frac{\alpha t}{c \rho h_0} \right] = (C_1 - \tau) \frac{\alpha}{c \rho h_0}; \quad \frac{\alpha t}{c \rho h_0} = \frac{\mu \rho \omega b}{3 c \rho h_0} - \exp \left((C_1 - \tau) \frac{\alpha}{c \rho h_0} \right). \quad (3.91)$$

Враховавши початкову умову $t = t_n$ при $\tau = 0$, визначимо сталу інтегрування:

$$C_1 = \frac{c\rho h_0}{\alpha} \ln \left(\frac{\mu\rho\omega b}{3c\rho h_0} - \frac{\alpha t_n}{c\rho h_0} \right). \quad (3.92)$$

У результаті отримаємо

$$t = \frac{\mu\rho\omega b}{3\alpha} - \left(\frac{\mu\rho\omega b}{3\alpha} - t_n \right) \exp \left(- \frac{\alpha \tau}{c\rho h_0} \right), \quad (3.93)$$

де t_n – початкова температура балона.

Якщо $t_n = 0$, тобто заготовка не піддавалася попередньому нагріванню і нагрівається тільки за рахунок тертя деформувальним інструментом, то

$$t = \frac{\mu\rho\omega b}{3\alpha} - \left(\frac{\mu\rho\omega b}{3\alpha} - t_n \right) \exp \left(- \frac{c\rho h_0}{\alpha} \right). \quad (3.94)$$

У результаті при $\tau = 0$ і $t = 0$, а при $\tau \rightarrow \infty$ температура прямує до скінченної величини, що дорівнює

$$t = \frac{\mu\rho\omega b}{3\alpha}. \quad (3.95)$$

Це гранична температура, до якої можна нагрівати заготовку у цих умовах. При виведенні рівняння (3.89) зроблено два основні допущення: про усереднювання температури по товщині оболонки і про те, що можна нехтувати теплопередачею на межах зони деформування і зовнішньої зони (тобто іншої оболонки), що для тонкостінних оболонок допустимо, і тим більше, чим вище відношення площі круга радіуса b до площі циліндра радіуса b і товщиною h_0 , тобто чим менше відношення h/b . На рисунку 3.19 показано зміну температури при $\mu = 0,1$, $P_c = 0,1\sigma_T$, $\sigma_T = 100 \text{ МПа}$,

$P_c = 10 \text{ МПа}$, $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$, $c = 700 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{ср})$, $\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$, $h = 0,01 \text{ м}$,
 $b = 0,04 \text{ м}$, $\alpha = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$ [184]. При цьому температура
 $t = 2,66 \cdot 10^4 [1 - \exp(-9,16 \cdot 10^{-4} \tau)]$, а при $\tau = 60 \text{ с}$
 $t = 2,66 \cdot 10^4 [1 - \exp(-0,055)] \approx 1461 \text{ }^\circ\text{C}$. У такому режимі вже за 39...40 с
можна забезпечити нагрів приблизно до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ і отримати температуру,
потрібну для реалізації процесу пластичного деформування. Графіки $t(\tau)$
наведено на рисунку 3.19 при деяких величинах ω . У початковій стадії на-
грівання залежності $t(\tau)$ будуть близькими до лінійних, оскільки
 $\exp\left(-\frac{\alpha t}{c\rho h_0}\right) \approx 1 - \frac{\alpha t}{c\rho h_0}$ і

$$t = \frac{\mu\rho\omega b}{3\alpha} \cdot \frac{\alpha\tau}{c\rho h_0} \approx \frac{\mu\rho\omega b}{3c\rho h_0} \tau, \quad (3.96)$$

але тільки при $\frac{\alpha t}{c\rho h_0} \ll 1$.

Загальний характер функції $t(\tau)$ показано на рисунку 3.20. Аналіз ре-
зультатів дозволив встановити, що нагрівання відбувається на початку
швидко, а потім все повільніше і при $\tau \rightarrow \infty$, $t \rightarrow t_k$. Аналіз графічних за-
кономірностей (див. рис. 3.19) дозволив встановити, що при малих вели-
чинах ω , наприклад $\omega = 10 \text{ с}^{-1}$ нагрівання відбувається занадто повільно, а
такий режим неприйнятний для реальних технологічних процесів. Так, че-
рез 10 хв ($\tau = 600 \text{ с}$) при $\omega = 10 \text{ с}^{-1}$ $t \approx 1131 \text{ }^\circ\text{C}$, тобто нагрівання потребує
8...10 хв, що непринятно. Прийmemo бажану температуру нагрівання ді-
лянки оболонки, що деформується, $t = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, тоді необхідний час нагрі-
вання, згідно з (3.96), $\tau_0 = \frac{3c\rho h_0 t_0}{\mu\rho\omega b}$, $t_0 = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\tau_0 = \frac{3 \cdot 10^3 c \rho h_0}{\mu \rho \omega b}, \quad (3.97)$$

а для сталі при $c = 700 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$, $\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$
 $\tau_0 = 1,64 \cdot 10^{10} h_0 / (\mu \rho \omega b)$. При $\mu = 0,1$, $P_c = 10 \text{ МПа}$, $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$, $h = 0,01 \text{ м}$;
 $b = 0,04 \text{ м}$ $\tau_0 = 41 \text{ с}$.

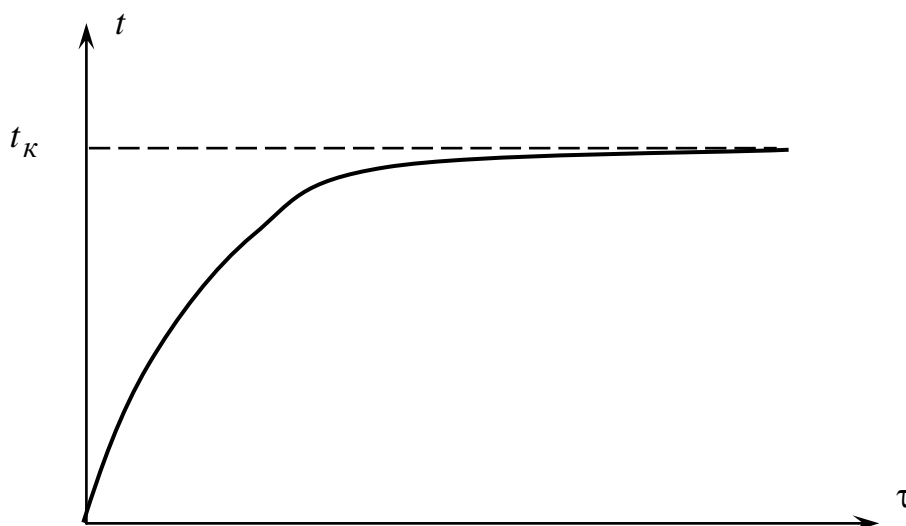


Рисунок 3.20 – Графік функції температури металу від часу $t(\tau)$

Тому слід реалізувати процес деформування таким чином: спочатку натиснути плитою на заготовку і вчинити 1/3 ходу інструменту. Після цього зупинити переміщення інструменту приблизно на 41 с, при цьому він нагрівається тертям. Через паузу 41 с продовжити рух, здійснивши переміщення на наступні 2/3 ходу.

Зрозуміло, якщо балон заздалегідь нагрітий, то час фрикційного нагрівання можна зменшити. Наприклад, якщо балон вже нагрітий до $500 \text{ }^\circ\text{C}$, то для його нагрівання до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ досить (при параметрах, використуваних в розрахунку) не 41 с, а приблизно 20 с. Якщо бажано ще зменшити час нагрівання, можна збільшити швидкість обертання. Якщо обернути балон при 1500 об/хв , то $\omega \approx 150 \text{ с}^{-1}$ і тоді $\tau_0 = 27 \text{ с}$.

Якщо здійснюється деформування з одночасним обтисканням по осі балона і по деякому колу АВ (рис. 3.21), то це покращує не лише схему напруженого стану, але й схему нагрівання заготовки. У цьому разі нагрівання походить не лише від центра, від осі балона, де швидкість обертального руху низька, але й по колу АВ, де швидкість ковзання, пропорційна ωr , вища, а значить і потужність фрикційного нагрівання буде вищою.

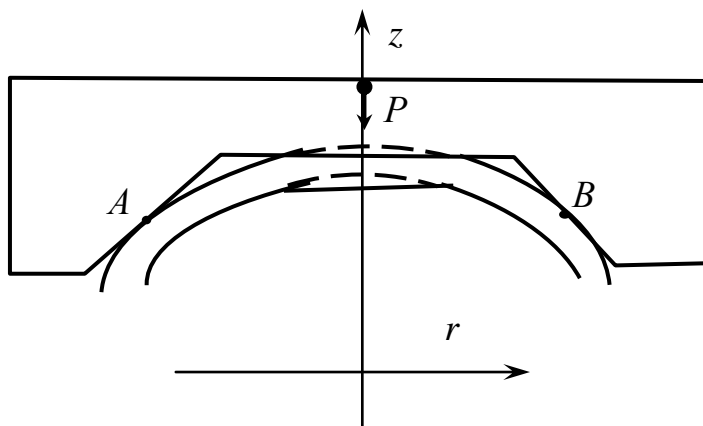


Рисунок 3.21 – Схема нагрівання при деформуванні з усебічним стискуванням

У роботі [205] отримано формулу для товщини шару δ , у якому зосереджено теплову дію при нагріванні за рахунок тертя ковзання двох тіл. За результатами дослідів ця величина дорівнює $\delta = 0,5\sqrt{\pi\lambda\tau/(c\rho)}$, при цьому тепловий потік на поверхні сталей.

Для сталі можна прийняти $\lambda = 30 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{гр})$, $c = 700 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{гр})$; $\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$, а час дії приймемо таким, що дорівнює, як показано вище, $\tau = 40\text{...}60 \text{ с}$.

Тоді отримаємо

$$\delta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3.14 \cdot 30 \cdot (40 \div 60)}{700 \cdot 7800}} = (1.3 \div 1.6) \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad (3.97)$$

тобто порядок товщини теплового шару, в якому головним чином знаходиться виділена тепла енергія, складає 13...16 мм, що близько до товщини днища балона. Тому можна зробити висновок, що вибрані режими деформування є найбільш енергоощадними, вони забезпечують зосереджене розташування теплового шару саме в необхідній товщині металу (уникаючи випадку, коли не увесь метал встигає нагрітися, а також випадку, коли $\delta \gg h_0$ і тепло надмірно втрачається у навколишнє середовище, замість того, щоб бути витраченим на нагрівання металу), що деформується.

Висновки за розділом 3

Математичне моделювання НДС металу при пластичному деформуванні днищ балонів дозволило встановити ряд залежностей, що дозволяє в подальшому звужити границі подальших досліджень як чисельно-розрахункового, так і експериментального характеру.

1. На основі результатів математичного моделювання встановлено, що доцільним є попереднє підігрівання заготовки до температури не менше 900°C. Це дає можливість суттєво зменшити час обробки заготовки, та зношування інструменту тертя. Також встановлена ефективна початкова температура процесу обкочування, яка повинна складати близько 1150°C, що сприяє інтенсивному закриттю та зварюванню отвору днища.

2. Встановлені швидкісні режими пересування інструменту тертя при обкочуванні заготовки (0,5 ... 2,0 мм / с), які дозволяють забезпечити високий рівень стискаючих напружень, що позитивно впливає на підвищення герметичності днища балону.

3. Математично були встановлені межі оптимального технологічного параметру обробки заготовки: кутову швидкість обертання заготовки

(10...150 с^{-1}). Зазначені результати дозволили уточнити схеми деформування для скінчено-елементного дослідження процесу обкочування та підсаджування заготовки, а також звузити кількість експериментальних досліджень, що дає суттєву економію як на час досліджень, так на витрати пов'язані з ними.

4. Встановлені математичні моделі можуть бути використані при аналізі схожих процесів обробки тиском циліндричних пустотілих з відносною товщиною стінки ($D/s = 10..20$) заготовок для визначення оптимальних режимів.

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПУСТОТІЛИХ ЗАГОТОВОК НА ТЕПЛОВИЙ І НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ОСЬОВОЇ ЗОНИ ДНИЩА

4.1 Розподіл температур і деформацій у трубній заготовці при тангенціальному обкочуванні ІТ

Тангенціальне обкочування ІТ з раціональними режимами обкочування дозволить розширити технологічні можливості процесів виготовлення виробів з трубних заготовок з днищем, у тому числі і для виробництва балонів та інших схожих виробів. На сьогодні спосіб є мало дослідженим теоретично, а саме є мало дослідженими параметри НДС заготовки, що чинять основний вплив на процес обкочування труб [206]. Промислове впровадження удосконаленого процесу тангенціального обкочування ІТ сферичних днищ стане можливим після встановлення точних технологічних рекомендацій. Ці технологічні рекомендації будуть полягати у визначенні раціональних геометричних параметрів трубної заготовки, подачі та температури нагрівання заготовки перед обкочуванням.

Механізм формоутворення днища в процесі обкочування пустотілих заготовок ІТ залежить від НДС заготовки під час її деформування. Останній залежить від співвідношення розмірів трубної заготовки та режимів її обкочування. Процес тангенціального обкочування ІТ пустотілих заготовок відбувається зі збільшенням товщини стінки днища. Визначення НДС заготовки в процесі обкочування необхідно проводити після встановлення розподілу температур у повздовжньому перерізі внаслідок розігрівання заготовки в процесі її обкочування ІТ. Основна концепція досліджуваного

процесу тангенціального обкочування ІТ полягає в одночасному проведенні процесів деформування та нагрівання пустотілої заготовки від дії сил тертя. Підвищення температури пустотілої заготовки залежить від фактора тертя, кутової швидкості, швидкості подавання та початкової температури труби. Усі зазначені технологічні параметри, за винятком початкової температури заготовки, у моделюванні були обрані сталими при обкочуванні. Під дією сил тертя температура труби буде збільшуватися. У цьому зв'язку необхідно визначити максимальну температуру нагрівання труб перед тангенціальним обкочуванням ІТ. Встановлений градієнт температур за поперечним перерізом заготовки дозволить визначити максимальну температуру нагрівання заготовки перед обкочуванням. Підвищення температури днища труби при обкочуванні може призвести до її перегрівання та перепалення структури металу. Це, в свою чергу, призведе до зниження механічних властивостей днища. Розігрівання заготовки здійснюється від дії двох фізичних процесів при обкочуванні: розігрівання від тертя та теплового ефекту від пластичного деформування.

Як зазначалося в методиці дослідження (див. п. 2.1), на першому етапі необхідно визначити вплив відносної товщини стінки пустотілої заготовки та початкової температури нагрівання на розігрівання днища при сталій величині подачі заготовки в ІТ. За результатами цього дослідження буде встановлено максимальну температуру днища по закінченні процесу обкочування ІТ. Ця температура буде обрана як раціональна для реалізації зазначеного процесу. Дослідження процесу проводилося при різних початкових гомологічних температурах (t_{zom}) у діапазоні 0,6 ... 0,8. Відносна товщина стінки труби (D/s) варіювалася у діапазоні 10 ... 20. Відносна подача заготовки в ІТ (l/D) становила 0,8 та була сталою. Тепловий стан заготовки в процесі обкочування було встановлено за допомогою МСЕ (рис. 4.1).

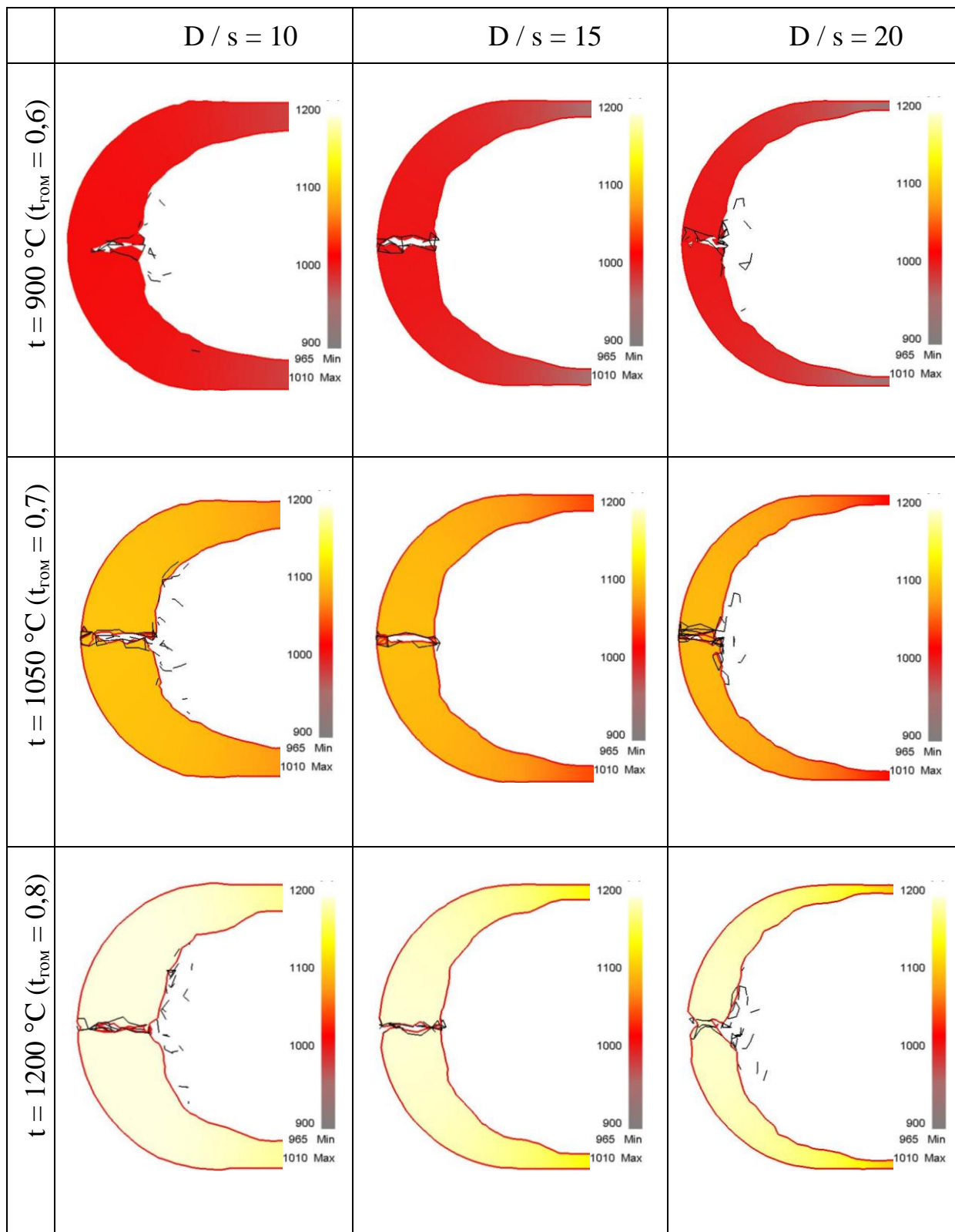


Рисунок 4.1 – Розподіл температур у заготовках із різною початковою температурою та відносною товщиною стінки при сталій подачі заготовки в ІТ

Аналіз результатів розподілу температур за поздовжнім перерізом дозволив встановити, що температура розподіляється нерівномірно за перерізом заготовки (див. рис. 4.1). Максимальне розігрівання заготовки локалізується в осьовій зоні днища, що можна пояснити тривалим контактом заготовки з ІТ та максимальним накопиченням деформації у цій зоні. Мінімальну температуру має заготовка у місці її фіксації патроном верстата [150].

Такий розподіл температур можна пояснити максимальним розігріванням днища труби та інтенсивним охолодженням заготовки з боку захоплювача верстата, а також нерівномірним початковим нагріванням. За перерізом пустотілої заготовки при тангенціальному обкочуванні ІТ градієнт температур не виходить за межі температурного інтервалу гарячого оброблення тиском для співвідношень розмірів модельованої заготовки. Розподіл температур підтвердив припущення, що підігрівати трубну заготовку не потрібно в процесі тангенціального обкочування ІТ. Було встановлено, що в процесі обкочування, з початковим нагріванням заготовок з різною товщиною стінки до температур 900...1200 °С, не відбувається охолодження заготовки, а також різке підвищення температури. Це дозволило встановити важливу для практики процесу тангенціального обкочування ІТ технологічну рекомендацію з температури нагрівання заготовок. Ця температура становить приблизно 1150 ... 1200 °С ($t_{zom} = 0,8$). Рівень цієї температури достатній для максимальної пластичності металу, мінімальної сили обкочування, заварювання стінок осьової зони днища, а також виключення утворення перегрівання та перепалення металу.

Визначення раціональних режимів потребує встановлення деформованого стану заготовки в процесі тангенціального обкочування. Після встановлення розподілу температур був визначений розподіл інтенсивності логарифмічних деформацій за об'ємом заготовки при обкочуванні (рис. 4.2).

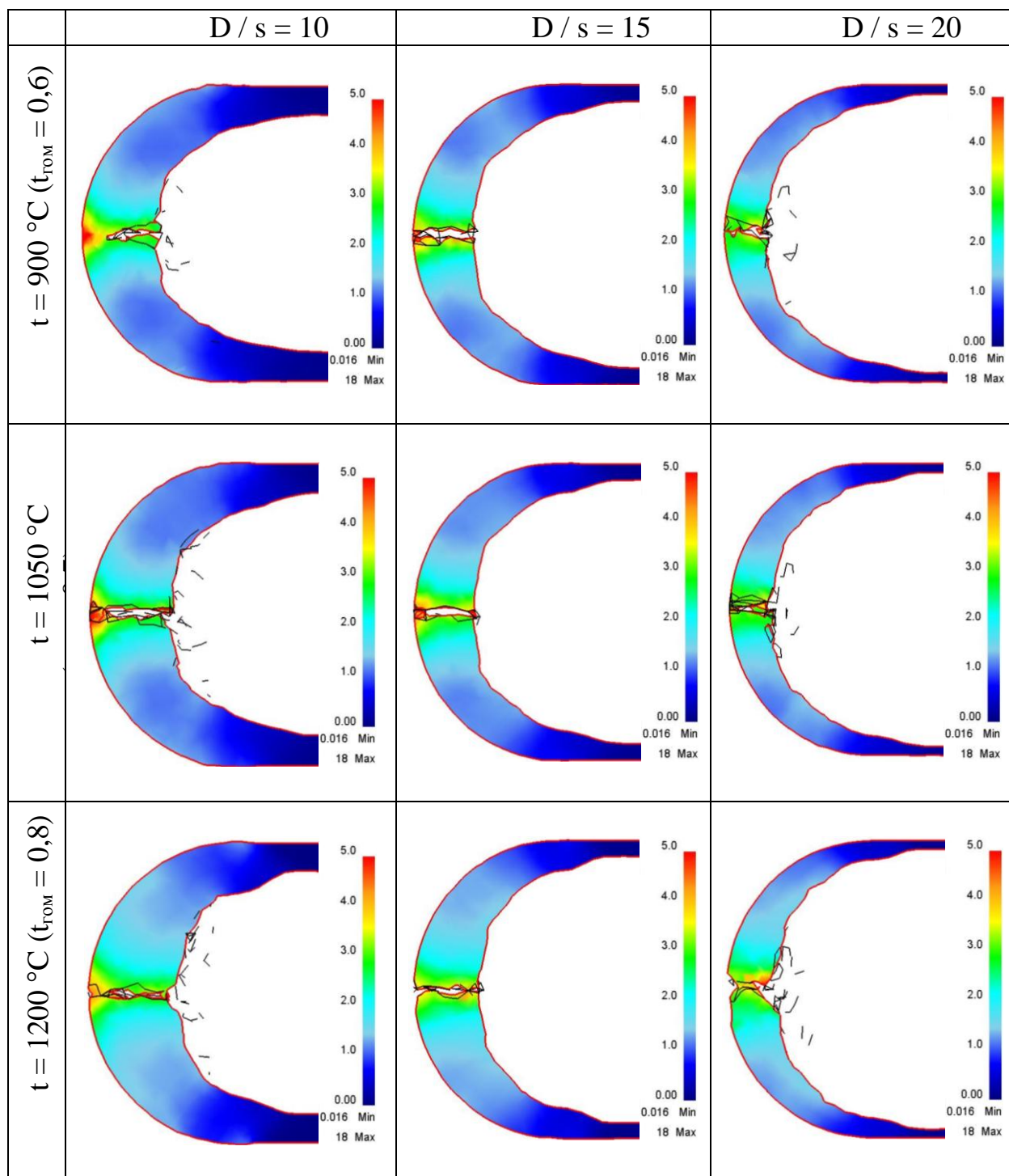


Рисунок 4.2 – Розподіл інтенсивності логарифмічних деформацій у заготовках із різною початковою температурою та відносною товщиною стінки при сталій подачі заготовки в ІТ

Після аналізу результатів розподілу деформацій у тілі заготовки було встановлено, що поле деформацій за якісною оцінкою подібне для модельованих схем обкочування [207]. Максимальний рівень деформацій локалізується у зоні отвору днища. Пояснити отримані результати можна тим, що цей об'єм заготовки зазнає суттєвого формозмінення.

Обкочування призводить до збільшення товщини стінки днища. Товщина днища збільшується поступово від трубної ділянки до осьової зони. Зазначена закономірність характерна для пустотілих заготовок з різною відносною товщиною стінки та різною початковою температурою нагрівання.

Кількісна відмінність розподілу деформованого стану заготовки за поздовжнім перерізом полягає в тому, що при обкочуванні пустотілих заготовок з товстою стінкою (див. рис. 4.2, перший стовпчик) деформації з максимальним рівнем розташовуються на зовнішній поверхні днища. Обкочування тонкостінних заготовок призводить до появи максимальних деформацій на внутрішній поверхні днища (див. рис. 4.2, третій стовпчик). Цей результат є новим науковим спостереженням, який можна пояснити різним напруженим станом труби при обкочуванні тонкостінних і товстостінних пустотілих заготовок. У зв'язку з цим був додатково встановлений напружений стан металу трубної заготовки в процесі обкочування (рис. 4.3). Напружений стан аналізувався на основі даних розподілу середніх напружень за поздовжнім перерізом днища. Середні напруження дозволять встановити рівень і знак дієвих напружень, на основі яких можна пояснити механізм закриття отвору днища.

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що при підвищенні температури рівень стискних напружень у днищі знижується: середні напруження змінюються від від'ємних (стискних) з величин -50 МПа до -10 МПа. Отримана закономірність пояснюється зниженням опору деформуванню при підвищенні температури деформування.

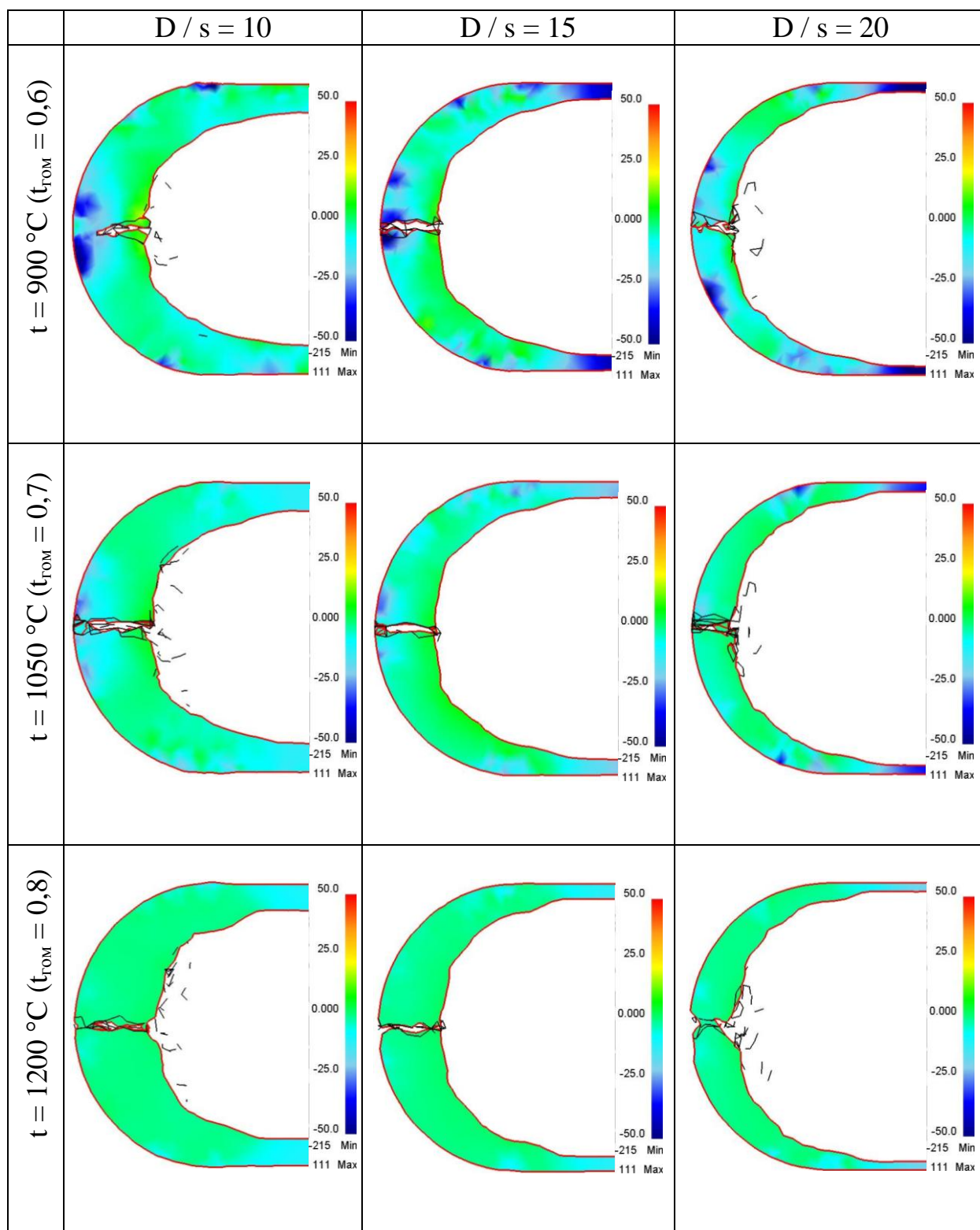


Рисунок 4.3 – Розподіл середніх напружень у заготовках з різною початковою температурою та відносною товщиною стінки при сталій подачі заготовки в ІТ

Максимальні стискні напруження виникають на зовнішній поверхні днища, що можна пояснити впливом ІТ. При зменшенні товщини стінки заготовки рівень стискних напружень у зоні отвору знижується, що пояснюється меншою товщиною днища, а відповідно, і меншою.

Моделювання процесу тангенціального обкочування дозволило встановити, що відносна подача заготовки в ІТ $l/D = 0,8$ не призводить до повного змикання стінок труби в осьовій зоні днища, що пояснюється малою кількістю об'єму металу заготовки [208]. Другим етапом моделювання необхідно встановити раціональну відносну подачу заготовки в ІТ для повного змикання стінок отвору труби. Для оцінювання ступеня заварювання отвору необхідно встановити рівень стискних напружень на основі показника напруженого стану металу заготовки в місці змикання стінок.

4.2 Напружено-деформований стан пустотілої заготовки при тангенціальному обкочуванні ІТ при різних величинах подач

Проведені попередні дослідження дозволили встановити, що досліджуваної відносної подачі труби в ІТ, яка дорівнює 0,8, не достатньо для повного закочування отвору днища (див. п. 4.1). Тому на другому етапі необхідно встановити рекомендовану відносну подачу пустотілої заготовки. Згідно з методикою проведення дослідження (див. п. 2.2) відносна подача труби в ІТ (l/D) варіювалася в діапазоні 0,8 ... 1,0. Попередні дослідження дозволили визначити раціональну гомологічну температуру нагрівання заготовки перед обкочуванням ($t_{zom} = 0,8$). Ця температура для сталі 34ХН становила 1200 °С (див. рис. 4.1). На цьому етапі моделювання зазначена температура нагрівання заготовки приймалася однаковою для досліджуваних схем обкочування [209]. На рисунку 4.4 наведено змінення форми з розподілом температур за перерізом днища.

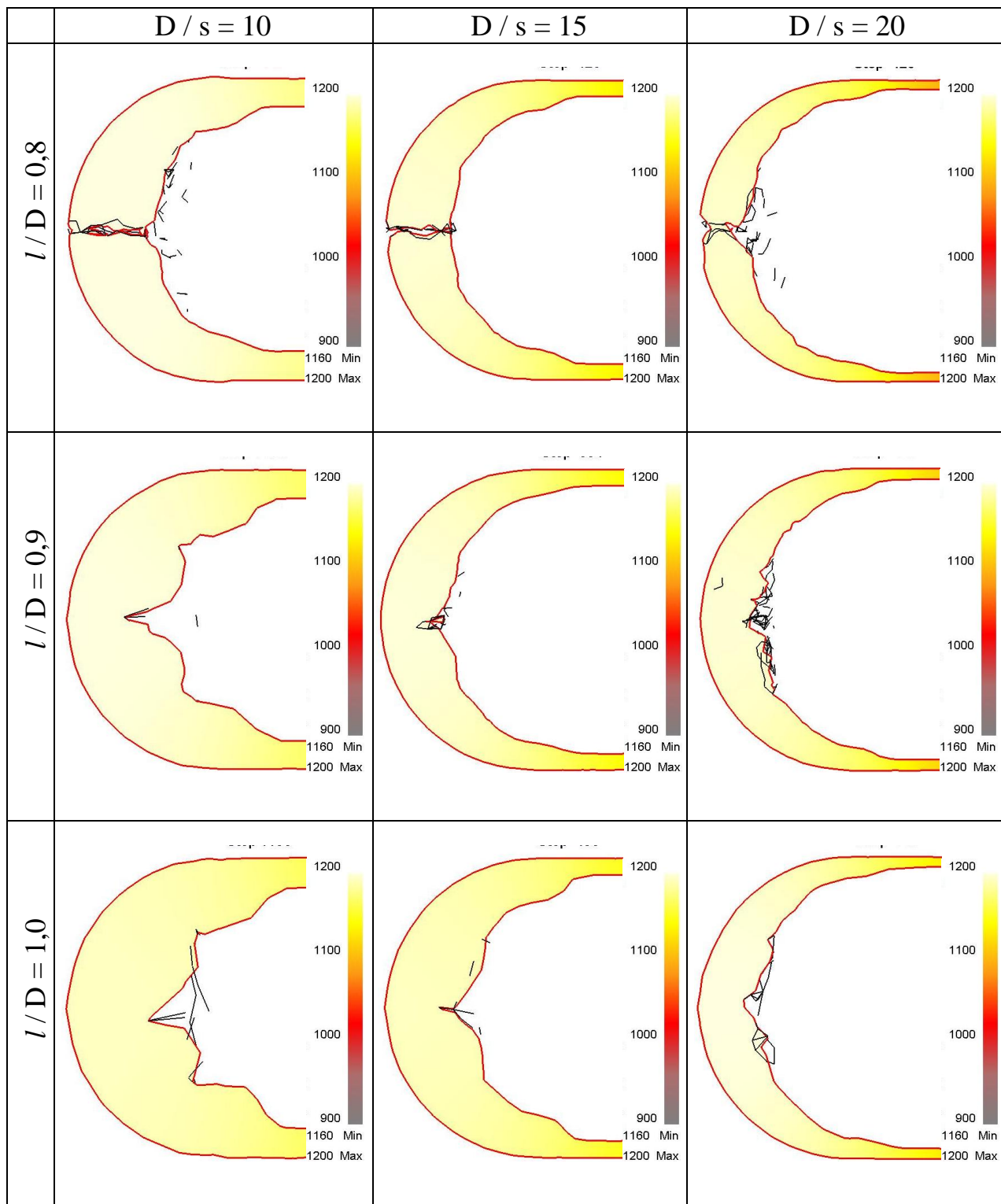


Рисунок 4.4 – Розподіл температур за перерізом днища після тангенціального обкочування ІТ труб з початковою гомологічною температурою нагрівання 0,8 і різною довжиною подачі

Аналіз результатів моделювання дозволив зробити висновок, що збільшення відносної подачі заготовки (l/D) від 0,8 до 1,0 сприяє повному закриттю осьового отвору труби [210]. Це можна пояснити збільшенням об'єму обкочуваної заготовки. Закриття отвору труби відбувається при відносній сталій подачі в ІТ, котра становить 0,9 (рис. 4.4, другий рядок). При відносних подачах заготовки менших, ніж 0,9, закриття отвору не відбувається, а при більших співвідношеннях (1,0) відбувається невідповідне збільшення товщини днища (третій рядок рисунку 4.4). Більш того, внутрішня поверхня днища має значне викривлення, що призведе до значних витрат матеріалу. Можна зробити висновок, що ефективною відотною подачею труби є величина, близька до 0,9. Перепад температур за поздовжнім перерізом заготовки для різних схем обкочування не відрізняється. При гомологічній температурах труби 0,8 (1200 °С) не відбувається істотне перегрівання або охолодження днища при різних відносних товщинах стінки труби та її подачах.

Специфіку формоутворення днища у процесі тангенціального обкочування ІТ можна встановити на основі аналізу розподілу деформацій за перерізом днища (рис. 4.5). Збільшення величини подачі пустотілої заготовки в ІТ призводить до локалізації максимальних деформацій на зовнішній поверхні днища в осьовій зоні. Ці результати можна пояснити більшою траєкторією пересування часток металу заготовки, що призводить до збільшення деформації в цих зонах. Збільшення довжини деформованої заготовки сприяє накопиченню деформацій високого рівня в днищі. У результаті збільшується товщина стінки днища.

Результати з формозмінення та розподілу деформацій у тілі заготовки дозволяють встановити лише способи обкочування, які дозволяють закрити осьовий отвір труби при формуванні днища [150]. Однак результати з аналізу деформованого стану не дають інформації щодо ступеня заварювання стінок отвору.

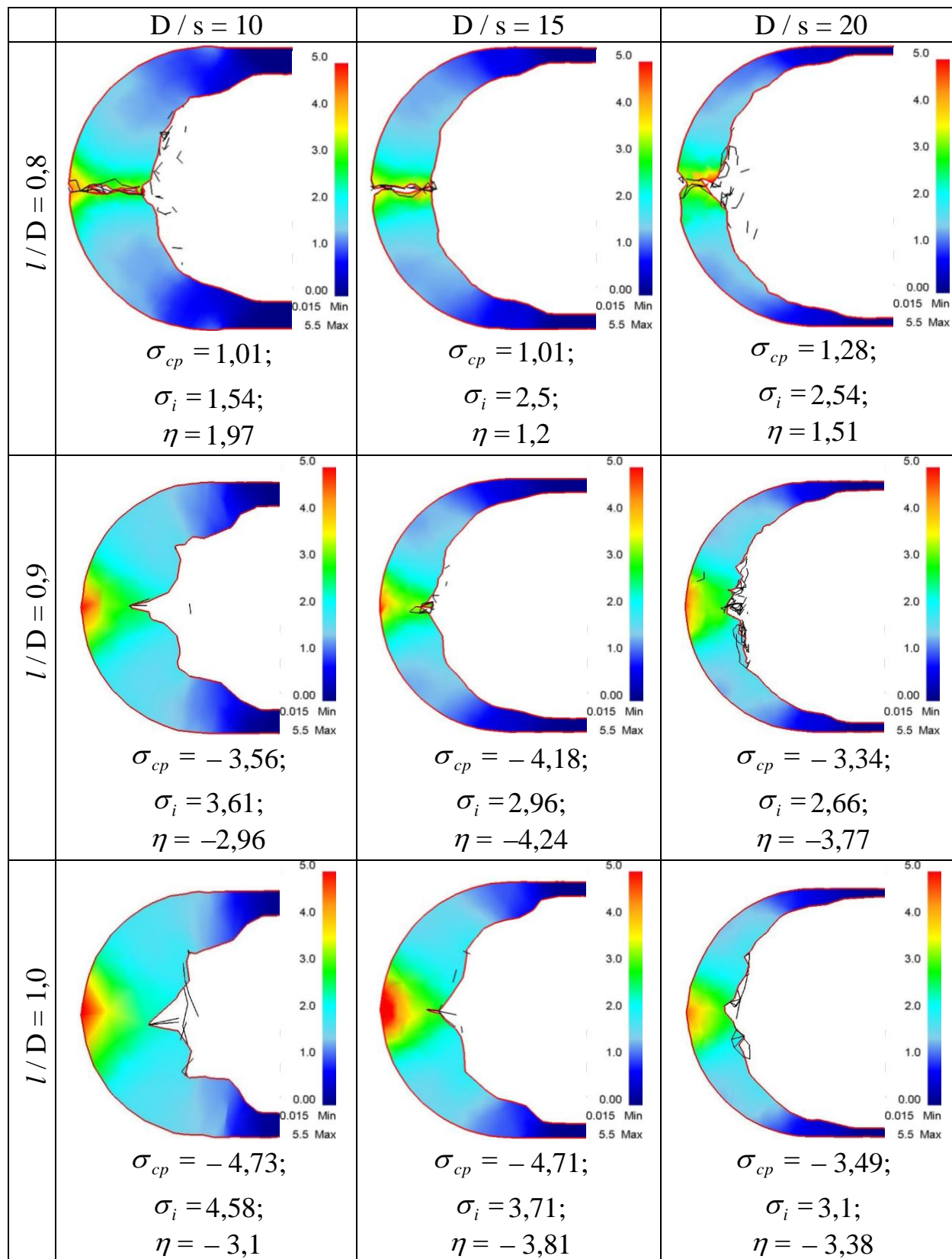
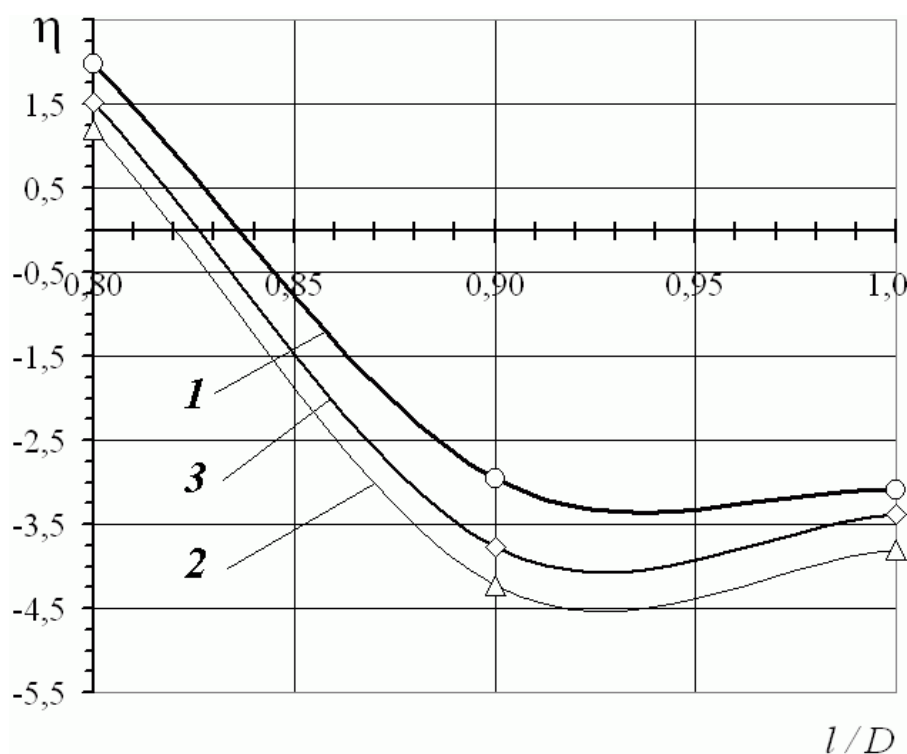


Рисунок 4.5 – Розподіл інтенсивності логарифмічних деформації за перерізом днища після тангенціального обкочування ІТ труб з гомологічною температурою нагрівання 0,8 і різною довжиною подачі

Кількісно оцінити ступінь заварювання стінок отвору труби можна за результатами аналізу напруженого стану в отворі днища. При цьому вірогідність заварювання отвору днища буде визначатись не лише величиною напружень, але й їхнім знаком. Заварюванню отвору будуть сприяти стискні напруження. У зв'язку з цим для повного аналізу напруженого стану металу заготовки слід враховувати знак напружень. Крім того, для універсальності отриманих даних необхідно встановити закономірності таких параметрів, які дозволили б виключити вплив хімічного складу матеріалу. Таким параметром може бути показник схеми напруженого стану по Бабічкову [197]. Цей параметр визначається за відношенням суми головних напружень до інтенсивності напружень (рис. 4.6).



1 – $D/s = 10$; 2 – $D/s = 15$; 3 – $D/s = 20$

Рисунок 4.6 – Показник схеми напруженого стану в осьовій зоні днища при різних відносних подачах і товщинах стінок заготовок (D/s)

За результатами напруженого стану металу заготовки встановлено, що при відносних подачах, які дорівнюють 0,8, показник схеми напруженого стану η має знак «+» (рис. 4.6). Це свідчить про появу в стінці днища розтягувальних напружень, що не буде сприяти заварюванню отвору (див. рис. 4.5, верхній рядок). При відносних подачах заготовки (l/D) понад 0,8 відбувається поява стискних напружень (показник η має знак «-»). Максимальні стискні напруження відбуваються при подачі заготовки в ІТ у діапазоні 0,9...0,95 (рис. 4.6).

У цьому діапазоні показник напруженого стану η має рівень $-4,5$, що свідчить про високий рівень гідростатичних напружень. Цим можна пояснити повне закриття отвору днища, особливо при відносній товщині стінки труби (D/s) у діапазоні 15...20 (рис. 4.6).

Збільшення довжини подачі труби призводить до збільшення рівня розтягувальних напружень в осьовій зоні днища [211].

На основі аналізу результатів змінення форми днища, теплового та деформаційного стану заготовки та показника напруженого стану металу днища зроблений висновок про повне закриття та повне заварювання стінок отвору днища при таких параметрах процесу обкочування: відносна подача заготовки (l/D) повинна бути в діапазоні 0,9...0,95; відносна товщина стінки труби (D/s) повинна знаходитись у діапазоні 15...20; гомологічна температура попереднього нагрівання пустотілої заготовки $t_{\text{гом}} = 0,8$. Ці параметри були обрані як раціональні при розробленні технологічних процесів тангенціального обкочування ІТ.

4.3 Напружено-деформований стан пустотілої заготовки при комбінуванні операцій тангенціального обкочуванні ІТ та підсадки днища

Проведені попередні дослідження дозволили встановити рекомендації для обкочування днищ, які забезпечують закриття осьового отвору пус-

тотілої заготовки. На даному етапі дослідження було вирішено перевірити вплив операції підсадкою сферичного днища на НДС у місці змикання стінок труби, як це було запропоновано у патенті [29]. Для цього необхідно було після обкочування сферичного днища підсадити його на різний ступінь деформації. Ступінь деформації обчислювався

$$\varepsilon = \frac{R - H_{\text{дн}}}{R},$$

де R – радіус днища;

$H_{\text{дн}}$ – поточна висота днища.

Сферичне днище підсаджувалось на 15 та 30 % відносно радіуса днища. Підсадження днища призведе до зміни не тільки форми, але й змінню товщини стінки дна, розподілу температур, деформацій та показників НДС металу заготовки. Результати формозмінення та НДС днища після обкочування та підсаджування представлені на рисунку 4.7.

Аналіз результатів розподілу температур за поздовжнім перерізом днища дозволив встановити, що температура розподіляється нерівномірно (див. рис. 4.7). Максимальна температура заготовки розташовується в центральній осьовій зоні днища, що можна пояснити тривалим контактом заготовки з ІТ під час обкочування та підсадки плоским пуансоном, а також накопиченням у цій зоні максимальних деформації. Мінімальну температуру має заготовка у місці її фіксації патроном верстата. Утворений розподіл температур можна пояснити максимальним розігріванням днища труби при деформуванні ІТ та охолодженням заготовки з боку захоплювача верстата, а також нерівномірним початковим нагріванням. За перерізом пустотілої заготовки при комбінуванні тангенціального обкочування ІТ та підсадки градієнт температур не виходить за межі температурного інтервалу гарячої обробки тиском.

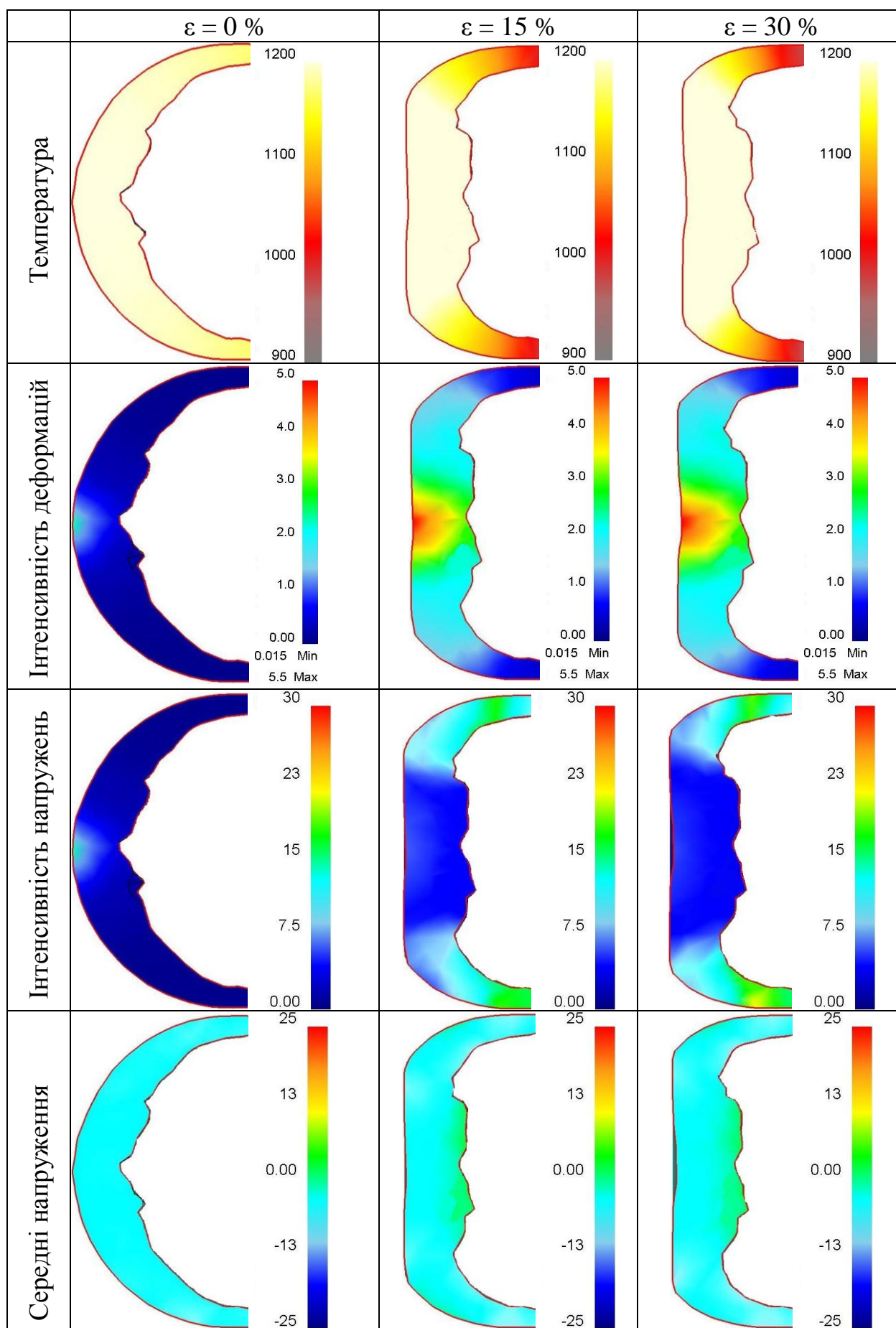


Рисунок 4.7 – Розподіл параметрів НДС після підсадження днища

Розподіл температур підтвердив припущення, що підігрівати трубку заготовку не потрібно в процесі обкочування та підсадки ІТ. Було встановлено, що в процесі обкочування, з початковим нагріванням заготовок до температури 1200 °С, не відбувається охолодження днища заготовки, а також різкого підвищення температури. Це дозволило встановити важливу для практики процесу обкочування днищ з підсадкою технологічну рекомендацію з температури нагрівання заготовок. Ця температура становить приблизно 1150 ... 1200 °С ($t_{zom} = 0,8$). Величина цієї температури достатня для забезпечення максимальної пластичності металу, мінімальної сили обкочування, заварювання стінок осьової зони днища, а також виключення утворення перегрівання та перепалення металу.

Висновок про ефективність запропонованого нового способу обкочування днищ з підсадкою потребує аналізу деформованого стану заготовки (рис. 4.7). Аналіз результатів розподілу деформацій у тілі заготовки під час підсадки дозволив встановити, що зі збільшенням ступеня підсадки зона пластичних деформацій збільшується. Максимальний рівень деформацій локалізується в осьовій зоні днища. Це пояснюється тим, що ця зона заготовки зазнає суттєвого формозмінення.

Відмінність деформованого стану заготовки за поздовжнім перерізом полягає в тому, що при підсадці днища (див. рис. 4.7, другий рядок) деформації з максимальним рівнем розташовуються на зовнішній поверхні днища. Цей результат є очікуваним науковим спостереженням, який можна пояснити безпосереднім впливом інструменту на випуклу частину днища.

Додатково був встановлений напружений стан металу днища під час підсадки (рис. 4.7, третій та четвертий рядки). Напружений стан аналізувався на основі даних розподілу інтенсивності напружень та середніх напружень за поздовжнім перерізом днища. На відміну від розподілу деформацій інтенсивність напружень відрізняється місцем локалізації напружень. В даному випадку максимальна інтенсивність напружень виникає в зоні пе-

реходу сферичного днища в циліндричну частину труби (рис. 4.7, третій рядок). Це пояснюється тим, що товщина днища в 1,8...2,2 рази більша ніж товщина стінки труби, в результаті при підсадці днище пересувається вздовж осі як жорстка зона.

Середні напруження дозволять встановити рівень і знак напружень, на основі яких можна пояснити механізм зміни форми днища. Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що у зовнішніх шарах днища переважають стискаючі напруження, а у внутрішніх шарах переважають розтягуючі. Це пояснюється тим, що зовнішні шари сферичного днища під час підсадки зазнають стискання, а внутрішні шари після вирівнювання зазнають розтягування. При збільшенні ступеня підсадки рівень стискаючих напружень на зовнішній поверхні днища підвищується. Але після підсадки 15 % рівень середніх напружень перестає змінюватися. Це пояснюється утворенням увігнутості днища з боку пуансону (рис. 4.7, четвертий рядок), а відповідно рівень стискаючих напружень в цьому разі буде знижуватися.

Результати розподілу інтенсивності напружень та середніх напружень різняться у процесі підсадки кількісно та якісно різняться, що ускладнює аналіз отриманих результатів. Об'єднуючим параметром НДС є показник схеми НДС (η). Закономірність зміни цього показника в залежності від ступеня підсадки представлена на рисунку 4.8.

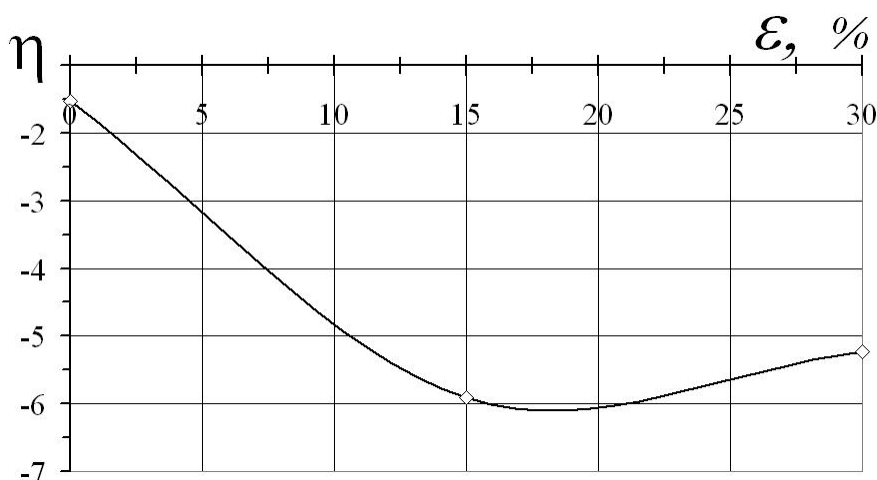


Рисунок 4.8 – Закономірність зміни показника схеми напруженого стану в залежності від ступеня підсадки

Аналіз отриманих результатів дозволив зробити висновок про те, що до ступеня підсадки 15 % рівень стискаючих напружень збільшується. При збільшенні ступеня підсадки рівень стискаючих напружень починає зменшуватись. Це пояснюється зміною форми днища. До ступеня підсадки 15 % днище має плоский торець та меншу площу контакту з пуансоном. Подальша підсадка призводить до появи увігнутої форми днища та збільшення діаметру плоскої частини днища. Увігнутий профіль днища призводить до появи розтягуючої компоненти напружень, що знижує рівень середніх напружень.

Поява розтягуючих напружень на внутрішній поверхні днища призводить до розкривання осьової воронки та зменшенні її глибини. Підсадка призводить до збільшення товщини стінки днища (рис. 4.9).

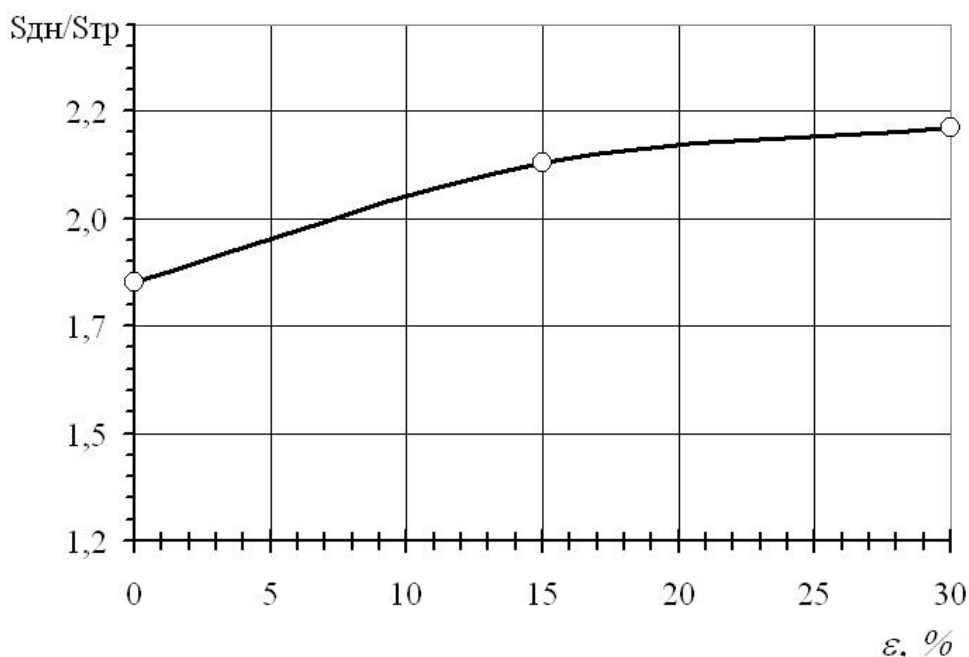


Рисунок 4.9 – Зміна відносної товщини стінки днища в залежності від ступеня підсадки

Товщина днища збільшується поступово від трубної ділянки до осьової зони. Інтенсивно збільшення товщини відбувається до ступеня під-

садки 15 %. Подальша підсадка зменшує інтенсивність набору товщини днища. Збільшення товщини днища позитивно вплине на підвищення міцності.

4.4 Енергосилові параметри при комбінуванні операцій тангенціального обкочуванні ІТ та підсадці днища

На основі проведених досліджень була обрана комбінована схема для тангенціального обкочування ІТ та підсадки днища. Встановлена схема забезпечує закриття осьового отвору днища та високий рівень стискаючих напружень для заварювання внутрішніх дефектів. Для впровадження отриманого способу виготовлення днищ необхідно встановити енергосилові параметри процесу обкочування (рис. 4.10).

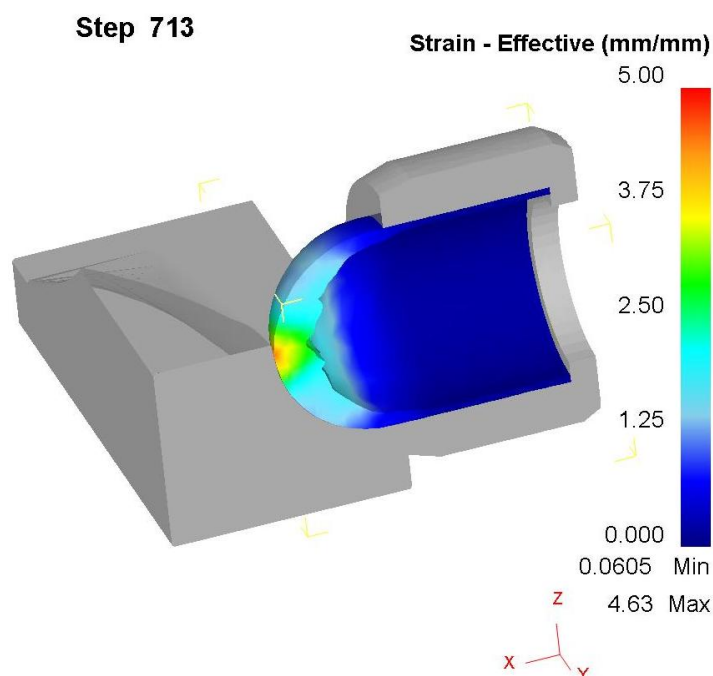


Рисунок 4.10 – 3D-модель процесу обкочування у розрізі

Базовими показниками процесу обкочування є сили, які діють на інструмент тертя для деформування для розрахунку елементів супорту верстата. Для можливості аналізу силового режиму доцільно результуючу силу розкласти на складові вздовж осей координат (див. рис. 4.10): осьова – P_X ; тангенціальна – P_Y ; радіальна P_Z . Результати зміни компонент сил у процесі обкочування в залежності від ходу представленні на рисунку 4.11.

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що осьова сила обкочування P_X (яка співпадає з віссю заготовки та відповідає за закриття отвору днища) спочатку змінюється поступово, а при оформленні сферичності днища стрімко зростає. Це пояснюється тим, що процес калібрування днища потребує значної сили, внаслідок підвищення жорсткості схеми напруженого стану, коли весь метал спрямовується на збільшення товщини днища. При цьому збільшується площа контакту заготовки з інструментом. На цьому етапі відбувається зниження радіальної сили P_Z та тангенціальної P_Y . Це пояснюється тим, що закінчується процес обтискання стінки труби в бік осі заготовки.

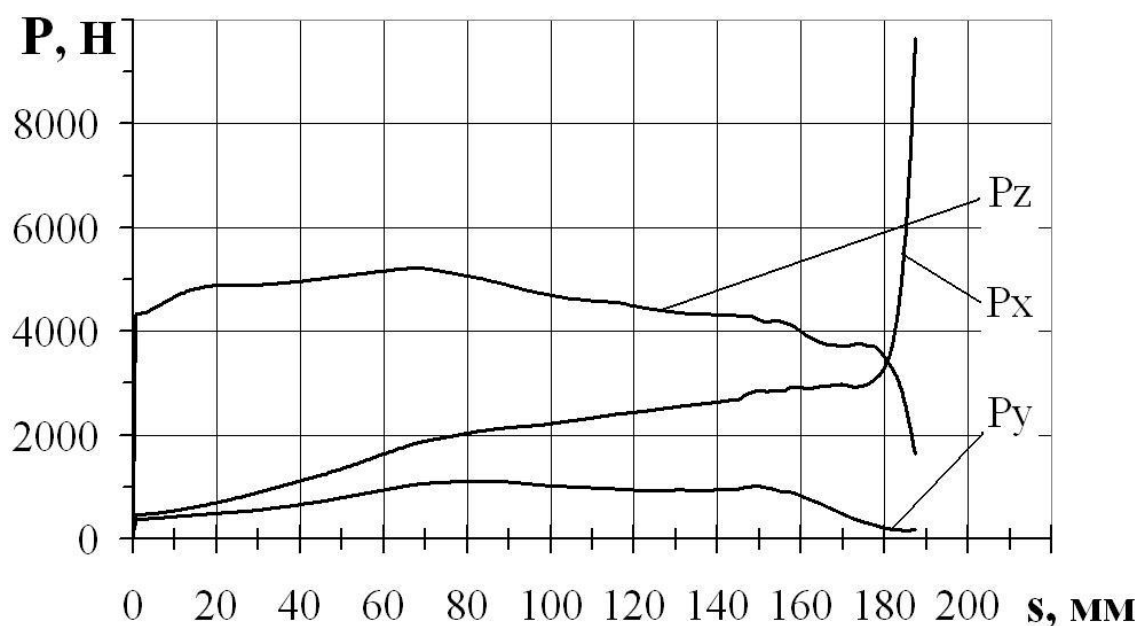


Рисунок 4.11 – Зміна складових діючої сили обкочування в залежності від ходу інструменту тертя

Сили P_Y та P_Z у процесі обкочування змінюються несуттєво. Таким чином, самим навантаженим є завершальний калібрувальний етап процесу обкочування. Зазначені сили обкочування передаються на патрон верстата. Для забезпечення запасу міцності підшипників патрону необхідно проаналізувати сили, які діють на патрон під час обкочування та підсадки (рис. 4.12).

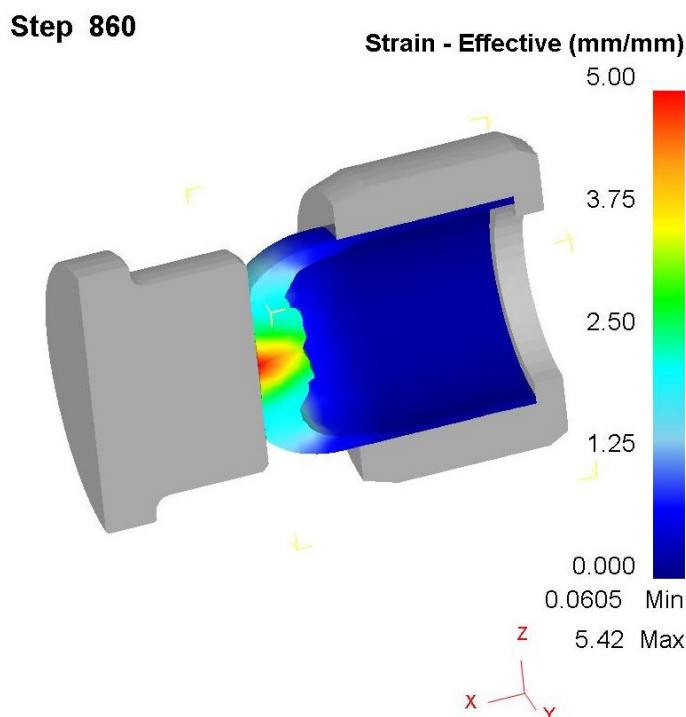


Рисунок 4.12 – 3D-модель процесу підсадки у розрізі

Результати зміни компонент сил у процесі обкочування та підсадки в залежності від ходу представлені на рисунку 4.13. Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що осьова сила P_X , яка діє на патрон верстата від процесу обкочування, постійно збільшується, ніж осьова сила ІТ. Це пояснюється тим, що результуюча сила процесу обкочування більша за осьову від дії компонент P_Y та P_Z . Тангенційна та радіальна складові сили, що діє на патрон верстата, у 40 разів менші за осьову, тому їх вплив на запас міцності незначний. Зниження осьової сили P_X відбувається наприкін-

ці обкочування, коли відбувається зниження горизонтальної та вертикальної складової сили процесу обкочування, як це було встановлено вище (див. рис. 4.11). Значний вплив на осьове навантаження патрону верстата чинить операція підсадки днища P_{nid} (див. рис. 4.13). Таким чином, операція підсадки днища потребує більшої сили, ніж операція обкочування. Це пояснюється збільшенням жорсткості схеми напруженого стану при втисканні сферичного днища, ніж його формування. Після ходу ІТ 150 мм осьова складова сили обкочування (P_x) починає знижуватись, що свідчить про появи калібрувальної стадії обкочування днища, коли відбувається оформлення сферичної зовнішньої поверхні.

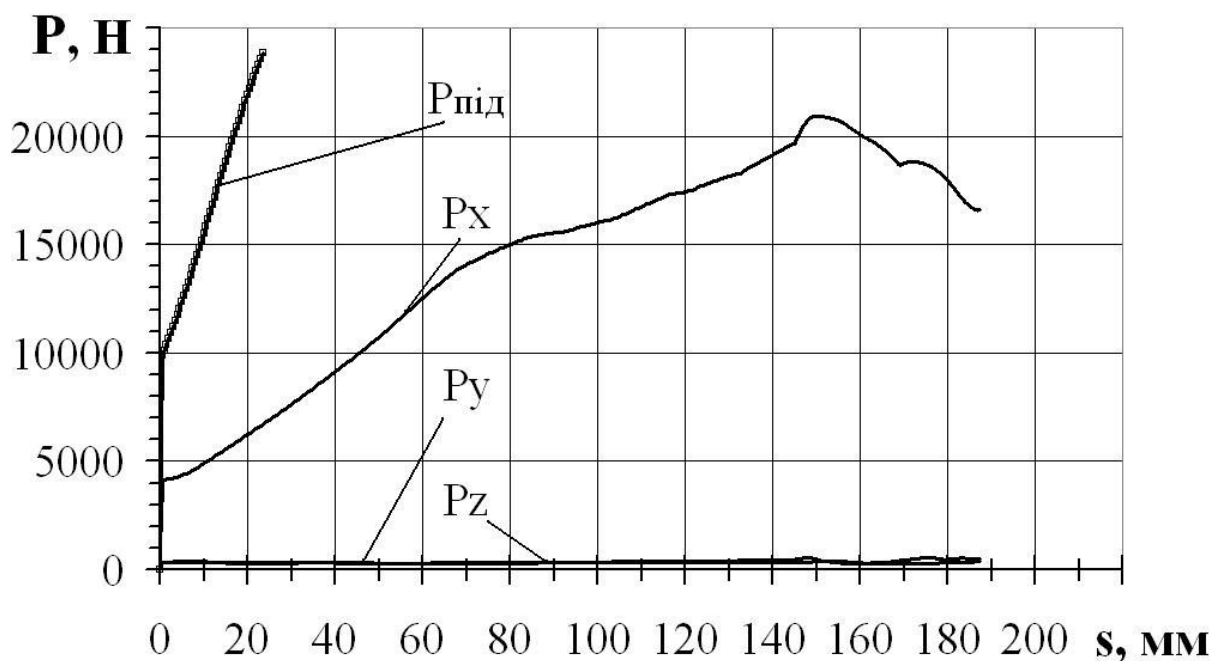


Рисунок 4.13– Зміна складових діючої сили обкочування та підсаджень на патроні верстату

Обрати модель верстата можливо за умови відомого крутного моменту для обкочування та підсадки днища. Результати зміни крутного моменту у процесі обкочування в залежності від ходу представлені на рисунку 4.14. Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що крутний

момент стрімко збільшується після ходу ІТ близько 1...2 мм. При цьому ході інструменту відбувається начало процесу обкочування. Далі закономірність зміни крутного моменту визначається зміною профілю інструмента. При ході до 20 мм він збільшується, далі відбувається його зниження та вихід на стабільний рівень до ходу 130 мм. Цей діапазон обкочування є основним для поступового перетворення циліндричної поверхні заготовки у конічний край, який після ходу 130 мм формується у сферичний. Часткове зниження крутного моменту у діапазоні ходу 20 ... 130 мм пояснюється розігріванням заготовки та відповідним зменшенням роботи деформування.

Далі відбувається зростання крутного моменту до ходу 170 мм, що пояснюється надання днищу сферичної форми. Це пояснюється додатково зростанням осьової сили P_x (див. рис. 4.11). Після калібрувальної стадії відбувається стрімке зниження сили, що свідчить про остаточне формування днища та завершення обкочування.

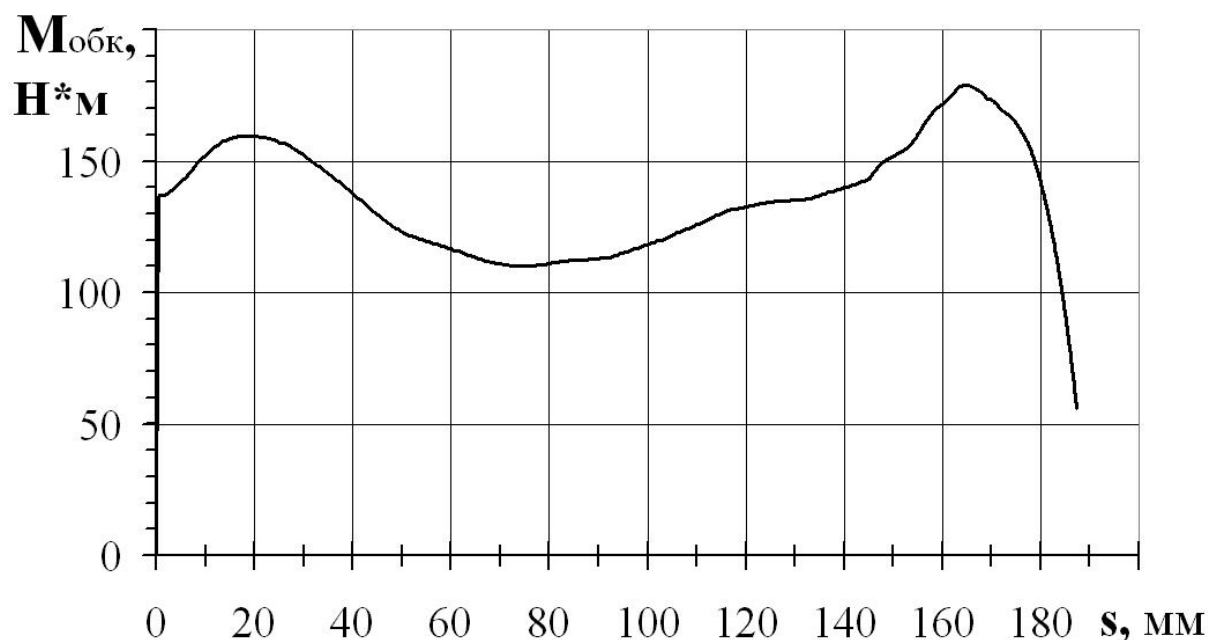


Рисунок 4.14– Крутний момент на патроні при обкочуванні днища в залежності від ходу ІТ

Підсадка днища характеризується лінійним збільшенням крутного моменту в залежності від ступеня обтискання (рис. 4.15). Встановлена закономірність аналогічна силі підсадки. Це пояснюється поступовим збільшенням площі контакту заготовки з ІТ, що призводить до підвищення крутного моменту. В цілому, величина крутного моменту підсаки нижче моменту обкочування. Це дає основу для вибору обладнання по силі обкочування.

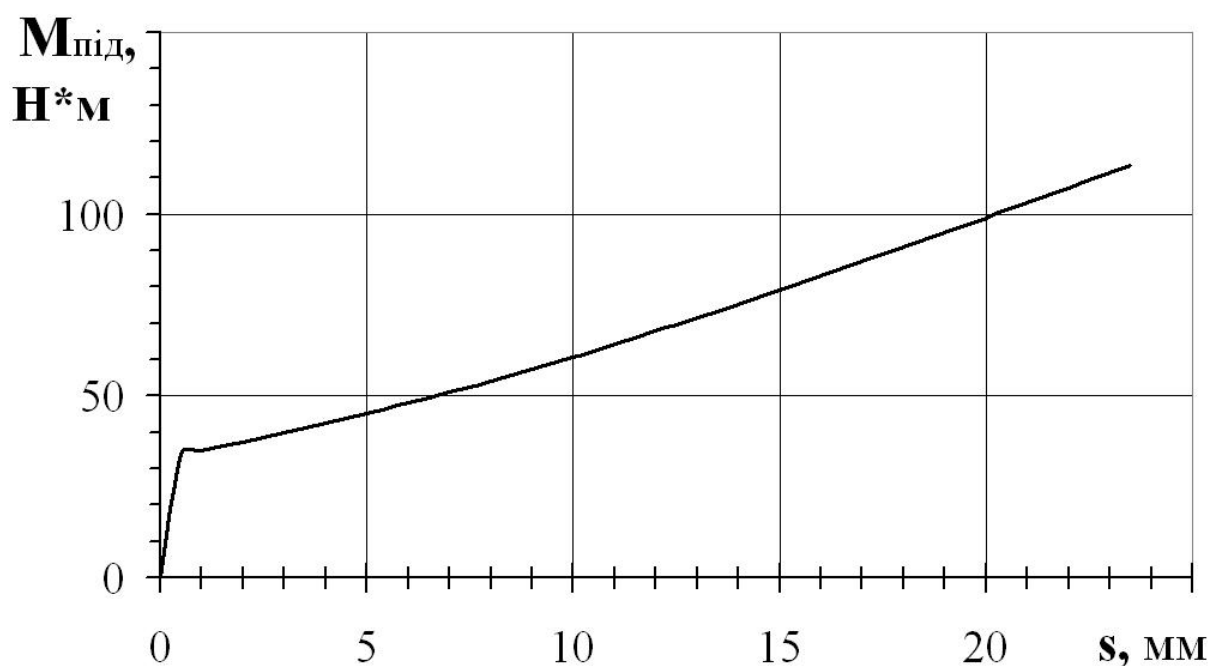


Рисунок 4.15 – Крутний момент на патроні у процесі підсадки днища в залежності від ступеня обтискання

Об'єктивним показником для оцінки ефективності нового способу деформування є робота (енергія), яка необхідна для обкочування та підсадки днища. Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що робота деформування поступово (за лінійною залежністю) збільшується у процесі обкочування до моменту калібрування днища (рис. 4.16). При калібруванні робота деформації стрімко зростає, що співпадає з даними осьової сили P_x при обкочуванні (див. рис. 4.11). Це пояснюється тим, що збільшення сили

при однаковому ході призводить до збільшення роботи (енергії) для обкочування.

Однак більша робота витрачається на підсадження днища (див. рис. 4.16). Це пояснюється значною силою, яка потрібна для підсадки (див. рис. 4.13). Робота на підсадку 2 ... 2,5 рази вища, ніж на обкочування. Додатково значне збільшення роботи на підсадку можна пояснити збільшенням швидкості подачі інструменту у 2 рази. Таким чином операція підсадки є більш енергоємною, за якою і слід розраховувати витрати електроенергії для обкочування днищ. Необхідно відмітити, що частина цієї енергії йде на підтримання раціональної температури деформування за рахунок розігріву від контакту заготовки з інструментом тертя.

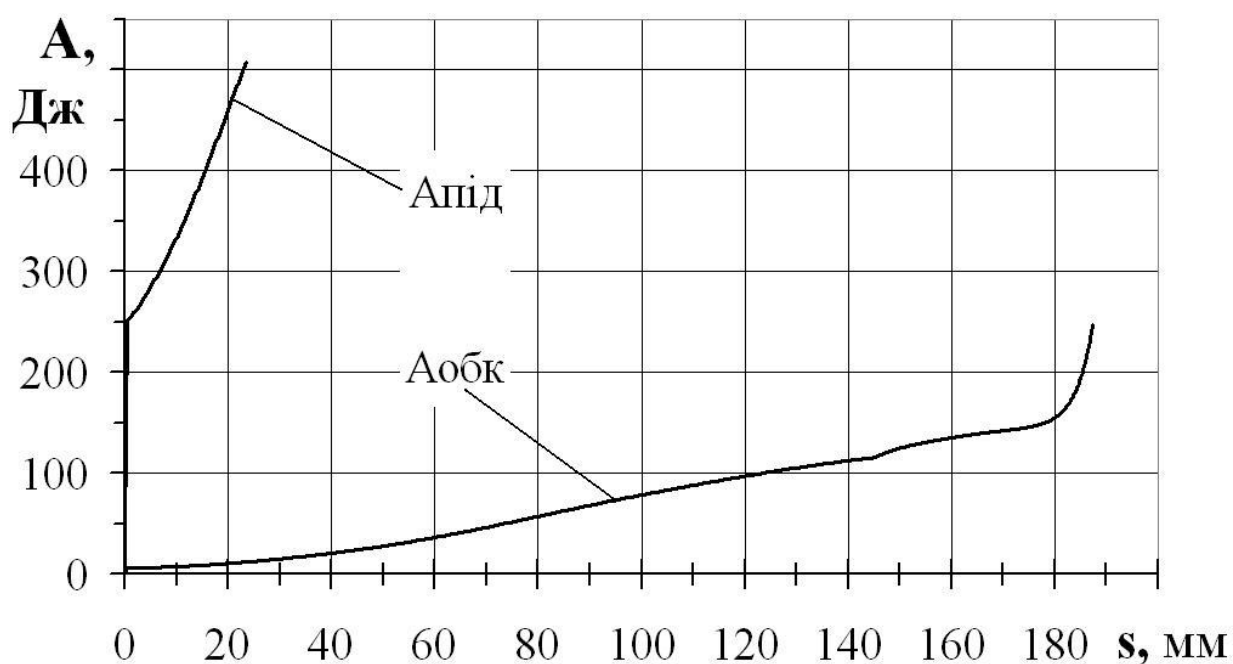


Рисунок 4.16 – Робота при обкочуванні та підсадці днища

Важливим параметром для обрання потрібного обладнання (верстата для обкочування) є данні щодо потужності процесу. Потужність процесу деформування буде визначати модель електродвигуна. На основі даних роботи (див. рис. 4.16) та часу деформування визначалася потужність, яка необхідна для реалізації процесу. Графічна залежність потужності обкочу-

вання та підсадки в залежності від ходу деформувального ІТ представлена на рисунку 4.17. Потужність установки повинна перевищувати не тільки енергію на деформування, але й витрати на тертя заготовки та інструменту. Отримані результати дозволили встановити, що максимальна потужність потрібна на етапі підсадки днища. На обкочування потрібна тільки 75 % потужності підсадки. Таким чином потужність електродвигуна необхідно визначати за операцією підсадки, а не обкочування. Потужність обкочування на ділянці формування днища поступово підвищується.

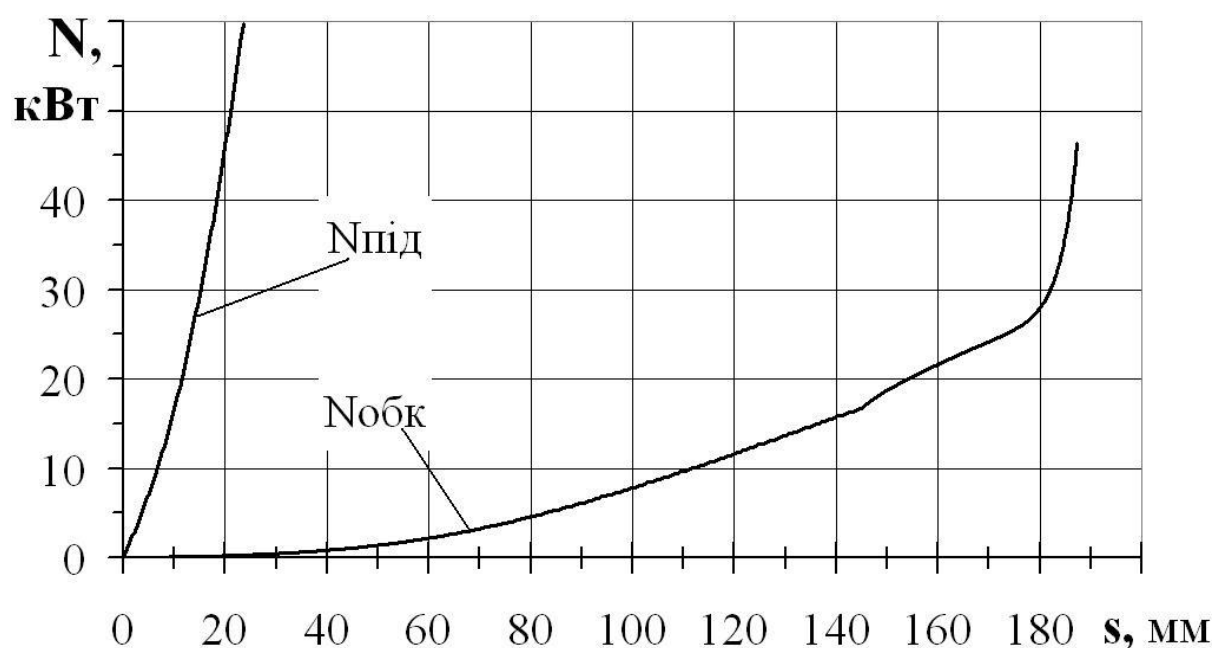


Рисунок 4.17 – Залежність потужності обкочування та підсадки в залежності від ходу деформуючого ІТ

Стрімкий зріст потужності відповідає процесу калібрування днища, коли стрімко збільшується сила (див. рис. 4.11) і робота деформування (див. рис. 4.16). Цей зріст потужності пояснюється зростанням витрат енергії при калібруванні, коли збільшується площа контакту заготовки та інструменту.

Висновки за розділом 4

Моделювання МСЕ процесів тангенціального обкочування та підсадки ІТ пустотілих заготовок дозволило встановити важливі науково-практичні результати:

1. Ефективна початкова гомологічна температура підігрівання заготовок перед обкочуванням повинна становити 0,8. Ця температура буде сприяти заварюванню отвору днища та не буде призводити до перегрівання та перепалення металу заготовки.

2. Відносну подачу заготовки в ІТ перед обкочування (l/D) слід призначати в діапазоні 0,9...0,95, що буде сприяти закриттю та заварюванню отвору днища.

3. Відносну товщину стінки труби (D/s) доцільно обирати в діапазоні 15...20 для виготовлення днищ з меншими витратами металу. Більша товщина стінки призведе до значного збільшення товщини днища та невикористаних витрат металу.

4. Температура після обкочування та підсадки розподіляється нерівномірно: максимальна температура заготовки розташовується в центральній осевій зоні днища, а мінімальна температуру – у місці її фіксації патроном верстата. При цьому градієнт температур не виходить за межі температурного інтервалу гарячої обробки тиском.

5. Зі збільшенням ступеня підсадки зона пластичних деформацій збільшується. Максимальна інтенсивність деформацій виникає в зоні переходу сферичного днища в циліндричну частину труби.

6. При підсадці у зовнішніх шарах днища переважають стискаючі напруження, а у внутрішніх шарах – розтягуючі. При ступені підсадки до 15 % рівень стискаючих напружень на зовнішній поверхні днища підвищується, а при збільшенні – починає зменшуватися. До ступеня підсадки 15 % днище має плоский торець, подальше підсадження призводить до по-

яви увігнутої форми днища, що призводить до появи розтягуючої компоненти напружень на внутрішній поверхні. Це призводить до розкривання осьової лунки днища та зменшені її глибини.

7. Підсадка призводить до збільшення товщини стінки днища. Інтенсивно збільшення товщини відбувається до ступеня підсадки 15 %. Подальша підсадка зменшує інтенсивність набору товщини днища.

8. Осьова сила обкочування змінюється поступово, а при оформленні сферичності днища стрімко зростає, при цьому відбувається зниження радіальної та тангенціальної компонент сили обкочування.

9. Крутний момент стрімко збільшується з початку процесу обкочування. Після розігрівання заготовки відбувається його зниження та вихід на стабільний рівень. Калібрувальна стадія обкочування днища характеризується стрімким зниження крутного моменту. Підсадка днища характеризується лінійним збільшенням крутного моменту при підвищенні ступеня обтискання. Величина крутного моменту підсади нижче моменту обкочування.

10. Робота деформування поступово, за лінійною залежністю збільшується у процесі обкочування. На завершальній стадії калібрування днища робота деформування стрімко зростає. Робота на підсадку у 2,0 ... 2,5 рази вища, ніж на обкочування.

11. Зі збільшенням ступеня деформації потужність процесу обкочування на ділянці формування сферичного днища підвищується. Стрімкий зріст потужності відповідає процесу калібрування днища. Максимальна потужність потрібна на етапі підсадки днища. Потужність підсадки на 25 % більша ніж обкочування.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОБКОЧУВАННЯ ТА ПІДСАДКИ ДНИЩ ІНСТРУМЕНТОМ ТЕРТЯ

5.1 Перевірка та апробація теоретичних результатів

На основі скінченно-елементного моделювання процесів тангенціального обкочування ІТ встановлено раціональні параметри заготовок для бездефектного виготовлення днищ у трубних заготовках. Для розроблення технологічного процесу та можливості впровадження отриманих результатів необхідно провести експериментальну верифікацію в умовах, наближених до промислових. Методику проведення експериментальних досліджень наведено у п. 2.3. Діаметр труби D становив 90 мм, товщина стінки труби s дорівнювала 4,5 мм, абсолютна подача заготовки в інструмент l складала 82 мм, а температура нагрівання труби 1200 °С. Перевірці підлягали такі встановлені технологічні рекомендації у загальному вигляді:

- відносна товщина стінки труби для виготовлення бездефектного днища $D/s = 20$;
- відносна подача заготовки в ІТ $l/D = 0,925$;
- гомологічна температура $0,8T_{пл}$;
- ступінь деформації підсадки 15 % та 30 %.

Зазначені параметри входять до рекомендованих інтервалів для обкочування та підсадки трубних заготовок (див. п. 4.2 – 4.4).

Процес індукційного нагрівання трубної заготовки токами високої частоти (2,4 кГц) наведено на рисунку 5.1. Тривалість нагрівання складала 7 хв. Інструмент для обкочування виготовлявся литтям з високолегованого сплаву. Матеріал труби – сталь 34ХН.

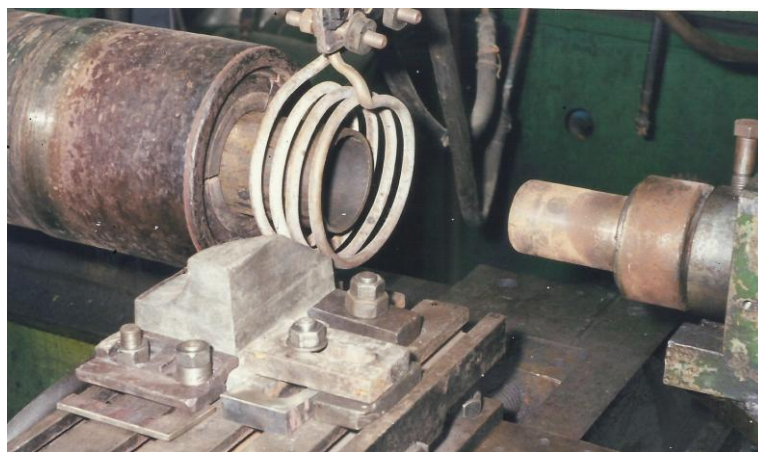


Рисунок 5.1 – Індукційне нагрівання трубної заготовки перед обкочуванням ІТ

Як було встановлено за результатами теоретичного дослідження (див. розділи 3, 4), для гарантованого заварювання осьового дефекту днища після обкочування необхідно провести осьову підсадку (рис. 5.2), щоб підвищити рівень стискних напружень у зоні змикання стінок труби та сприяти заварюванню отвору. Доштампування проводилося інструментом з плоским торцем, який був закріплений на пінолі задньої бабки верстата при температурі заготовки близько $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, яку досягає заготовка після обкочування ІТ.

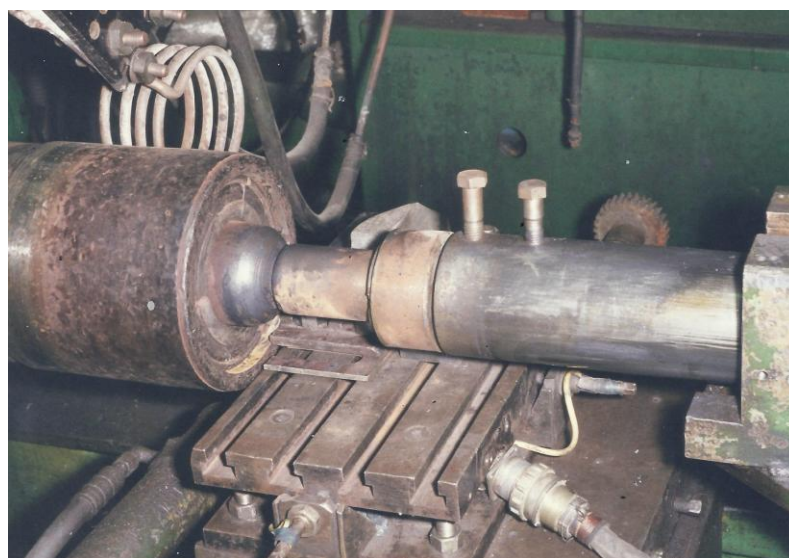


Рисунок 5.2 – Підсадка сферичного днища після обкочування

Обкочуванню піддавалися пустотілі заготовки зі сферичним днищем з різними ступенями підсадки. Заготовки після обкочування та охолодження наведено на рисунку 5.3. З обкочених заготовок вирізалися макротемплети, з яких виготовлялися макрошліфи (рис. 5.4).



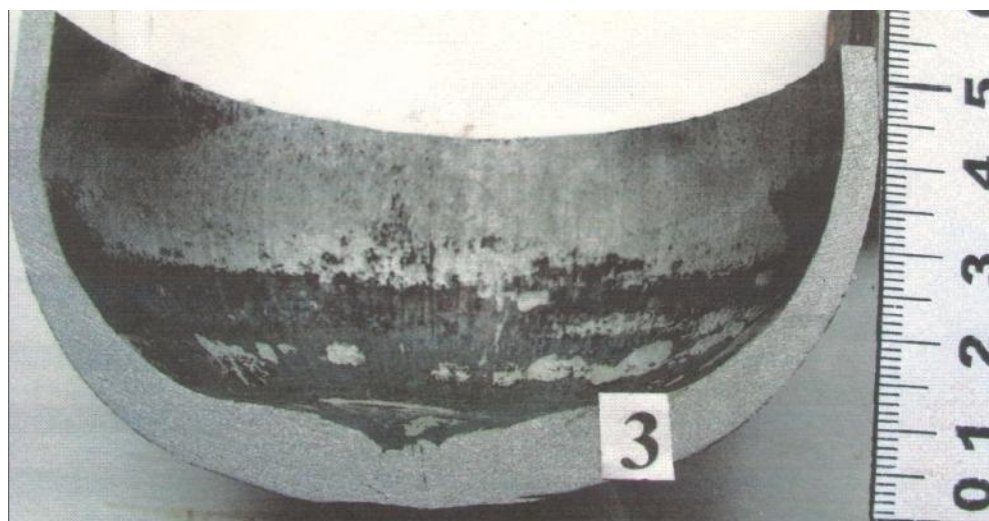
Рисунок 5.3 – Заготовки після обкочування ІТ

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що операція підсадки значно впливає на товщину стінки в осьовій зоні днища.

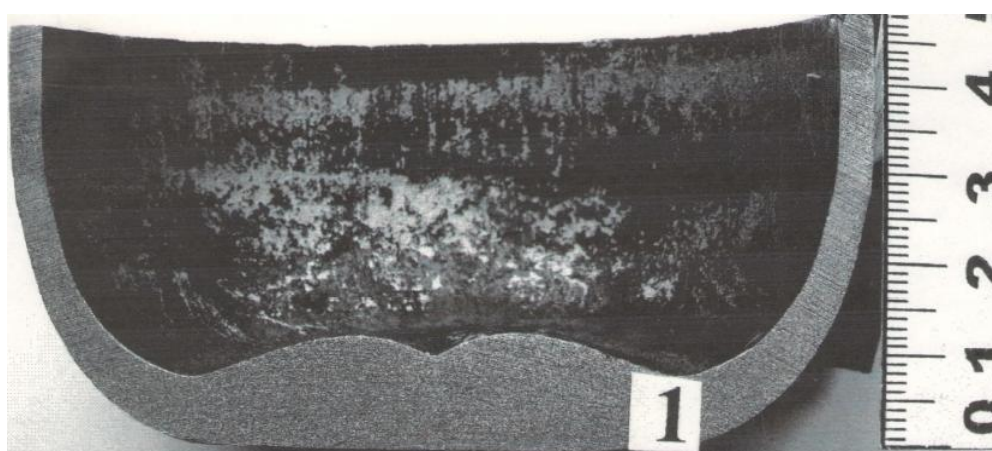
Мінімальну товщину стінки було отримано для днища, яке не зазнало підсадки.

Чим більший ступінь підсадки, тим більша товщина днища в осьовій зоні, що можна пояснити набиранням металу при зменшенні висоти днища. При підсаджуванні відбувається також змінення форми внутрішньої поверхні днища, що призводить до збільшення витрат металу.

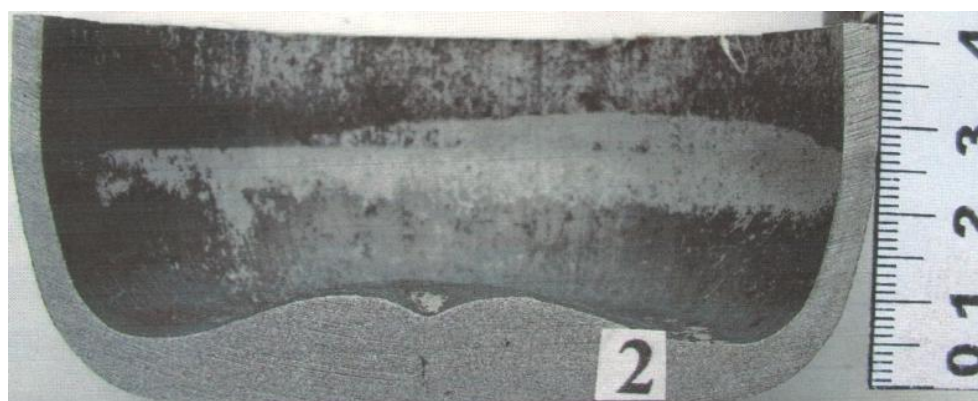
При цьому глибина воронкоподібної внутрішньої осьової зони днища зберігається, але діаметр цієї воронки збільшується при збільшенні ступеня підсадки. Основним показником для вибору раціонального способу обкочування є товщина осьової зони днища, яка повинна знаходитись в діапазоні $2 \dots 3 s$, де s – товщина стінки труби.



а)



б)



в)

а – без підсадки; б – після підсадки на 15 %;

в – після підсадки на 30 %

Рисунок 5.4 – Макрошліфи днищ з різним ступенем підсадки

Товщина сферичного днища (див. рис. 5.4, а) становить 6,2 мм. Товщина днища після підсадки на 15 % становить 9,8 мм, а після підсадки на 30 % – 8,8 (див. рис. 5.4, б і 5.4, в відповідно). Більш універсальними будуть результати, наведені у відносному вигляді. Отриману товщину днища доцільно віднести до товщини стінки труби для кількісного оцінювання набору металу днища, що буде впливати на його міцність. Графічну закономірність відношення товщини днища до товщини стінки труби (ступінь набору стінки днища) наведено на рисунку 5.5. На основі аналізу графічної закономірності можна зробити висновок, що максимальне збільшення товщини днища відбувається при підсаджуванні в діапазоні 15...20 %.

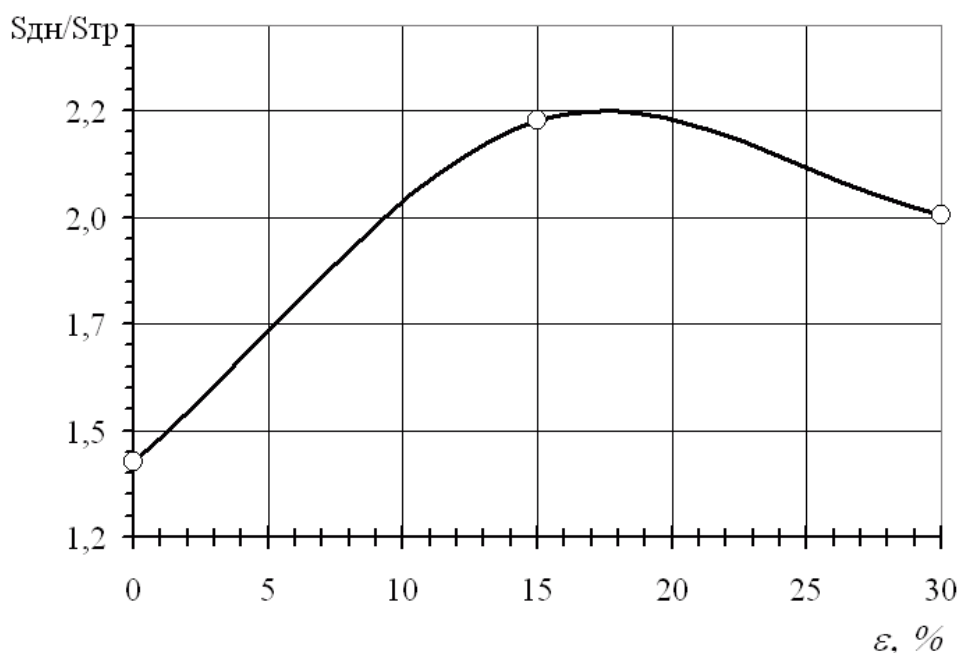


Рисунок 5.5 – Закономірність збільшення відносної товщини днища при різних ступенях підсадки

Другим важливим показником якості днища є його суцільність. Суцільність металу можна встановити на основі металографічних досліджень: аналізу макро- та мікроструктури в осьовій зоні днища. Для цього розрізані днища шліфувалися та з отриманих темплетів готувався макрошліф (див. рис. 5.4). При незначному збільшенні зображення (у 2 рази) мож-

на чітко виділити залишки осьових дефектів днища. На рисунку 5.6 ці залишки виділені червоним кольором.



а)



б)



в)

Рисунок 5.6 – Залишки осьових дефектів днищ з різним ступенем підсадки: а – без підсадки; б – після підсадки на 15 %; в – після підсадки на 30 %

На основі макроструктурного аналізу форми та розташування осьових дефектів днищ з різним ступенем підсадки було встановлено, що максимальний дефект (відносно товщини стінки днища) розташовується у днищі без підсадки (рис. 5.6, а).

Довжина дефекту складає 4,2 мм, що становить $\frac{2}{3}$ від товщини стінки днища. Крім цього, розташування дефекту найнебезпечніше – вісь дефекту збігається з віссю балона. Таке розташування дефекту призведе до його збільшення при збільшенні тиску та появі пружної деформації стінок

у балоні. Дефект виходить на внутрішню поверхню днища, що буде знижувати герметичність балона. Також було встановлено макродефекти, які розташовані вбік від осьової зони. Цей дефект можна пояснити утворенням складок при обкочуванні за рахунок набирання металу в осьовій зоні [150].

Підсадка днища на 15 % змінює форму, розміри та розташування внутрішніх дефектів (див. рис. 5.6, б). При двократному збільшенні візуально складно виявити дефекти, що розташовані вздовж осі днища. Але чітко видно дефект, який розташований поперек осі балона. Цей дефект розташовується вздовж волокна структури, більше того, він локалізується ближче до зовнішньої стінки. Таке розташування дефекту забезпечує достатню товщину днища, щоб гарантувати міцність і герметичність його осьової зони [29]. Дефекти з боку внутрішньої поверхні днища макроструктурним аналізом встановити складно.

Збільшення ступеня підсадки (рис. 5.6, в) призводить до втягування випуклих поверхневих дефектів, які повторювали форму сферичного днища (див. рис. 5.6, б), за рахунок чого вони стали розташовуватися уздовж осі, що призводить до глибокого їх залягання та зменшення товщини днища зі щільною будовою. Попередній макроструктурний аналіз осьових дефектів днищ з різним ступенем підсадки дозволив встановити, що максимальна товщина стінки днища з урахуванням осьових дефектів набирається після підсадки на 15 %.

Остаточний висновок про якість осьової зони днища можна встановити за результатами мікроструктурних досліджень. Вирізані темплети після полірування та травлення досліджувалися на оптичному мікроскопі зі збільшенням у 50 разів. Результати мікроструктури для сферичного днища з розташуванням внутрішніх дефектів наведено на рисунку 5.7.

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що в структурі металу присутні оксидні плівки, які не сприяли повному заварюванню осьового отвору днища. Чітко розрізняються два продовгуваті включення (плівки), які не перетинаються, а розділені щільним шаром металу.



Рисунок 5.7 – Мікроструктура осьових дефектів сферичного днища без підсадки

Макроструктурне дослідження дозволило встановити, що осьові дефекти днища після підсадки на 15 % розташовуються перпендикулярно до осі днища (див. рис. 5.6, б). При збільшенні розмірів цих дефектів встановлено, що дефект має опуклу форму (рис. 5.8). Щільні шари металу поділені тонкою оксидною плівкою, яка майже не переривається на усій своїй довжині. Пояснити утворювану опуклу форму дефекту можна тим, що незачищені поверхні труби після обкочування сферичних днищ призвели до

формування неметалевих включень, які повторювали форму днища. Незначна підсадка призвела до того, що ці включення були заштамповані в стінку днища. Мала деформація підсадки не спричинила змінення форми неметалевих включень. Дефектів з боку внутрішньої поверхні днища при збільшенні не виявлено.



Рисунок 5.8 – Мікроструктура осевих дефектів днища, підсаженого після обкочування на 15 %

Збільшення підсадки до 30 % призводить до збільшення розмірів неметалевих включень (рис. 5.9). Ці включення вже мають форму не тонкої плівки, як у попередніх випадках, а великих включень з сіткою тонких оксидних плівок, які розташовані уздовж та поперек осі днища.



Рисунок 5.9 – Мікроструктура осьових дефектів днища, підсаженого на 30 %

Збільшення розмірів цих дефектів стало причиною появи розтягувальних напружень, які виникли при збільшенні діаметра воронки осьового дефекту з внутрішнього боку днища при збільшених ступенях підсадки [212]. У результаті можна стверджувати, що ступінь підсадки сферичного днища понад 15 % призводить до зменшення глибини воронки осьової зони. Але при цьому збільшується її діаметр, що призводить до появи

розтягувальної радіальної компоненти напружень і, як наслідок, розтягання неметалевих включень.

Перевірці слід піддати результати теоретичного дослідження енергосилових параметрів процесу обкочування та підсадки ІТ. Для цього на супорті верстату з месдоз були зняті данні осьової сили процесу обкочування заготовок тих же розмірів, що були встановлені як ефективні при теоретичному дослідженні. На першому етапі порівнюється сила обкочування (рис. 5.10). Якісно теоретична та експериментальна залежність зміни осьової сили обкочування співпадають. Обидві криві збільшуються з ростом ступеня обкочування заготовки майже за лінійною закономірністю. Криві мають різкий зріст сили на кінцевій стадії обкочування, коли відбувається калібрування та остаточне формування сферичного днища. Але експериментальні данні дають приблизно на 20 % значення сили нижче, ніж МСЕ. Таким чином отримані при теоретичному дослідженні результати з похибкою 20 % відповідають експериментальним даним. Отримана різниця пояснюється додатковим розігріванням інструменту від контакту з заготовкою, що буде сприяти зменшенню тепловідводу на інструмент.

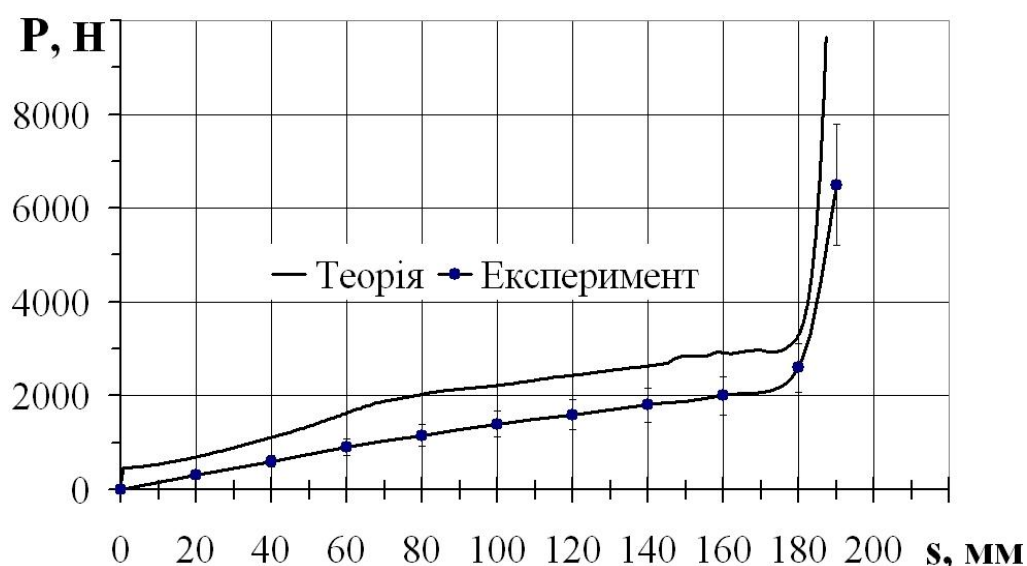


Рисунок 5.10 – Змінення осьової компоненти сили обкочування сферичного днища по ходу руху ІТ

В результаті температура заготовки буде підвищуватися, що призведе до зниження опору деформації і сили обкочування.

На другому етапі необхідно перевірити та порівняти результати теоретичного та експериментального дослідження сили підсадки сферичного днища ІТ (рис. 5.11). Отримані результати також якісно співпадають, що свідчить про врахування при теоретичному дослідженні основних факторів, які впливають на процес. Кількісна різниця між результатами складає близько 20 %. На відміну від теоретичного дослідження експериментальне проводилося до ступеня деформації 40 %. Обидві закономірності мають лінійну залежність. Експериментальні результати сили підсадки менші за теоретичні. Це дає запас сили деформування, якщо її встановлювати за результатами теоретичних досліджень. Підтверджено, що максимальна сила деформування виникає на операції підсадки, а не обкочування. Це пояснюється збільшенням ступеня деформації металу, а також підвищенням жорсткості схеми напруженого стану при підсадці сферичного днища, що буде призводити до заварювання внутрішніх дефектів днища.

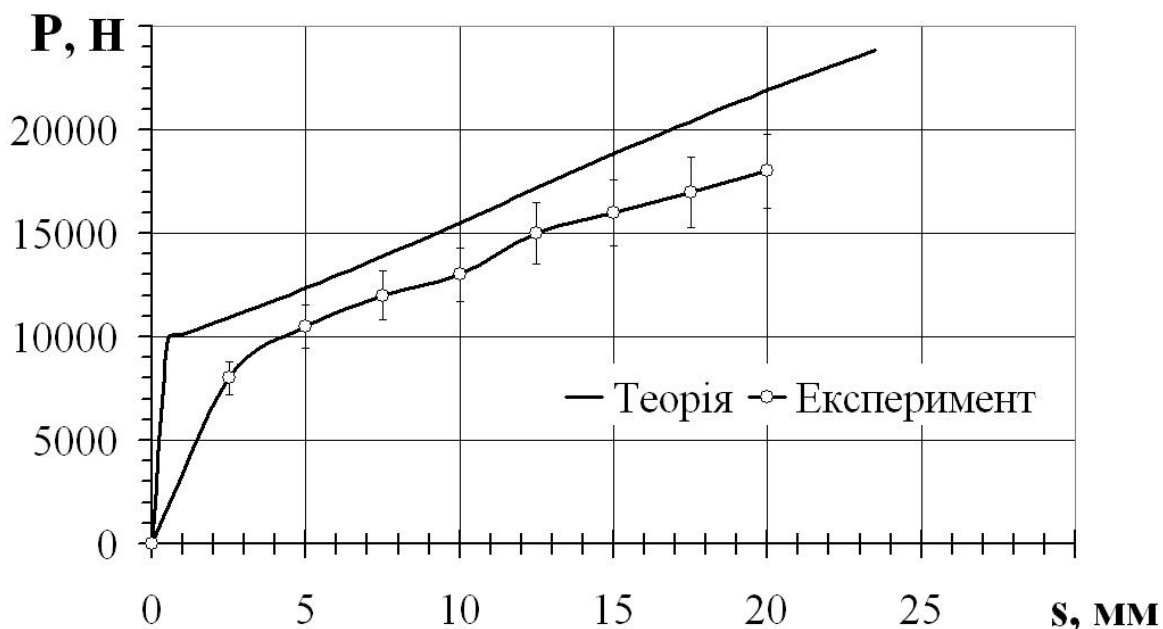


Рисунок 5.11 – Змінення сили підсадки сферичного днища після обкочування

Таким чином можна вважати, що результати з силових параметрів, які були встановлені МСЕ, мають високу достовірність, тобто результати теоретичних досліджень підтверджуються експериментом.

Другим енергосиловим параметром, який легко визначати експериментальним методом, є визначення потужності процесу обкочування (рис. 5.12). Потужність процесу легко встановлюється через витрати електроенергії на процес деформування обкочуванням.

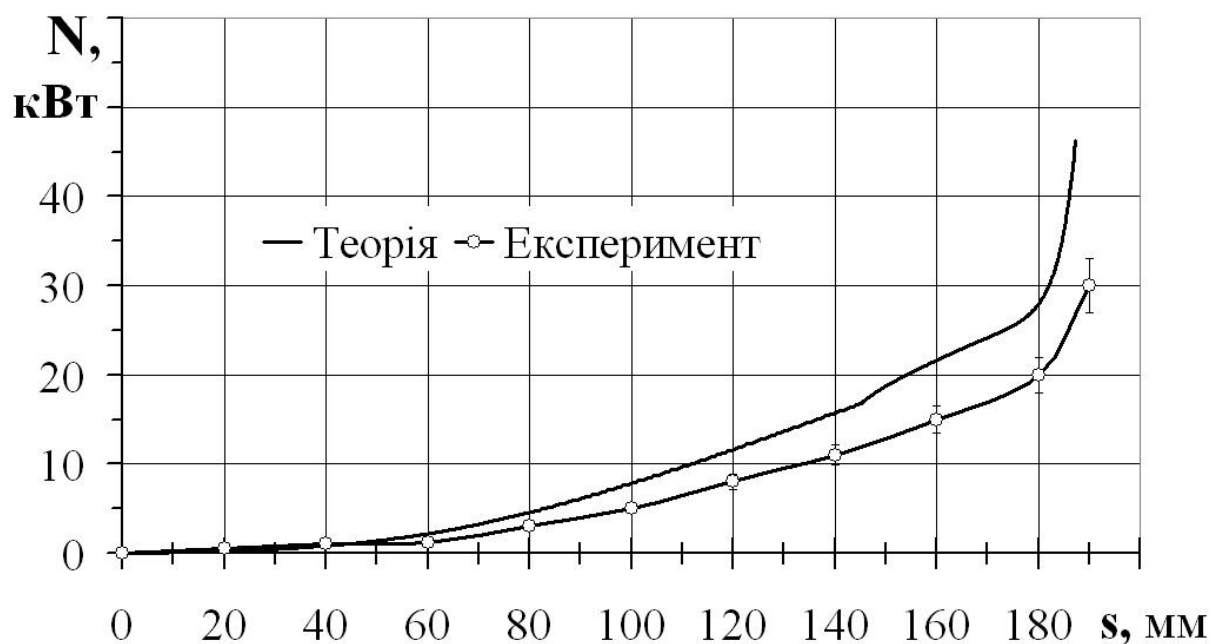


Рисунок 5.12 – Потужність процесу обкочування сферичного днища по ходу руху IT

Для цього при обкочуванні та підсадці реєструвалися сила струму та напруження, яке подається на електродвигун. Врахувавши витрати потужності через ККД електродвигуна та механічного приводу патрону верстата була встановлена потужність процесу деформування.

Аналіз отриманих результатів дозволив зробити висновок, що процес обкочування призводить до поступового збільшення потужності, особливо на завершальному етапі формуванні днища та його калібруванні. Результа-

ти теоретичного та експериментального досліджень якісно співпадають, різниця в середньому становить близько 15 %.

Як було встановлено у четвертому розділі, потужність підсадки перевищує потужність обкочування. Ці результати підтверджені експериментально (рис. 5.13). Хоча експериментальні данні також дають на 15 ... 20 % нижчі значення потужності, ніж МСЕ. Отримані результати можна апроксимувати лінійною залежністю потужності підсадки від ступеня деформації. Це пояснюється збільшенням площі контакту заготовки з інструментом при збільшенні ступеня деформації у процесі підсадки.

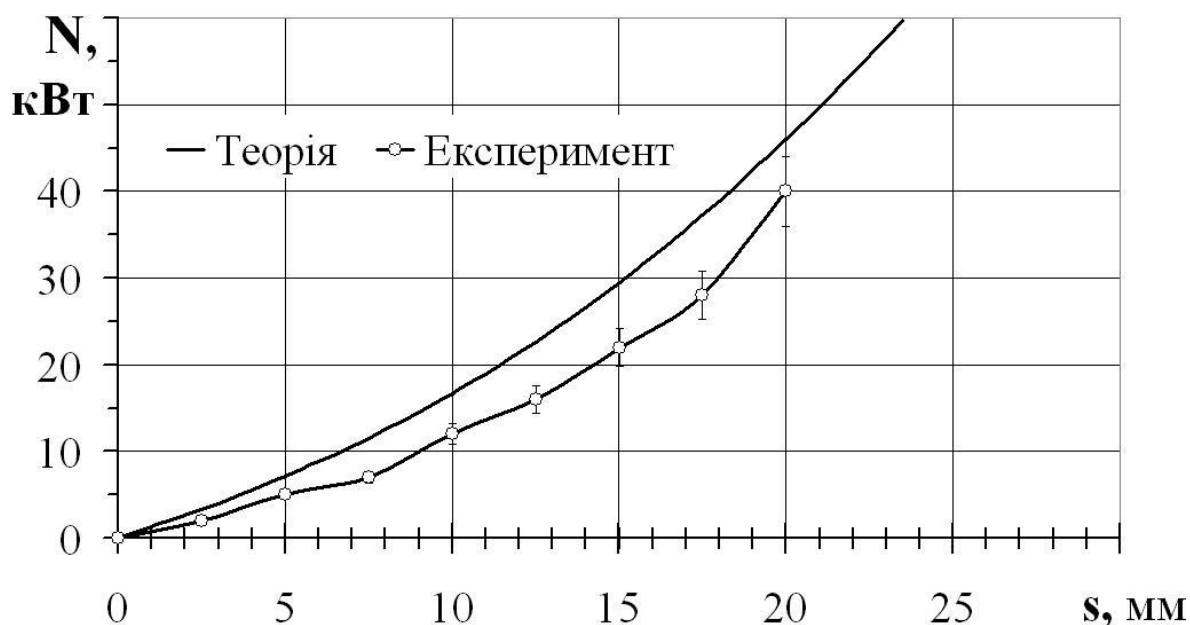


Рисунок 5.13 – Потужність процесу підсадки сферичного днища після обкочування

Можна зробити висновок, що результати з енергосилових параметрів процесів обкочування та підсадки сферичних днищ, які були встановлені МСЕ, мають високу достовірність тож результати теоретичних досліджень підтверджуються експериментом. Це дає основу для ствердження, що результати, які були встановлені у четвертому розділі можуть використовуватися в якості рекомендацій для проектування нових процесів обкочування та підсадки сферичних днищ.

5.2 Розроблення рекомендацій та методики для проектування технологічного процесу тангенціального обкочування та підсадки ІТ

5.2.1 Практичні рекомендації для реалізації процесу обкочування та підсадки днищ

Для виготовлення днищ на балонах з заданим діаметром D та товщиною стінки S технологічні операції будуть складатися з таких переходів: нарізати труби на штучні заготовки, нагріти індукційним способом кінці труб на довжині $0,9 \dots 1,0$ від діаметра труби до гомологічної температури $0,8$. Відносна подача заготовки в ІТ перед обкочуванням (l/D) повинна становити $0,9 \dots 0,95$ від діаметра труби для можливості повного закриття осьового отвору днища [213]. Відносна товщина стінки труби (D/s) повинна знаходитись у діапазоні $15 \dots 20$. Деформування труб проводять на машині для обкочування з поворотним супортом при такому режимі: частота обертання шпинделя 1000 об / хв. Після формування сферичного днища провести підсадку на $15 \dots 20$ %. Після обкочування та підсадки необхідно проводити контроль якості заварювання стінок отвору днища оглядом гарячих обкатаних заготовок зсередини, а також періодичний контроль на базі металографічних досліджень стиків розрізаних днищ. Після обкочування необхідно проводити режим термічного оброблення – нормалізацію днищ для зняття внутрішніх напружень [214]. Температура нагрівання під нормалізацію становить $Ac3+(20 \dots 40)$ °C з витримкою 40 хв і подальшим охолодженням на спокійному повітрі. Після нормалізації необхідно провести загартування з відпусканням після оброблення різанням і огляду днищ зсередини. Режим загартування – нагрівання до температури $Ac3+(20 \dots 40)$ °C з охолодженням у воді. Відпускання не менш ніж через 60 хв після загартування трубних заготовок. Температура відпускання повинна становити $650 \dots 700$ °C, заготовки повинні відпускатися у вертикальному положенні. Охолодження після відпускання – на повітрі. Після те-

рмічної обробки визначається твердість металу за Бринелем і порівнюється з заданою твердістю металу (діаметр відбитка 3,4...3,8 мм). Після цього оглядають днища із внутрішнім підсвічуванням, заповнюють їх водою, вимірюють фактичну ємність, таврують дані про об'єм у паспорті. Остаточними є випробування заготовок на міцність гідравлічним тиском, продування стисненим повітрям, вибивання окалини та внутрішній огляд суцільності днищ.

У НДІ «УкрНДІМеталургмаш» та на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ) апробовано та впроваджено новий технологічний процес тангенційного обкочування днищ із застосуванням підсадки сферичного днища (Додаток Г). Виготовлені вироби відповідали технічним умовам замовника. Для нових технологічних процесів обкочування було підвищено якість осьової зони днища. Отримані результати металографічних досліджень підтверджують високу ефективність схеми обкочування днищ з підсадкою на заварювання внутрішніх дефектів. Менше 6 % отриманих днищ перевищують вимоги стандарту за розмірами внутрішніх дефектів. Таким чином, результати металографічних досліджень на натурних виробах підтверджують результати теоретичного дослідження про вплив підсадки сферичного днища на підпір в осьовій зоні. Отримані результати підтверджують вплив підсадки обкоченої заготовки на підвищення рівня стискних напружень в осьовій зоні днища і заварювання осьових дефектів. Нові технологічні процеси обкочування підвищили якість продукції, що випускається, за рахунок підвищення щільності металу осьової зони днища.

5.2.2 Розробка методики проектування процесу обкочування днищ

Діаметр труби для виготовлення днищ повинен відповідати зовнішньому діаметру балона. Для заданої труби необхідно провести такі технологічні операції:

1) Розрізати труби на штучні заготовки довжиною, яка буде забезпечувати заданий об'єм балона, з урахуванням того, що довжина труби, яка буде обкочуватися, повинна становити $0,925$ діаметра балона. Устаткування – трубовідрізний верстат.

2) Нагрівання вільної частини труби, що буде обкочуватися, кінців труб на довжину $0,925D + 100$ мм до гомологічної температури $0,8$ (для конструкційних сталей це близько 1200°C) індукційним способом. Вимірювання температури – цифровий пірометр.

3) Тангенціальне обкочування трубної заготовки з подачею $0,925D$ в ІТ. Механічні режимі обкочування: частота обертання заготовки – 1000 об/хв, подача інструменту – $0,5$ мм/с. Обладнання – машина для обкочування потужністю 45 кВт.

4) Термообробка:

а) нормалізація готових днищ для зняття залишкових напружень після обкочування. Нагрівання до $880 \pm 15^{\circ}\text{C}$ з витримкою 30 хв з подальшим охолодженням на спокійному повітрі. Обладнання – камерна піч;

б) гартування з відпусканням після механічної обробки і контролю днища. Нагрівання в камерній печі до $880 \pm 15^{\circ}\text{C}$ протягом 30 хв з загартуванням у воді;

в) відпускання після загартування балонів при температурі $650 \dots 700^{\circ}\text{C}$. Нагрівання заготовок до температури $558 \dots 630^{\circ}\text{C}$ з витримкою $30 \dots 50$ хв. Охолодження після відпускання на спокійному повітрі. Обладнання – вертикальні прохідні електропечі.

5) Вимірювання твердості за Бринелем. Візуальний контроль, зачищення поверхневих дефектів. Обладнання – прес Бринеля.

б) Контроль днищ балонів з внутрішнім підсвічуванням.

7) Гідравлічний контроль днищ водою, точне вимірювання об'єму, таврування. Тиск при гідровипробуванні повинен становити $1,5$ робочого тиску [154]. Відбраковуються балони з порушенням герметичності. Обладнання – гідравлічний прес, мультиплікатор гідравлічний, волюметр.

- 8) Пневматичний контроль балонів стисненим повітрям.
- 9) Очищення від окалини. Обладнання – піскоструменний апарат.

5.2.3 Проектування ІТ для тангенціального обкочування сферичних днищ на трубних заготовках

Для проектування інструменту обкочування сферичних днищ на кінцях труби необхідно задатися поверхню яка визначається рівнянням еліпсоїда обертання з напівосями a_1 і b_1 [99]

$$\frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{a_1^2} + \frac{z^2}{b_1^2} = 1,$$

або з переходом до параметру ω

$$\sqrt{x^2 + y^2} = a_1 \cos \omega = y(\omega),$$

$$z = b_1 \sin \omega = z(\omega).$$

Записавши рівняння дотичної до еліпсоїда в площині YZ і використовуючи рівняння $\omega = \omega(X)$, отримаємо рівняння лінійної робочої поверхні інструменту

$$\left. \begin{array}{l} Yb_1 \cos \omega + Za_1 \sin \omega - a_1 b_1 = 0 \\ \omega = \omega(X) \end{array} \right\}$$

Складемо рівняння площин, що збігаються з гранями заготовки для інструменту, відповідно для першої, другої, третьої і четвертої граней

$$Y_1 = a_1 n_1,$$

$$Y_2 = a_1 n_2,$$

$$Z_3 = b_1 n_3,$$

$$Z_4 = b_1 n_4,$$

де n_1, n_2, n_3, n_4 – коефіцієнти конструктивного оформлення інструменту, що задаються в залежності від розмірів піввісь еліпсоїда або радіусу сфери.

З отриманих рівнянь визначаємо формули для встановлення координат точок:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 = a_1 n_1, Z_1 = \frac{b_1 [1 - n_1 \cos \omega (X)]}{\sin \omega (X)}, \\ Y_2 = a_1 n_2, Z_2 = \frac{b_1 [1 - n_2 \cos \omega (X)]}{\sin \omega (X)}, \\ Y_3 = \frac{a_1 [1 - n_3 \sin \omega (X)]}{\cos \omega (X)}, Z_3 = b_1 n_3, \\ Y_4 = \frac{a_1 [1 - n_4 \sin \omega (X)]}{\cos \omega (X)}, Z_4 = b_1 n_4. \end{aligned} \right\}$$

При фіксованих значеннях X точки $Y_1, Z_1, Y_2, Z_2, Y_3, Z_3, Y_4, Z_4$ визначають сліди прямої на сторонах плоского прямокутника, по яким розмічають модель для виготовлення інструменту. На рисунку 5.14 зображено тривимірну модель ІТ для тангенціального обкочування. Модель має плоску ділянку для заходу інструменту до заготовки. Криволінійна поверхня призначена для поступового перетворення циліндричної форми заготовки до сферичної поверхні. Крайня ділянка є калібрувальною для забезпечення точних розмірів сферичного днища. На ескізі не показані полиці для кріп-

лення інструменту до супорту станка. Спроекований інструмент планується виготовляти литтям по пластмасовій моделі, яка буде роздруковуватися на 3D принтері.

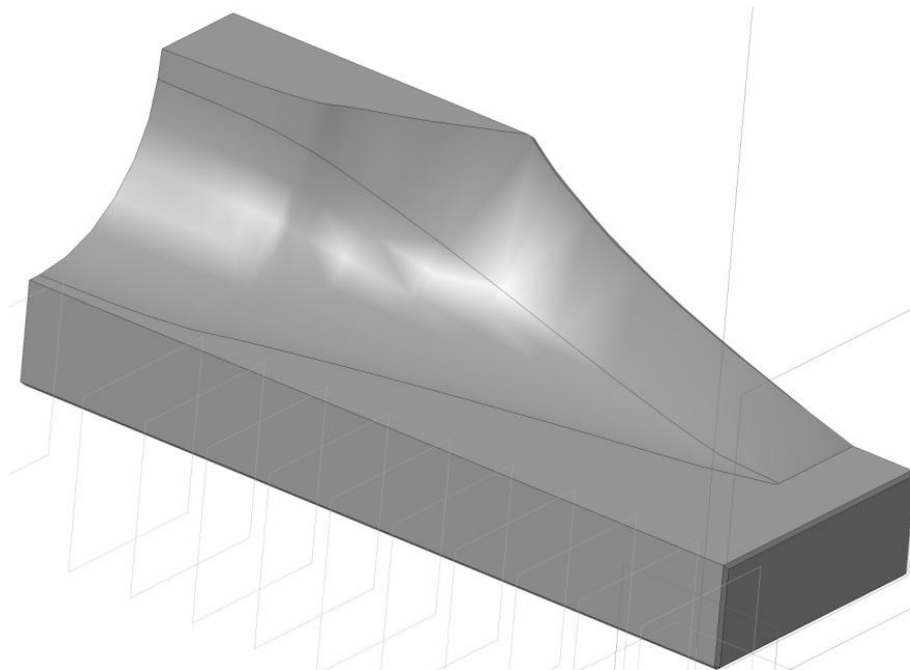


Рисунок 5.14 – Модель ІТ для тангенціального обкочування сферичних днищ

Після відливання інструменту передбачається тільки шліфування робочої поверхні, яка обкочує заготовку.

5.2.4 Приклад розробки технологічного процесу виготовлення днища балона діаметром 89 мм.

За розробленими рекомендаціями для виготовлення балону вогнегасника обираємо трубу з діаметром 89 мм та товщиною стінки 4,5 мм (рис. 5.15).

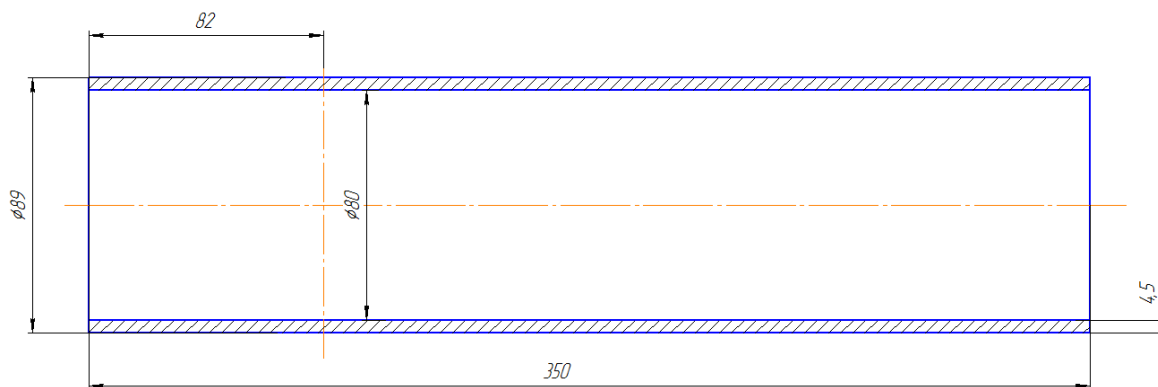


Рисунок 5.15 – Креслення трубної заготовки для виготовлення днища балона

1) Різка труб на заготовки довжиною $350 \pm 0,5$ мм і приймання їх ВТК. Обладнання та прилади – трубовідрізний верстат типу 9157, ультразвуковий дефектоскоп, індикаторні вимірювачі геометричних розмірів труб.

2) Нагрівання кінців труб на відстані $\sim 82 + 100$ мм до 1200°C в індукторі. Контроль температури – фотоелектричним пірометром зі звуковою сигналізацією при порушенні температурного режиму.

3) Обкочування днищ на машині для обкочування з поворотним супортом при наступному режимі: частота обертання шпинделя 900 об/хв, виліт $B = 82$ мм. При обкочуванні днища обдування торцевої кромки киснем за допомогою автоматичного пристрою для відстеження забезпечення зварювання стику (рис. 5.16). Регулярний контроль якості зварювання оглядом гарячих обкатаних заготовок зсередини, епізодичний контроль – металографічним дослідженням стиків розрізаних днищ. Устаткування – машина для обкатування потужністю 45 кВт.

4) Підсадка обкоченого сферичного днища плоским пуансоном, який розташовується на пінолі станка без додаткового підігрівання на ступень деформації 15 ... 20 % по висоті.

5) Нормалізація днищ балонів для вирівнювання структури металу по їх довжині і зняття залишкових напружень. Нагрівання до $880 \pm 15^\circ\text{C}$ з витримкою 40 хв і охолодженням на повітрі. Устаткування – прохідна піч.

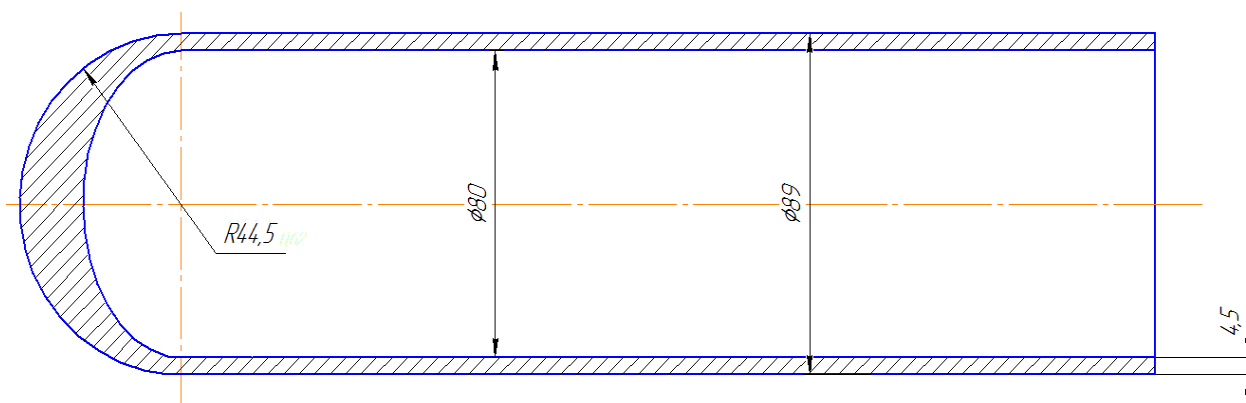


Рисунок 5.16 – Ескіз трубної заготовки з днищем, отриманого шляхом обкатування трубної заготовки ІТ

6) Загартування. Трубні заготовки з легованих сталей гартують з відпусканням після операцій обробки різанням і огляду днищ зсередини. Нагрівання в прохідній печі до $870 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 40 хв з охолодженням у воді, нагрітій до $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Устаткування – електрична піч.

7) Відпускання. Не менш ніж через 40 хв після гартування трубні заготовки повинні бути завантажені у вертикальному положенні в піч для відпуску при $650 - 700 \text{ }^\circ\text{C}$. Нагрівання балонів до $558 - 630 \text{ }^\circ\text{C}$ з витримкою за цієї температури 45 – 60 хв. Охолодження – на повітрі. Устаткування – вертикальні електричні полумуфельні печі.

8) Визначення твердості металу по Бринелю і порівняння її з допустимою зміною твердості металу даної плавки, що забезпечує отримання заданих показників механічних випробувань (діаметр відбитка 3,4 – 3,8 мм). Зовнішній огляд, усунення зовнішніх дефектів. Устаткування – верстат для зачистки зовнішніх дефектів, прес Бринеля.

9) Огляд днищ балонів через горловини з внутрішнім підсвічуванням.

10) Перекидання трубних заготовок у вертикальне положення, заповнення їх водою, вимір фактичної ємності, таврування даних про ємності в паспорті балона. Обладнання та інструмент – пристосування для кріп-

лення і перекидання балонів у вертикальне положення, колонки для заповнення водою і вимірювання ємності з точністю до 0,1 л.

11) Випробування на міцність гідравлічним тиском. Відповідно до вимог тиск при гідровипробуванні має дорівнювати 22,5 МПа. Одночасно відбраковують балони з течею в днищі. Устаткування – гідропрес, мультиплікатор гідравлічний.

12) Продування балонів стисненим повітрям.

13) Вибивання окалини. Устаткування – вібростенд.

14) Внутрішній огляд балонів.

Висновки за розділом 5

1. На основі проведених експериментальних досліджень було підтверджено, що максимальне збільшення товщини днища відбувається при підсадці в діапазоні 15...20 %.

2. Макроструктурний аналіз осьових дефектів днищ з різним ступенем підсадки дозволив встановити, що максимальна товщина стінки днища з урахуванням осьових дефектів набирається при підсадці на 15 %. Крім того, було встановлено, що в структурі металу днища, підсадженого на 15%, присутня не значна кількість оксидних плівок, що не знижує герметичність днища в осьовій зоні.

3. Підсадка сферичного днища, більш ніж на 15 % по висоті, призводить до збільшення розмірів неметалевих включень і призводить до зменшення глибини воронки осьової зони, але при цьому збільшується її діаметр, що призводить до появи розтягувальної радіальної компоненти напружень і, як наслідок, розтягування неметалевих включень.

4. У процесі підсадки закономірності сили від ступеня деформації мають лінійну залежність. Підтверджено, що максимальна сила деформу-

вання виникає на операції підсадки, ніж обкочування. Таким чином можна вважати, що результати з силових параметрів, які були встановлені МСЕ мають високу достовірність та співпадають з експериментом з похибкою 15 ... 20 %.

5. Аналіз результатів зміни потужності процесів обкочування та підсадки сферичних днищ дозволив зробити висновок, що процес обкочування призводить до поступового збільшення потужності, особливо на завершальному етапі формуванні днища та його калібруванні. Потужність, яка необхідна для підсадки, перевищує потужність обкочування. Отримані результати можна апроксимувати лінійною залежністю потужності підсадки від ступеня деформації. Результати теоретичного та експериментального досліджень якісно співпадають, різниця в середньому становить близько 15 %. Тому результати, які були встановлені у четвертому розділі, можуть використовуватися в якості рекомендацій для проектування нових процесів обкочування та підсадки сферичних днищ.

6. Узагальнено дані теоретичних і експериментальних досліджень для проектування і впровадження нових технологічних процесів тангенціального обкочування ІТ з застосуванням операції підсаджування сферичного днища. Розроблено практичні рекомендації та методика для обкочування днищ та подальшого їх підсаджування.

7. Апробовані та впроваджені у НДІ «УкрНДІМеталургмаш» та на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» нові технологічні процеси тангенціального обкочування, які забезпечили підвищення якості днищ і зниження браку на 20 ... 30 %. Механічні властивості деталей підвищилися в середньому на 9 ... 14 %.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішена важлива науково-технічна задача удосконалення технологічних процесів виготовлення днищ балонів на основі застосування комбінованого обкочування трубних заготовок ІТ з підсадкою, що дозволило підвищити якість виробів відповідального призначення за рахунок заварювання внутрішніх дефектів.

1. На основі літературного огляду досліджень процесів і оснащення для виготовлення днищ балонів з трубних заготовок встановлено, що ефективним способом їх отримання є тангенціальне обкочування ІТ. Однак на сьогодні не встановлені закономірності зміни НДС металу труби в процесі обкочування ІТ заготовок з різним співвідношенням геометричних параметрів, тому його визначення розширить технічні можливості процесу гарячого тангенціального обкочування труб, підвищить техніко-економічні показники продукції, що випускається. Були поставлені задачі досліджень.

2. Розроблено методику теоретичного дослідження МСЕ обкочування сферичних днищ ІТ з підсадкою, яка дозволяє встановити НДС металу пустотілої заготовки в процесі обкочування ІТ та підсадки з урахуванням нерівномірного температурного поля в об'ємі заготовки. Це дозволило знизити матеріальні витрати при проведенні експериментальних досліджень на 70 %. Для перевірки отриманих теоретичних результатів розроблено методику експериментальних досліджень. Розроблена методика дозволила встановити базові показники якості днищ сталевих заготовок, оцінити ступінь закриття та заварювання осьового отвору труби та встановити макрота мікроструктуру металу днища.

3. На основі теорії оболонок та енергетичного методу дослідження процесів обкочування та підсадки сферичних днищ пустотілих заготовок з різними геометричними параметрами встановлено ефективні технологічні діапазони для виготовлення бездефектних днищ. Раціональна гомологічна

температура нагрівання пустотілих заготовок перед тангенціальним обкочуванням ІТ повинна складати $0,8T_{i\bar{e}}$. Цієї температури достатньо для заварювання стінок отвору днища та виключення перегрівання та перепалення металу днища. Відносна довжина подачі заготовки в ІТ перед обкочуванням (l/D) повинна становити $0,9 \dots 0,95$ для повного закриття отвору днища. Відносна товщина пустотілої заготовки (D/s) повинна знаходитись у межах $15 \dots 20$ для зниження об'ємів напусків на внутрішню поверхню днища.

4. Встановлено НДС металу днища при реалізації комбінованого процесу обкочування та підсадки, виявлено, що максимальна інтенсивність деформацій виникає в зоні переходу сферичного днища в циліндричну частину труби. При підсадці у зовнішніх шарах днища переважають стискаючі напруження, а у внутрішніх шарах – розтягуючі. При ступені підсадки до 15 % рівень стискаючих напружень на зовнішній поверхні днища підвищується, а при збільшенні – починає зменшуватися. До ступеня підсадки 15 % днище має плоский торець, подальше підсадження призводить до появи увігнутої форми днища, що призводить до появи розтягуючої компоненти напружень на внутрішній поверхні. Це призводить до розкривання осьової лунки днища та зменшення її глибини. Підсадка призводить до збільшення товщини стінки днища. Інтенсивне збільшення товщини відбувається до ступеня підсадки 15 %.

5. Встановлено, що осьова сила оформлення сферичного днища стрімко зростає, при цьому відбувається зниження радіальної та тангенціальної компонент сили обкочування. У процесі підсадки закономірності сили від ступеня деформації мають лінійну залежність. Підсадка днища характеризується лінійним збільшенням крутного моменту при підвищені ступеня обтискання. Величина крутного моменту при реалізації процесу підсадки нижче моменту обкочування. Робота на підсадку у 2 ... 2,5 рази вища, ніж на обкочування. У процесі обкочування вживана потужність під-

вищується. Потужність підсадки на 25 % більша, ніж обкочування, та має лінійну залежність від ступеня деформації.

6. Результати експериментальних досліджень підтвердили данні скінченно-елементного моделювання. Відхилення теоретичних даних з формозміни заготовки від експериментальних не перевищує 12...15 %, що дозволяє зробити висновок про достовірність встановлених технологічних рекомендацій з термошвидкісних умов обкочування ІТ та підсадки, отриманих на основі МСЕ. Було встановлено, що максимальне збільшення товщини днища відбувається після підсадки у діапазоні 15...20 %. Макроструктурний аналіз осьових дефектів днищ з різним ступенем підсадки дозволив встановити, що максимальна товщина стінки днища набирається при підсадці на 15 %. Підсадка сферичного днища більш ніж на 15 % по висоті призводить до зменшення глибини лунки осьової зони, але при цьому збільшується її діаметр, що призводить до появи розтягувальної радіальної компоненти напружень і, як наслідок, розтягування неметалевих включень.

7. Узагальнено дані теоретичних і експериментальних досліджень для проектування і впровадження нових технологічних процесів тангенціального обкочування ІТ із застосуванням операції підсадки сферичного днища. Розроблено практичні рекомендації та методика для обкочування та підсадки днищ. Встановлено, що для бездефектного обкочування днищ ІТ доцільно використовувати відносну подачу трубної заготовки в ІТ величиною 0,925 з підсадкою 15 ... 20 %.

8. Апробовані та впроваджені у НДІ «УкрНДІМеталургмаш» та на ПрАТ «НКМЗ» новий технологічний процес тангенціального обкочування із застосуванням підсадки сферичного днища плоским інструментом. Виготовлені вироби відповідали технічним умовам замовника. Для нових технологічних процесів обкочування підвищено якість осьової зони днища. Отримані результати металографічних досліджень підтверджують високу ефективність схеми обкочування днищ з підсадкою на заварювання внутрішніх дефектів. Менше ніж 6 % отриманих днищ перевищують вимоги стандарту за розміра-

ми внутрішніх дефектів. Нові технологічні процеси обкочування підвищили якість продукції, що випускається, за рахунок підвищення щільності металу осьової зони днища, що забезпечило зниження браку на 20...30 %. Механічні властивості деталей підвищилися в середньому на 9...14 %. Запропоноване технічне рішення захищені патентами України (№ 86619, 116546).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Ростовщиков В. А. Технология и оборудование для формообразования полых длинномерных поковок горячим радиальным обжатием / В. А. Ростовщиков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 6. – С. 10–13.
- 2 Wu Y. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process / Yunjian Wu, Xianghuai Dong, Qiong Yu // International Journal of Mechanical Sciences. – 2015. – 93. – P. 102–110.
- 3 Sizek H. W. Radial Forging / H. W. Sizek // Metalworking : Bulk Forming. – 2005. – С. 172–178.
- 4 Пасько А. Н. Математическое моделирование в процессах ротационнойковки / А. Н. Пасько, О. А. Ткач, Л. В. Муравлева // Известия ТулГУ. Технические науки. Технологии и оборудование для обработки металлов давлением. – 2009. – № 3. – С. 195–199.
- 5 Пасько А. Н. Влияние технологических параметров на толщину стенки заготовки при ротационнойковке / А. Н. Пасько, О. А. Ткач // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 2, ч. 2. – С. 70–74.
- 6 Ghaei A. Finite element modelling simulation of radial forging of tubes without mandrel / A. Ghaei, M. R. Movahhedy, A. Karimi Taheri // Materials & Design. – 2008. – № 29. – P. 867–872.
- 7 Пасько А. Н. Моделирование многопереходного процесса ротационнойковки / А. Н. Пасько, О. А. Ткач // Известия ТулГУ. Технические науки. Технологии и оборудование для обработки металлов давлением. – 2010. – № 3. – С. 69–73.
- 8 Пасько А. Н. Особенности процесса ротационнойковки цилиндрической заготовки без оправки / А. Н. Пасько, О. А. Ткач // Известия ТулГУ. Технические науки. Технологии и оборудование для обработки металлов давлением. – 2009. – № 2. – С. 141–145.

9 Fan L. 3D finite element modeling and analysis of radial forging processes / Lixia Fan, Zhigang Wang, He Wang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2014. – 16. – P. 329–334.

10 A vertical automated forging center for the plastic deformation of continuously-cast ingots / S. P. Burkin, E. A. Korshunov, V. L. Kolmogorov, N. A. Babailov, V. M. Nalesnik // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1996. – № 58. – P. 170–173.

11 Rotary swaging forming process of tube workpieces / Qi Zhang, Kaiqiang Jin, Dong mu, Pengju Ma, Jie Tian // 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014. – Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. – *Procedia Engineering*. – 2014. – 81. – P. 2336–2341.

12 Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test / M. Sanjari, P. Saidi, A. Karimi Taheri, M. Hossein-Zadeh // *Materials and Design*. – 2012. – 38. – P. 147–153.

13 Wang Z. G. The theory analysis and numerical simulation for the radial forging process of gun barrel / Wang Z. G. ; Nanjing University of Science and Technology. – 2011. – P. 28–30.

14 Latest Development in Railway Axle and Thick-Walled Tube forging on a Hydraulic Radial Forging Machine Type SMX / Frederik Knauf, Paul-Josef Nieschwitz, Albrecht Holl, Hans Pelster, Rolf Vest – P. 215–220.

15 Koppensteiner R. Optimizing Tooling And Pass Design For Effectiveness On Forged Product / Robert Koppensteiner, Zack Tang – P. 225–229.

16 Sheu J. J. Optimum die design for single pass steel tube drawing with large strain deformation / Jinn-Jong Sheu, Su-Yi Lin, Cheng-Hsien Yu // 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014. – Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. – *Procedia Engineering*. – 2014. – 81. – P. 688–693.

17 Li Y. Numerical simulation and experimental study on the tube sinking of a thin-walled copper tube with axially inner micro grooves by radial forg-

ing / Yong Li, Ting He, Zhixin Zeng // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – 213. – P. 987–996.

18 Comparison of radial forging between the two- and three-split dies of a thin-walled copper tube during tube sinking / Yong Li, Jinlong Huang, Guangwen Huang, Wei Wang, Jucong Chen, Zhixin Zeng // Materials and Design. – 2014. – 56. – P 822–832.

19 Pantalé O. Influence of the Constitutive Flow Law in FEM Simulation of the Radial Forging Process / Olivier Pantalé, Babacar Gueye // Journal of Engineering. – Volume 2013, Article ID 231847. – 8 p. – URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/231847>.

20 Kowalski J. Experimental Investigation Of The Strain State In The Ring-Forging Process / J. Kowalski, B. Hoderny // Journal of Mechanical Working Technology. – 1987. – 14. – P 309–324.

21 A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria / C. Linardon, D. Favier, G. Chagnon, B. Gruez // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – 214. – P. 347–357.

22 Khayatzadeh S. A Simulation of Hollow and Solid Products in Multi-Pass Hot Radial Forging Using 3D-FEM Method / S. Khayatzadeh, M. Poursina, H. Golestanian // Int J Mater Form. – 2008. – Suppl 1. – P. 371–374.

23 Пат. 76609 Україна, МПК В21D41/00. Спосіб формування кінців труб / Афанасьєва М. А., Луговська О. А., Меженська А. М. ; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201207550 ; заявл. 20.06.2012 ; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1. –7 с. : іл.

24 Пат. 39240 Україна, МПК В21D22/16, В21D22/22, В21D51/24. Спосіб виготовлення газових балонів високого тиску / Сергєєв В. В., Іванов А. І., Літвінський Я. І., Янковський В. М., Юр'єв М. П., Мельник В. Г., Карп І. М., П'ятничко О. І. ; власники Державний науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості «ДТІ», Відкрите акціонерне товариство «Бердичівський

машинобудівний завод "Прогрес"». – № 2000063308 ; заявл. 06.06.2000 ; опубл. 15.06.2001, Бюл. № 5. – 4 с.

25 Пат. 39240 Україна, МПК В21D22/16, В21D22/22, В21D51/24. Спосіб виготовлення корпусів балонів з вуглецевої сталі / Сергєєв В. В., Іванов А. І., Макатьора В. С., Юр'єв М. П., Мельник В. Г. ; власники Державний науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади, Відкрите акціонерне товариство «Бердичівський машинобудівний завод "Прогрес"». – № 2002065156 ; заявл. 21.06.2002 ; опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12. – 3 с.

26 Пат. 97083 Україна, МПК В21D 51/24. Спосіб виготовлення балонів / Хверелідзе К. Т. ; власники Державний науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади, Хверелідзе Кирило Тамазович. – № a201110969 ; заявл. 13.09.2011 ; опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24. – 3 с.

27 Пат. 33435 Україна, МПК В21D 51/00. Спосіб виготовлення корпусів балонів / Іванов А. І., Шевченко В. Ф., Ушверідзе Є. Ш. ; власник Державний науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади. – № u200801281 ; заявл. 01.02.2008 ; опубл. 25.06.2008, Бюл. № 12. – 2 с. : іл.

28 Пат. 36338 Україна, МПК В21D51/00. Спосіб виготовлення корпусів балонів / Іванов А. І., Шевченко В. Ф., Лосовській Г. Й., Мельник В. Г., Юр'єв М. П. ; власник Державний науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади. – № u200805502 ; заявл. 29.04.2008 ; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 20. – 3 с. : іл.

29 Пат. 86619 Україна, МПК В21D51/00. Спосіб виготовлення корпусів балонів / Сатонін О. В., Кулік О. М., Дмитрієв С. А., Шевцов С. О. ; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201306940 ; заявл. 03.06.2013 ; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1. – 1 с.

30 Пат. 13781 Україна, МПК В21D51/16. Спосіб виготовлення балонів і посудів із алюмінію та його сплавів / Сирота О. В., Близнюков Є. О., Острін Г. Я., Щіпцин В. М., Літвінський Я. І., Атаманенко О. Є., Сергєєв В. В., Іванов А. І. ; опубл. 25.04.1997. – 2 с.

31 Пат. 87544 Україна, МПК В21D51/16, F17C1/00. Спосіб виготовлення суцільнометалевого безшовного газового балона високого тиску / Родіонов В. Є., Жданкін А. П., Дрюкова К. Ю., Касперов О. П., Швед Н. Ю., Сухін Є. І., Немчин О. Ф. ; власник Товариство з обмеженою відповідальністю «Український центр інновацій та технологій». – № а200707583 ; заявл. 05.07.2007 ; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 14. – 4 с. : іл.

32 Пат. 40179 Україна, МПК F17C1/00. Газовий балон / Сергєєв В. В., Іванов. А. І., Літвінський Я. І., Юр'єв М. П., Мельник В. Г., Карп І. М., Мілованова Я. О. – № 2000084988 ; заявл. 23.08.2000 ; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6. – 4 с. : іл.

33 Пат. 20453 Україна, МПК F17C1/00. Балон високого тиску / Яворський В. С., Стеблюк В. І., Орлюк М. В. ; власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u200609018 ; заявл. 14.08.2006 ; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1. – 2 с. : іл.

34 Пат. 8581 Україна, МПК В21D51/16. Спосіб виготовлення корпусів балонів високого тиску / Сергєєв В. В., Мельник В. Г., Жарко В. П., Літвінський Я. І., Юр'єв М. П., Іванов А. І., Соломадіна Є. А., Янковський В. М.; опубл. 15.08.2005. – 2 с.

35 Пат. 8582 Україна, МПК С21D9/08. Спосіб термічної обробки балонів високого тиску з легованої конструкційної сталі / Літвінський Я. І., Сергєєв В. В., Янковський В. М., Юр'єв М. П., Жарко В. П., Соломадіна Є. А., Іванов А. І., Мельник В. Г. ; опубл. 15.08.2005. – 3 с.

36 Пат. 39240 Україна, МПК В21D51/16, В21D22/16. Спосіб виготовлення газових балонів високого тиску / П'ятничко О. І., Літвінський Я. І., Сергєєв В. В., Іванов А. І., Карп І. М., Юр'єв М. П., Мельник В. Г., Янковський В. М. ; опубл. 17.05.2004. – 4 с.

37 Горбач Е. В. Построение математических зависимостей для определения коэффициентов конструктивного оформления инструмента трения для тангенциальной обкатки труб / Е. В. Горбач, В. А. Паламарчук // Международное научное издание SWorld : сборник научных трудов. – Иваново, 2014. – Том 8. – С. 15–21.

38 Пат. 30609 Україна, МПК В21D51/24, 41/04. Інструмент для закатки горловин балонів / Хаустов Г. Й., Іванов А. І., Щіпіцин В. М., Макатьора В. С., Ігнатенко Г. А. ; власник Державний науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості. – № 98031243 ; заявл. 11.03.1998 ; опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7. – 5 с. : іл.

39 Горбач Е. В. Прогнозирование износостойкости инструмента для тангенциальной обкатки конических днищ / Е. В. Горбач, В. А. Паламарчук // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 2 (39). – С. 210–213.

40 Паламарчук В. А. Влияние характеристик обкатного инструмента на деформационные и силовые параметры тангенциальной обкатки труб / В. А. Паламарчук, В. Г. Серета, Е. В. Горбач // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : збірник наукових праць. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. – № 1 (12). – С. 296–301.

41 Пат. 55663 Україна, МПК В21D22/08. Роторна машина для ротаційного обтискування кінців трубчатих заготовок / Роганов Л. Л., Пиц Є. Я., Пиц В. Я., Пиц Я. Є. ; власник Донбаська державна машинобудівна академія. – № u201005670 ; заявл. 11.05.2010 ; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24. – 3 с. : іл.

42 Оценка точности проектирования рабочей поверхности инструмента трения для тангенциальной обкатки труб / А. Н. Обухов, В. А. Паламарчук, А. Ф. Тарасов, В. Г. Серета, Е. В. Горбач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : збірник наукових праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 45. – С. 29–33.

43 Серета В. Г. Исследование форм днищ для автоматизации проектирования инструмента трения / В. Г. Серета, Е. В. Горбач, В. А. Паламарчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 47 (953). – С. 177–180.

44 Пат. 67340 Україна, МПК В21D51/16, В21D41/00. Інструмент для закатки горловин балонів / Іванов А. І., Сергєєв В. В., Макатьора В. С., Білецький В. Н.; опубл. 15.06.2004. – 4 с.: іл.

45 Sekiguchi A. Experimental implementation and analysis of robotic metal spinning with enhanced trajectory tracking algorithms / Akio Sekiguchi, Abdullah Ozer, Hirohiko Arai // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2012. – № 28. – P. 539–55.

46 James A. Polyblank. Parametric toolpath design in metal spinning / James A. Polyblank, Julian M. Allwood // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2015. – № 64. – P. 301–304.

47 Music O. A review of the mechanics of metal spinning / O. Music, J. M. Allwood, K. Kawai // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – № 210. – P. 3–23.

48 Близнюков Е. А. Производство баллонов и других полых изделий методом обкатки / Е. А. Близнюков, И. И. Соркин // Черная металлургия: бюллетень ЦИИИ. – 1959. – № 13. – С. 53–55.

49 Литвинский Я. И. Режимы подачи при ковке баллонов / Я. И. Литвинский, И. И. Соркин, В. М. Щипицын // Кузнечно-штамповочное производство. – 1975. – № 12. – С. 22–23.

50 Колмаков Е. А. Пути совершенствования технологии обработки давлением днищ и горловин баллонов / Е. А. Колмаков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1977. – № 4. – С. 25–27.

51 Совершенствование технологии производства бесшовных баллонов / Е. А. Близнюков, И. П. Потапов, Я. И. Литвинский, В. М. Щипицын, П. М. Финагин, Н. В. Пирогов // Сталь. – 1983. – № 1. – С. 50–51.

52 Мансуров И. З. Специальные кузнечно-прессовые машины и автоматизированные комплексы кузнечно-штамповочного производства : справочник. / И. З. Мансуров, И. М. Подрабинник. – М. : Машиностроение, 1990. – 344 с.

53 Металлосберегающая технология точной штамповки корпусов гидроцилиндров / В. И. Дорошко, А. А. Андриюцук, Л. И. Семеняка, М. Я. Элькин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 8. – С. 4.

54 Грачев И. А. Совершенствование и разработка ресурсосберегающих технологических процессов комбинированного выдавливания деталей с наружными выступами : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.03.05 / Грачев И. А. ; Краматорск. индустр. ин-т. – Краматорск, 1993. – 15 с.

55 Евстратов В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В. А. Евстратов. – Харьков : Вища школа, 1987. – 144 с.

56 Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. Т. 4: Листовая штамповка / под ред. А. Д. Матвеева ; ред.совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1985–1987. – 544 с.

57 Артес А. Э. Выдавливание на плавающих оправках / А. Э. Артес, Е. С. Серов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 9. – С. 7–9.

58 Горбунов М. Р. Штамповка деталей из трубчатых заготовок / М. Р. Горбунов. – М. : Машгиз, 1960. – 188 с.

59 Кирицев А. Д. Определение радиальной деформации трубной заготовки при обжиге с одновременным нагревом / Кирицев А. Д. // Пластическая и термическая обработка стали : сборник научных трудов ЖМИ. – М. : Metallurgizdat, 1963. – С. 143–149.

60 Агеев Н. П. Обжим тонкостенных заготовок с эластично-жидкостным подпором / Н. П. Агеев, Б. А. Кривицкий // Кузнечно-штамповочное производство, 1978. – № 5. – С. 16–17.

61 Предотвращение гофрообразования при обжиге тонкостенных цилиндрических оболочек / М. Н. Горбунов, А. Г. Пашкевич,

М. Ф. Каширин, А. В. Орехов // Кузнечно-штамповочное производство, 1977. – № 1. – С. 18–19.

62 Горбунов М. Н. Обжим труб с осевым подпором / М. Н. Горбунов, А. Г. Пашкевич // Кузнечно-штамповочное производство. – 1965. – № 8. – С. 14–18.

63 Аверкиев Ю. А. Закрытые штампы со скользящим подпором для обжима заготовок / Ю. А. Аверкиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1967. – № 4. – С. 23–25.

64 Обжим сварных трубчатых заготовок / В. И. Глазков, М. Ф. Каширин, А. Д. Ковалев, Е. Н. Савченко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1976. – № 12. – С. 13–15.

65 Изготовление сложных полых деталей / К. Н. Богоявленский, Е. И. Серяков, А. Н. Кобышев, Н. Ф. Воронина ; под ред. проф. К. Н. Богоявленского. – Л. : Машиностроение. Ленингр.отд-ние, 1979. – 218 с.

66 Борисов С. И. Усилие деформации при поперечно-винтовой обкатке полых заготовок инструментом трения / С. И. Борисов, Е. А. Близнюков // Производство труб : межвуз. сб. науч. трудов. – М., 1969. – С. 165–172.

67 Казанская И. И. Станы для производства точных заготовок машиностроительных деталей / И. И. Казанская, В. Ф. Муконин, Ю. А. Марков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. – № 4. – С. 5–8.

68 Тетерин П. К. Определение частных обжатий по длине зоны деформации при планетарно-винтовой прокатке / П. К. Тетерин, Г. П. Тетерин, Д. М. Поксеваткин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. – № 7. – С. 10–13.

69 Фирсова Т.И. Кузьмина О.М. Методика определения критерия кинематического подобия по базовым значениям процесса прокатки. // Сб. научн. трудов ДГМА. Обработка материалов давлением. – Краматорск. – 2014. - №2(39). – С.197-200.

70 Щукин В. Я. Совершенствование поперечно-клиновой прокатки / В. Я. Щукин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1978. – № 11. – С. 23–26.

71 Клушин В. А. Совершенствование поперечно-клиновой прокатки. / В. А. Клушин, Е. М. Макушок, В. Я. Щукин. – Минск : Наука и техника, 1980. – 280 с.

72 Поперечно-клиновая прокатка в машиностроении / А. И. Целиков, И. И. Казанская, А. С. Сафонов, А. В. Матвеев, Б. Ф. Садковский, В. Я. Щукин. – М. : Машиностроение, 1982. – 192 с.

73 Гредитор М. А. Давильные работы и ротационное выдавливание / М. А. Гредитор. – М. : Машиностроение, 1971. – 239 с.

74 Могильный Н. И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках / Н. И. Могильный. – М. : Машиностроение, 1983. – 190 с.

75 Могильный Н. И. Обжим тонкостенных оболочек роторным давальным инструментом / Н. И. Могильный, И. В. Кочетов, П. Ф. Григорьев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 5. – С. 30–31.

76 Изготовление деталей в форме полых тел вращения путем ротационного токарного выдавливания. Перевод KE-57530 (Industrie-Anzeiger). – 1981. – № 93. – С. 22–23.

77 Бутузов Е. А. Специальные виды штамповки / Бутузов Е. А. – М. : Высшая школа, 1963. – 206 с.

78 Ершов В. И. Распределение толщины при ротационной вытяжке конической детали / В. И. Ершов, А. С. Чумадин, О. И. Яцук // Кузнечно-штамповочное производство. – 1986. – № 8. – С. 25–26.

79 Вальтер А. И. Оценка энергетических параметров ротационной вытяжки цилиндрических оболочек с помощью методов конечных элементов / А. И. Вальтер, Л. Г. Юдин, А. А. Хитрый // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. – № 8. – С. 2–3.

80 Опыт изготовления газовых баллонов многооперационной вытяжкой / Н. А. Макаровец, В. А. Береговой, Л. Г. Юдин, С. П. Яковлев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. – № 8. – С. 26–27.

81 Юдин Л. Г. Особенности формоизменения при ротационной вытяжке без утонения роликовыми раскатными устройствами / Л. Г. Юдин, В. А. Коротков, Н. А. Горюнова // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – № 10. – С. 23–25.

82 Корольков В. И. Автоматизация проектирования технологического процесса ротационной вытяжки / В. И. Корольков, Ю. Л. Арапов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – № 9. – С. 7–9.

83 Попов С. П. Влияние технологических факторов на деформированное состояние и технологические отказы при ротационной вытяжке оболочек из плоских заготовок / С. П. Попов, Ф. Х. Томилов, В. М. Чернов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – № 9. – С. 24–25.

84 Исследование процесса ротационной вытяжки крупногабаритной тороидальной детали из плоской заготовки / В. И. Корольков, С. П. Попов, Ф. Х. Томилов, В. М. Чернов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. – № 3. – С. 8–9.

85 Бузиков Ю. М. Новые способ и стан ротационного выдавливания особотонкостенных цилиндров повышенной точности / Ю. М. Бузиков, С. М. Пилякина // Кузнечно-штамповочное производство. – 1978. – № 5. – С. 23–26.

86 Определение геометрии очага деформации при закатке концов труб роликовым инструментом / И. Н. Потапов, А. И. Александрович, Е. И. Шифрин, В. П. Зинов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1975. – С. 96–98.

87 Деформация металла при изготовлении баллонов роликовой закаткой с подпором / Е. А. Близнюков, Я. И. Литвинский, В. М. Щипицын // Новые технологии производства стальных труб. – М. : Металлургия (МЧМ СССР), 1983. – С. 61–66.

88 Близнюков Е. А. Основные технологические параметры деформации обочечек из легированных сталей и сплавов при обкатке роликом. / Е. А. Близнюков // Трубы из легированных сталей. – М. : Metallurgiya, 1984. – С. 8–13.

89 Колмаков Е. А. О некоторых результатах обжима горловин баллонов валками / Е. А. Колмаков, В. И. Чистяков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 11. – С. 27–28.

90 Hot Spinning – a Process for Mass Production // The Production Engineer. – 1982. – № 5. – P. 21–25.

91 Automatische Schwenkformmaschine Modell AST. Lizenz Autospin/ Kieserling Kieserling & Albrecht GmbH & Co. – KG, 1989. – 4s.

92 Palter H. Herstellung von Gasflaschen und Stobdampferrohren auf einer automatischen Rohrschliebmosehine / H. Palter // Blech-Rohre-Profile. – 1982. – № 11. – S. 529–530.

93 Исследование деформационных и энергосиловых параметров двухроликовой закатки горловин крупнолитражных баллонов / И. Н. Потапов, Р. И. Ахмедшин, А. Ю. Прянишников, Б. Н. Брюхов, В. А. Артемьев // Теория и технология метало- и энергосберегающих процессов обработки металлов давлением : сб. науч. тр. / МИСиС. – М. : Metallurgiya, 1986. – С. 123–129.

94 Подрабинник И. М. Кузнечно-прессовое оборудование на выставке «Технология-92» / И. М. Подрабинник // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – № 5–6. – С. 26–30.

95 Капорович В. Г. Технологические возможности ротационного обжима труб без инструмента / В. Г. Капорович, М. А. Афанасьева // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – № 5. – С. 9–10.

96 Капорович В. Г. Морфологический анализ путей совершенствования процесса обкатки трубчатых заготовок / В. Г. Капорович, М. А. Афанасьева // Разработка и исследование высокоэффективных тех-

нологических процессов, оснастки и оборудования. Обработка металлов давлением. – Киев : УМК ВО, 1990. – С. 100–105.

97 Капорович В. Г. Получение осесимметричных металлоизделий методом взаимного деформирования трубчатых заготовок / В. Г. Капорович, М. А. Афанасьева // Кузнечно-штамповочное производство. – 1992. – № 2. – С. 8–9.

98 Борисов С. И. Рабочий инструмент для производства полых периодических профилей на стане поперечно-винтовой обкатки / С. И. Борисов, Е. А. Близиюков // Производство труб : сб. статей по теории и практике трубного производства. – М. : Metallurgia, 1963. – Вып. 11. – С. 46–51.

99 Капорович В. Г. Производство деталей из труб обкаткой / В. Г. Капорович. – М. : Машиностроение, 1978. – 136 с.

100 Безотходная технология изготовления предохранительных деталей к трубам нефтяного сортамента / И. К. Козлов, Ю. С. Пикинер, Д. Е. Рохман, С. В. Окара // Прогрессивные технологии и оборудование для трубного производства (МЧМ СССР). – М. : Metallurgia, 1987. – С. 81–84.

101 Капорович В. Г. Ротационная обкатка трубчатых заготовок – высокоэффективный технологический процесс / В. Г. Капорович // Кузнечно-штамповочное производство. – 1992. – № 92. – С. 2.

102 Капорович В. Г. Поиск новых технических решений в области обкатки трубчатых заготовок / В. Г. Капорович // Вестник машиностроения. – 1983. – № 9. – С. 49–54.

103 А. с. 415070, МКИ В 21D 41/04, 51/24. Установка для производства баллонов / Б. И. Зуев, К. К. Диапантонуло, А. С. Брук. (СССР). – № 1497834/25-27 ; заявл. 01.12.1970 ; опубл. 05.02.1974, Бюл. № 5.

104 Капорович В. Г. Развитие планетарной обкатки трубчатых заготовок / В. Г. Капорович, Ю. А. Сачик, В. И. Юдин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – № 5. – С. 5–6.

105 Юдин В. И. Планетарная обкатная машина для обкатки концов труб / В. И. Юдин, В. Г. Капорович, В. С. Лелеко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. – № 7. – С. 35–36.

106 Капорович В. Г. Автомат для обкатки трубчатых заготовок. / В. Г. Капорович, В. С. Рыжиков, В. К. Удовенко // Механизация и автоматизация производства. – 1975. – № 10. – С. 15–16.

107 Рыжиков В. С. Роторный автомат для получения изделий горячей обкаткой круговым инструментом / В. С. Рыжиков, В. Г. Капорович // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – № 5. – С. 13–15.

108 Близнюков Е. А. Деформация и усилия при закатке тонкостенных труб / Е. А. Близнюков. – Днепропетровск, 1985. – 19 с. – Деп в ин-те «Черметинфирмация» 19.11.1985. – № 2849-85 Деп.

109 Близнюков Е. А. Калибровка инструмента трения скольжения для обкатки 1 горловин баллонов / Е. А. Близнюков // Сталь. – 1982. – № 6. – С. 56–58.

110 Залесский В. И. Определение контактной площади при закатке труб. / В. И. Залесский, А. Г. Кобелев, Е. А. Колмаков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1967. – № 1. – С. 113–116.

111 Колмаков Е. А. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса закатки днищ баллонов и разработка инженерной методики расчета деформирующего усилия : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Колмаков Е. А. – Свердловск, 1968. – 18 с.

112 Матвеев Ю. М. Кинематика процесса закатки днищ нормальных баллонов / Ю. М. Матвеев, Я. М. Шехет // Производство сварных и бесшовных труб : сб. науч. тр. УралНИТИ. – М. : Металлургия, 1965. – Вып. 5. – С. 133–141.

113 Матвеев Ю. М. Определение площади контакта при закатке горловин баллонов для кислорода и других газов. / Ю. М. Матвеев, Я. М. Шехет // Производство сварных и бесшовных труб : сб. науч. тр. УралНИТИ. – М. : Металлургия, 1968. – Вып. 9. – С. 172–177.

114 Методика и приспособления для экспериментального исследования энергосиловых и кинематических параметров процесса закатки кислородных баллонов / Ю. М. Матвеев, Я. М. Шехет, Б. С. Малкин, Б. П. Рябков, В. И. Чистяков, В. А. Глинин, Б. Я. Коган, Е. А. Колмаков, Ю. Е. Левкоев // Производство сварных и бесшовных труб. : сб. науч. тр. УралНИТИ. – М. : Metallургия, 1969. – Вып. 9. – С. 177–184.

115 Капорович В. Г. Экспериментальные исследования технологических параметров тангенциальной обкатки трубчатых заготовок / В. Г. Капорович, М. П. Найденов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 12. – С. 15–17.

116 Исследование энергосиловых параметров при закатке баллонов. / В. К. Потапенко, М. Я. Бровман, В. Г. Капорович, Е. М. Белов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1967. – № 4. – С. 14–15.

117 Залесский В. И. Определение усилий при закатке днищ плоским инструментом / В. И. Залесский, А. Г. Кобелев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1967. – № 7. – С. 113–116.

118 Найденов М. П. Приспособление для замера энергетических параметров при тангенциальной обкатке / М. П. Найденов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. – № 12. – С. 15–17.

119 Повышение эффективности изготовления баллонов и трубных изделий с утоненными стенками способом закатки / Е. А. Близнюков, Д. Е. Рохман, А. И. Лисицин, С. В. Окара // Повышение эффективности производства и улучшение качества труб. – М. : Metallургия (МЧМ СССР), 1986. – С. 12–17.

120 Некоторые предпосылки к расчету калибровки инструмента для закатки горловин баллонов из различных марок стали и сплавов / Е. А. Близнюков, Д. Е. Рохман, А. И. Холод, А. И. Иванов, Е. Д. Сапко. – Днепропетровск, 1982. – 13 с. – Деп. в ин-те «Черметинформация». – 13.08.1982, № 1714.

121 Середа В. Г. Исследование обкатки концов длинных и криволинейных труб : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Середа В. Г. ; Краматорск. индустр. ин-т. – Краматорск, 1978. – 18 с.

122 Макшанцев В. Г. Разработка технологического процесса и типоразмерного ряда оборудования для обкатки деталей с фланцами из трубчатых заготовок : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Макшанцев В. Г. ; Краматорск. индустр. ин-т. – Краматорск, 1989. – 17 с.

123 Капорович В. Г. Определение предельных обжатий при тангенциальной обкатке труб / В. Г. Капорович, Л. Н. Ващук // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 2. – С. 11–12.

124 Гетия И. Г. Теоретическое исследование устойчивости при обкатке тонкостенных труб / И. Г. Гетия, В. К. Шумилин // Обработка металлов давлением : межвуз. сб. науч. трудов. – М., 1979. – С. 10–34.

125 Друян В. М. Исследование устойчивости тонкостенных заготовок при обкатке инструментом трения / В. М. Друян, А. В. Губинский, Ю. А. Рыщенко – Днепропетровск, 1981. – 18 с. – Деп. в ин-те «Черметинформация» 12.10.1981, № 1347.

126 Капорович В. Г. Исследование тангенциальной обкатки трубчатых заготовок / В. Г. Капорович, М. П. Найденов, В. К. Удовенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 4. – С. 19–22.

127 Разработка и внедрение технологии тангенциальной обкатки заготовок типа «Баллон» и фланцев на трубах / В. Г. Капорович, Я. Е. Пыц, Г. А. Филипенко, В. Г. Макшанцев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – № 5. – С. 10.

128 А. с. 1647989, МКИ В 21 D 51/24. Способ изготовления горловин на концах трубчатых заготовок и устройство для его осуществления / В. Г. Капорович, А. Н. Кулик,, В. Г. Середа, А. М. Каминский, А. Н. Усанов (СССР). – № 4647824/27 ; заявл. 6.02.1989, (ДСП). – 6 с.

129 А. с. 1386331, МКИ В21D 19/04 Способ получения утолщения на пустотелых цилиндрических заготовках / В. Г. Капорович, В. Г. Середа,

В. Ф. Баркая, А. А. Костава, В. Г. Макшанцев и М. М. Хадарадзе (СССР). – № 4072100/31-27 ; заявл. 28.05.1986 ; опубл. 07.04.1988, Бюл. № 13. – 5 с.

130 Запрягайло Б. И. Электровысадка концов стальных труб / Б. И. Запрягайло, И. А. Леонтьев, Б. И. Клубис // Кузнечно-штамповочное производство. – 1978. – № 8. – С. 40–42.

131 А. с. 227971, МКИ В21D. Станок для горячей закатки / В. Г. Капорович, Р. С. Дрямпям (СССР). – № 1163215/25-27 ; заявл. 13.06.1967 ; опубл. 08.10.1968, Бюл. № 31. – 3 с.

132 Смирнов В. С. Теория прокатки. / В. С. Смирнов. – М. : Металлургия, 1967. – 460 с.

133 Близнюков Е. А. Исследование напряженно-деформированного состояния металла при закатке тонкостенных труб / Е. А. Близнюков, С. В. Окара. – Днепропетровск, 1985. – 19 с. – Деп в ин-те «Черметинфир-мация».

134 Методика определения напряженно-деформированного состояния металла при закатке концов труб / П. И. Полухин, И. И. Потапов, В. Н. Шифрин, Л. И. Александрович // Пластическая деформация металлов и сплавов : сб. науч. трудов МИСиС. – М. : Металлургия, 1975. – № 80. – С. 17–18.

135 Ильюшин А. А. Основы математической теории термовязкоупругости / А. А. Ильюшин, Б. Е. Победря. – М. : Наука, 1970. – 230 с.

136 Бровман М. Я. Определение усилий при закатке баллонов / М. Я. Бровман, В. К. Потапенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 10. – С. 17–20.

137 Вашук Л. Н. Определение усилий при тангенциальной обкатке труб / Л. Н. Вашук // Исследование в области пластичности и обработки металлов давлением : сб. науч. трудов. – Тула, 1975. – С. 107–114.

138 Шехет Я. М. Исследование и совершенствование технологического процесса закатки (спинингования) трубчатых изделий : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Шехет Я. М. – Челябинск, 1968. – 20 с.

139 Соколовский В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М. : Гостехиздат, 1950. – 608 с.

140 Друян В. М. Напряженное состояние в очаге деформации при обкатке инструментом трения / В. М. Друян, А. В. Губинский, С. В. Альпин – Днепропетровск, 1981. – 10 с. – Деп в ин-те «Черметинфирма» 20.08.1981, № 1346.

141 Паламарчук В. А. Оптимизация технологического процесса изготовления деталей из трубчатых заготовок тангенциальной обкаткой инструментом трения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Паламарчук В. А. ; Краматорск. индустр.ин-т. – Краматорск, 1988. – 17 с.

142 Удовенко В. К. Исследование технологии и разработка оборудования для роторной обкатки трубчатых заготовок : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Удовенко В. К. ; Краматорск. индустр. ин-т. – Краматорск, 1979. – 24 с.

143 Рыжиков В. С. Исследование и совершенствование технологического процесса и оборудования для обкатки плоских и эллипсоидных днищ : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Рыжиков В. С. ; Краматорск. индустр. ин-т. – Краматорск, 1978. – 23 с.

144 Маковецкий А. В. Разработка малоотходной технологии редуцирования трубчатых заготовок инструментом трения с гребнями : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Маковецкий А. В. ; Краматорск. индустр. ин-т. – Краматорск, 1986. – 16 с.

145 Близнюков Е. А. Исследование процесса закатки тонкостенных баллонов с помощью математической модели / Е. А. Близнюков, А. И. Лисицын, С. Е. Рохман // Научно-технический прогресс в производстве труб. – М. : Metallurgia, 1987. – С. 11–14.

146 Поперечная прокатка в машиностроении / В. С. Смирнов [и др.] – М.-Л. : Машгиз, 1957. – 376 с.

147 Повышение эффективности изготовления баллонов и трубных изделий с утоненными стенками способом закатки / Е. А. Близнюков,

Д. Е. Розман, А. И. Лисицын, С. В. Окара // Повышение эффективности производства и улучшения качества труб. – М. : Metallurgiya, 1986. – С. 12–17.

148 Исследование энергосиловых параметров при занятии баллонов / В. П. Потапенко, М. Я. Бровман, В. Г. Капорович, Е. М. Белов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1967. – № 4. – С. 7–9.

149 Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка стали / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский, Л. М. Капустина. – М. : Metallurgiya, 1983. – 480 с.

150 Шевцов С. О. Удосконалення технології виробництва днищ балонів на основі обкочування інструментом тертя з підсадкою : монографія / С. О. Шевцов, О. Є. Марков, О. М. Кулік. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – 128 с. ISBN 978-966-379-836-3.

151 Федюкин В. К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В. К. Федюкин, М. Е. Смагоринский. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1989. – 255 с.

152 Самукава Ю. Влияние температуры прокатки и условий охлаждения на способность катанки деформироваться при холодной ковке / Ю. Самукава. – Тэцу то хагане, 1984. – Т. 70, № 5. – С. 533.

153 Такахаси М. Исследование по расширению диапазона прочности путем регулирования размера зерен поликристаллов / М. Такахаси, Д. Вакида, И. Эсака. – Тэцу то хаганэ, 1984. – № 5. – С. 659.

154 Мацумура Е. Формирование микроскопических зерен феррита в результате обработке с большим обжатием низкоуглеродистой стали при условиях, близких к точке Ag₃ / Е. Мацумура, Х. Яда. – Тэцу то хаганэ, 1984. – Т. 70. – № 5. – С. 654.

155 Механические свойства толстолистового проката, подвергнутого контролируемому охлаждению на линии прокатки / К. Цукада и [др.]. – Тэцу то хаганэ, 1984. – Т. 70. – № 1. – С. 89–95.

156 Капумата М. Особенности рекристаллизации аустенита в условиях регулируемой прокатки / М. Капумата, М. Махида, Х. Кадзи. – Кобэ Сэйко Гихо, 1984. – № 2. – С. 61–64.

157 Onoe Y et al. Development of the Continuous on Line Control (CLC) Process for Manufacturing High – Quality Steel Plate by Controlled Cooling. – Nippon Steel Technical Report. Desember. – 1983. – № 22. – 17 p.

158 Kattner K. Energy conservation possibilities in a heavy pear mill for flat products / K. Kattner, W. Taschner // Energy Conseious Iron-and-Steel Makins Proc. Int. Conf., 21–24 apr. 1980, London. – P. 135–144.

159 Кухар В. В. Методика розрахунку напружено-деформованого стану листової заготовки при гнутті з врахуванням зміцнення матеріалу / В. В. Кухар, О. С. Аніщенко, М. М. Нагнібеда // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. / НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії, № 37 (1259). – С. 36–41. – ISSN 2519-2671 (print).

160 Исследование влияния теплой пластической деформации на структуру и свойства сталей 45Г2, 20ХНЗА, 12Х2Н4 / В. И. Дорошко, Л. И. Карташева, А. А. Андрющук, В. К. Бирюков // Обработка металлов давлением. – Ростов-на-Дону, 1982. – С. 31–34

161 Bold T. Obrobrf cieplna stali niskostopowej z wykorzystaniem ciepła po walcowaniu na goraco / T. Bold, B. Garbarz, R. Kuziak // Pr. Inst. Metalurgii Zelaza. – 1982. – № 4. – С. 181–188. (Термическая обработка низколегированной стали с использованием тепла прокатного нагрева).

162 Применение статистических методов при обработке данных формоизменения заготовок с обкаткой в комбинированных бойках / Е. Ю. Балалаева, В. В. Кухарь, О. В. Василевский, О. А. Тузенко // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2014. – Серія : Технічні науки, Вип. 29. – С. 27–36.

163 Влияние типа микроструктуры и металлургических факторов на пластичность малоуглеродистых и низколегированных сталей при различных схемах нагружения / Б. М. Бронфин, А. А. Емельянов, С. В. Смирнов, А. В. Шифман, Е. Н. Голуб // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 10. – С. 8–9.

164 Атрошенко А. П. Повышение качества поковок из сталей 12Х2Н4А и 18Х2Р4ИА термомеханической обработкой / А. П. Атрошенко, С. А. Атрошенко, В. И. Федоров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 8. – С. 14–16.

165 Влияние размера зерна феррита на свойства конструкционных нелегированных сталей / В. К. Бабич [и др.] // Изв. АН СССР. Металлы. – 1984. – № 5. – С. 120–123.

166 Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением : справочник : пер. с нем. / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М. : Металлурги, 1982. – 360 с.

167 Скороходова Л. Г. Влияние размера зерна феррита на показатель штампуемости холоднокатаных двухфазных феррито-мартенситных сталей / Л. Г. Скороходова, Н. М. Фонштейн, С. А. Голованенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 2. – С. 12–14.

168 Бельченко Г. И. Основы металлографии и пластической деформации стали / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко. – К. : Донецк : Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 240 с.

169 Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов / А. Н. Тихонов [и др.] ; отв. ред. М. Х. Шоршоров. – М. : Наука, 1984. – 188 с.

170 Перспективы развития оборудования для промышленного производства осесимметричных металлоизделий / С. В. Капорович, С. А. Шевцов, О. Ю. Неня, А. А. Иванов // Розвиток методів розрахунку удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском

: матеріали науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті В. Ф. Потапкіна. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 43.

171 Fluhner J. Deform 3D User's Manual Version 6.0 / J. Fluhner // Scientific Forming Technologies Corporation, Columbus, OH. – 2006.

172 Паламарчук В. О. Побудова робочої поверхні інструмента тертя для обкочування трубчатих заготовок в системі автоматизованого проектування DELCAM POWERSHAPE / В. О. Паламарчук, С. О. Шевцов // Матеріали XXXVII Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку» : зб. наук. праць. – Переяслав-Хмельницький, 2017. – Вип. 37. – С. 399–402.

173 Пат. 116546 Україна, МПК (2017.01) В 21 J 5/00. Спосіб виготовлення порожнистих тонкостінних поковок / О. Є. Марков, В. М. Злигорев, А. О. Шарун, А. В. Коляденко, Г. О. Овсяннікова, С. О. Шевцов – № u201612412 ; заявл. 06.12.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10. – 4 с.

174 Красовский Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов – Мн. : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с. : ил.

175 Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов – М. : Машиностроение ; София : Техніка, 1980. – 304 с. : ил.

176 Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова – М. : Наука, 1976. – 278 с. : ил.

177 Разработка новых заготовок для поковок ответственного назначения / О. Е. Марков, А. В. Герасименко, М. С. Косилов, С. А. Шевцов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – № 2 (41). – С. 124–130.

178 Исследования процесса поперечной прокатки осесимметричных ребристых металлоизделий / С. В. Капорович, С. А. Шевцов, А. В. Гушин, О. Ю. Неня // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 146–150.

179 Волков Д. А. Выбор оптимальных режимов сварки электродами с экзотермической смесью в покрытии / Волков Д. А., А. Ф. Власов, С. А. Шевцов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – № 2 (38). – С. 58–69.

180 Автоматизированное проектирование рабочих роликов косовальковых машин для правки труб различного сортамента / Завгородний В. Г., С. А. Шевцов, Д. В. Завгородний, С. В. Чемерис // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 210–214.

181 Шевцов С. О. Математичне моделювання та оптимізація режимів зварювання електродами, котрі покрито екзотермічною сумішшю / С. О. Шевцов, Д. А. Волков // Математика у технічному університеті ХХІ сторіччя : збірник наукових праць за матеріалами дистанційної всеукраїнської наукової конференції. – Краматорск : ДДМА, 2017. – С. 281–283.

182 Паламарчук В. О. Використання статистичних методів у підготовці студентів напряму «Інформаційні технології проектування (ІТП)» / В. О. Паламарчук, С. О. Шевцов // Інноваційні педагогічні технології у підготовці майбутніх фахівців з вищою освітою: досвід, проблеми, перспективи : матеріали міжнародної науково-методичної інтернет-конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – Розділ 5.

183 Паламарчук В. О. Комплексное применение методов математической статистики в подготовке студентов направления «Информационные технологии проектирования» / В. О. Паламарчук, С. О. Шевцов, Н. С. Грудкина // Качество образования: управление, сертификация, признание : сборник научных работ международной научно-методической конференции. – Краматорск : ДГМА, 2013. – С. 107–110.

184 Металловедение и термическая обработка стали : справочник. В 3-х т. Т. 1. Методы испытаний и исследования / под ред. М. Л. Берштейна, А. Г. Рахштадта. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.

185 Паламарчук В. О. Аналіз роботи деформування заготовок при ротаційній обкатці інструментом тертя / В. О. Паламарчук, С. О. Шевцов // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : межвузовский тематический сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 1998. – Вып. № 4. – С. 310–312.

186 Малинин Н. Н. Прикладная теория ползучести : учебник для вузов / Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1975. – 400 с.

187 Аркулис Г. Э. Теория пластичности / Г. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобил. – М. : Металлургия, 1987. – 352 с.

188 Писаренко Г. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести : справочное пособие / Г. С. Писаренко, Н. С. Можаровский. – Киев : Наук. думка, 1981. – 496 с.

189 Ерхов М. И. Теория идеально пластических тел и конструкций : монография / М. И. Ерхов. – М. : Наука, 1978. – 352 с.

190 Новожилов В. В. Линейная теория тонких оболочек / В. В. Новожилов, К. Ф. Черных, Е. И. Михайловский. – Л. : Политехника, 1991. – 656 с.

191 Лизин В. Т. Проектирование тонкостенных конструкций : учеб. пособие для студентов вузов / В. Т. Лизин, Пяткин В. А. – М. : Машиностроение, 1994. – 384 с. : ил.

192 Григорьев А. С. Изгиб круглых и кольцевых пластин переменной и постоянной толщины за пределом упругости / А. С. Григорьев // Инж. сб. – 1954. – Т. XX.

193 Соколовский В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с. : ил.

194 Хоникомб Р. (Honeyscombe R.W.K.) Пластическая деформация металлов. – М. : Мир, 1972. – 396 с.

195 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при закатке сварных швов трубных заготовок для их последующей ротационной обкатки / А. Н. Кулик, С. А. Дмитриев, А. А. Сытник,

С. А. Шевцов // Обработка металлов тиском : сборник научных работ. – Краматорск : ДДМА, 2013. – № 2 (35). – С. 39–42.

196 Моделирование энергосиловых параметров процесса горячей прокатки сварных швов на основе метода верхней оценки / Ю. К. Добронос, С. А. Дмитриев, Е. А. Воротникова, С. А. Шевцов // Обработка металлов тиском : сборник научных работ. – Краматорск : ДДМА, 2011. – № 4 (29). – С. 38–43.

197 Аркулис Г. Э. Теория пластичности : учебное пособие для вузов / Г. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобит. – М. : Metallurgiya, 1987. – 352 с.

198 Математическое моделирование энергосиловых параметров при разделении металлопроката дисковыми пилами / Ищенко А. А., Шпак В. И., А. В. Послушник, С. В. Капорович, С. А. Шевцов, А. В. Левит // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ – Слов'янськ : ДДМА, 2000. – С. 103–106.

199 Ключников В. Д. Устойчивость упругопластических систем / В. Д. Ключников. – М. : Наука, 1980. – 240 с.

200 Товстик П. Е. Устойчивость тонких оболочек : асимптотические методы / Товстик П. Е. – М. : Наука. Физматлит, 1995. – 320 с.

201 Подгорный А. Н. Ползучесть и устойчивость гибких пологих оболочек вращения / А. Н. Подгорный, В. В. Бортовой, В. Д. Коломак. – Киев : Наук. думка, 1982. – 104 с.

202 Математическое моделирование энергосиловых параметров при холодной прокатке относительно толстых листов и полос / М. Я. Бровман, С. А. Шевцов, М. Е. Кокотько, А. А. Сатонин // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 492–498.

203 Серета Б. П. Обработка металлов тиском : навчальний посібник / Б. П. Серета – Запоріжжя : Видавництво Запорізької державної академії, 2009. – 343 с.

204 Колесников С. А. Температурное поле остывающей цилиндрической поковки / С. А. Колесников, А. Н. Обухов, С. А. Шевцов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 1999. – С. 124–126.

205 Технологические процессы в машиностроении : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Машиностроительные технологии и оборудование» / под общ. ред. В. А. Вагнера. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – 592 с. : ил.

206 Завгородній Д. В. Розробка рекомендацій із удосконалення та програмних засобів з автоматизованого проектування технологій та обладнання для виправлення труб і трубних заготовок на косовалкових правильних машинах / Д. В. Завгородній, С. О. Шевцов, В. Г. Завгородній // Розвиток методів розрахунку удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском : матеріали науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті В. Ф. Потапкіна. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 38.

207 Моделирование деформованого стану східчастих пустотілих поковок в процесі розкочування / М. С. Косилов, О. Є. Марков, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). С. 25–29. – (Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії).

208 Численное математическое моделирование распределений напряжений и деформаций при поперечном выдавливании осесимметричных деталей с относительно тонким фланцем / С. А. Шевцов, С. В. Капорович, Л. И. Алиева, Д. Ю. Михеенко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ – Хмельницький : ДДМА, 2002. – С. 86–90.

209 Кулик А. Н. Распределение деформаций при экспериментальном исследовании ротационной обкатки трубчатых заготовок / А. Н. Кулик,

С. А. Шевцов, Т. А. Кулик // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ – Слов'янськ : ДДМА, 2000. – С. 339–341.

210 Михеенко Д. Ю. Математическое моделирование деформированного состояния металла при прокатке с затеканием в щелевой паз / Д. Ю. Михеенко, А. А. Иванов, С. А. Шевцов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 284–287.

211 Завгородний Д. В. Методы расчета напряжений и деформаций при правке труб изгибом / Д. В. Завгородний, С. В. Новоселов, С. А. Шевцов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ – Слов'янськ : ДДМА, 2003. – С. 91–94.

212 Марков О. Є. Особливості процесу виготовлення пустотілих поковок з буртом та фланцем / О. Є. Марков, М. С. Косилов, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // *Mechanics and Advanced Technologies*. – Київ : КПІ, 2017. – № 2. – С. 85–91.

213 Упрочнение баллонов обкаткой тремя роликами / В. В. Пастернак, А. Н. Кулик, А. В. Послушник, С. В. Капорович, С. А. Шевцов, Т. А. Кулик // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 375–378.

214 Колесников С. А. Разработка, исследование и совершенствование новых конструкций механизмов изменения модуля жесткости рабочих клеток прокатных станков / С. А. Колесников, В. Н. Гойда, С. А. Шевцов // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : межвузовский тематический сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 1998. – Выпуск № 4 – С. 138–142.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача:

1 Шевцов С. О. Удосконалення технології виробництва днищ балонів на основі обкочування інструментом тертя з підсадкою : монографія / С. О. Шевцов, О. Є. Марков, О. М. Кулік. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – 128 с. ISBN 978-966-379-836-3.

Автором розроблено комплексний підхід для дослідження процесів обкочування та методів їх моделювання

2 Особливості процесу виготовлення пустотілих поковок з буртом та фланцем / О. Є. Марков, М. С. Косилов, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // Mechanics and Advanced Technologies. – Київ : КПІ, 2017. – № 2. – С. 85–91. – DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109575>

Автором визначено раціональні значення основних геометричних параметрів деформувального інструменту

3 Аналіз формозміни та деформованого стану пустотілої ступінчастої поковки в процесі розкочування / О. Є. Марков, М. С. Косилов, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // Mechanics and Advanced Technologies. – Київ : КПІ, 2017. – № 3. – С. 47–53. – DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.115224>

Автором визначено ефективні режими процесу деформування поковок з буртом

4 Паламарчук В. О. Аналіз роботи деформування заготовок при ротаційній обкатці інструментом тертя / В. О. Паламарчук, С. О. Шевцов // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : межвузовский тематический сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 1998. – Вып. № 4. – С. 310–312.

Автором досліджено впливу обкочування на розподіл деформацій та напружень

5 Кулик А. Н. Распределение деформаций при экспериментальном исследовании ротационной обкатки трубчатых заготовок / А. Н. Кулик, С. А. Шевцов, Т. А. Кулик // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ – Слов'янськ : ДДМА, 2000. – С. 339–341.

Автором встановлено розподіл деформацій та напружень у процесі ротаційного обкочування

6 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при закатке сварных швов трубных заготовок для их последующей ротационной обкатки / А. Н. Кулик, С. А. Дмитриев, А. А. Сытник, С. А. Шевцов // Обробка металів тиском : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – № 2 (35). – С. 39–42.

Автором проведено моделювання напружено-деформованого стану сварних швів при ротаційній обкатці

7 Упрочнение баллонов обкаткой тремя роликами / В. В. Пастернак, А. Н. Кулик, А. В. Послушник, С. В. Капорович, С. А. Шевцов, Т. А. Кулик // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 375–378.

Автором досліджено формозмінення заготовки при обкочуванні роликами

8 Численное математическое моделирование распределений напряжений и деформаций при поперечном выдавливании осесимметричных деталей с относительно тонким фланцем / С. А. Шевцов, С. В. Капорович, Л. И. Алиева, Д. Ю. Михеенко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ – Хмельницький : ДДМА, 2002. – С. 86–90.

Автором розроблена методика дослідження процесу поперечного видавлювання вісесиметричних деталей з фланцем

9 Завгородний Д. В. Методы расчета напряжений и деформаций при правке труб изгибом / Д. В. Завгородний, С. В. Новоселов, С. А. Шевцов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ – Слов'янськ : ДДМА, 2003. – С. 91–94.

Автором розроблена методика дослідження напружень та деформацій при правці труб

10 Колесников С. А. Температурное поле остывающей цилиндрической поковки / С. А. Колесников, А. Н. Обухов, С. А. Шевцов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 1999. – С. 124–126.

Автором розроблено математичний апарат дослідження процесу охолодження

11 Исследования процесса поперечной прокатки осесимметричных ребристых металлоизделий / С. В. Капорович, С. А. Шевцов, А. В. Гушин, О. Ю. Неня // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 146–150.

Автором розроблена методика дослідження процесу прокатування вісесиметричних металовиробів

12 Моделирование энергосиловых параметров процесса горячей прокатки сварных швов на основе метода верхней оценки / Ю. К. Доброносков, С. А. Дмитриев, Е. А. Воротникова, С. А. Шевцов // Обробка металів тиском : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 4 (29). – С. 38–43.

Автором розроблена методика дослідження процесу прокатування методом верхньої оцінки

13 Михеенко Д. Ю. Математическое моделирование деформированного состояния металла при прокатке с затеканием в щелевой паз / Д. Ю. Михеенко, А. А. Иванов, С. А. Шевцов // Удосконалення процесів і

обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 284–287.

Автором розроблена методика моделювання деформованого стану при прокатуванні з комбінованою течією металу

14 Автоматизированное проектирование рабочих роликов косовальковых машин для правки труб различного сортамента / Завгородний В. Г., С. А. Шевцов, Д. В. Завгородний, С. В. Чемерис // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 210–214.

Автором розроблено алгоритм проектування оснащення для правки труб

15 Колесников С. А. Разработка, исследование и совершенствование новых конструкций механизмов изменения модуля жесткости рабочих клетей прокатных станов / С. А. Колесников, В. Н. Гойда, С. А. Шевцов // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : межвузовский тематический сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 1998. – Выпуск № 4 – С. 138–142.

Автором розрахована жорсткість станини клітей прокатних станів

16 Моделирование деформованого стану східчастих пустотілих поковок в процесі розкочування / М. С. Косилов, О. Є. Марков, О. В. Герасименко, С. О. Шевцов // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 35 (1257). С. 25–29. – (Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії).

Автором розроблена методика моделювання деформованого стану у процесі розкочування пустотілих заготовок

17 Математическое моделирование энергосиловых параметров при холодной прокатке относительно толстых листов и полос / М. Я. Бровман, С. А. Шевцов, М. Е. Кокотько, А. А. Сатонин // Удосконалення процесів і

обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 492–498.

Автором проведено математичне моделювання процесу прокатування

18 Математическое моделирование энергосиловых параметров при разделении металлопроката дисковыми пилами / Ищенко А. А., Шпак В. И., А. В. Послушник, С. В. Капорович, С. А. Шевцов, А. В. Левит // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ – Слов'янськ : ДДМА, 2000. – С. 103–106.

Автором проведено математичне моделювання процесу різки труб

19 Пат. 86619 Україна, МПК (2014.01) B21D 51/00. Спосіб виготовлення корпусів балонів / Сатонін О. В., Кулік О. М., Дмитрієв С. А., Шевцов С. О. – № u201306940; заявл. 03.06.2013; опубл. 10.01.2014, бюл. № 1.

Автором обґрунтовано використання нових способів виготовлення корпусів балонів

20 Пат. 116546 Україна, МПК (2017.01) B 21 J 5/00. Спосіб виготовлення порожнистих тонкостінних поковок / О. Є. Марков, В. М. Злигорев, А. О. Шарун, А. В. Коляденко, Г. О. Овсяннікова, С. О. Шевцов – № u201612412 ; заявл. 06.12.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10. – 4 с.

Автором обґрунтовано новий спосіб виготовлення порожнистих тонкостінних поковок

21 Завгородній Д. В. Розробка рекомендацій із удосконалення та програмних засобів з автоматизованого проектування технологій та обладнання для виправлення труб і трубних заготовок на косовалкових правильних машинах / Д. В. Завгородній, С. О. Шевцов, В. Г. Завгородній // Розвиток методів розрахунку удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском : матеріали науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті В. Ф. Потапкіна. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 38.

Автору належить розробка алгоритмів автоматизованого проектування технологій правки труб

22 Перспективи розвитку обладнання для промислового виробництва осесимметричних металлоизделий / С. В. Капорович, С. А. Шевцов, О. Ю. Неня, А. А. Иванов // Развитие методов расчёта усовершенствования технологий та обладнання процесів обробки металів тиском : матеріали науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті В. Ф. Потапкина. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 43.

Автором проведено аналіз літературних даних

23 Розробка нових заготовок для поковок відповідального призначення / О. Є. Марков, О. В. Герасименко, М. С. Косілов, С. О. Шевцов // Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, 25–28 вересня 2017 р. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – С. 88 – 89.

Автором проведено проектування нових заготовок для поковок відповідального призначення

24 Паламарчук В. О. Побудова робочої поверхні інструмента тертя для обкочування трубчатих заготовок в системі автоматизованого проектування DELCAM POWERSHAPE / В. О. Паламарчук, С. О. Шевцов // Матеріали XXXVII Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку» : зб. наук. праць. – Переяслав-Хмельницький, 2017. – Вип. 37. – С. 399–402.

Автором проведено проектування інструменту нової геометрії для обкочування трубчатих заготовок

25 Паламарчук В. О. Використання статистичних методів у підготовці студентів напряму «Інформаційні технології проектування (ІТП)» / В. О. Паламарчук, С. О. Шевцов // Інноваційні педагогічні технології у підготовці майбутніх фахівців з вищою освітою: досвід, проблеми, перспективи : матеріали міжнародної науково-методичної інтернет-конференції. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – Розділ 5.

Автором розроблена методика статистичної обробки

26 Паламарчук В. О. Комплексное применение методов математической статистики в подготовке студентов направления «Информационные технологии проектирования» / В. О. Паламарчук, С. О. Шевцов, Н. С. Грудкина // Качество образования: управление, сертификация, признание : сборник научных работ международной научно-методической конференции. – Краматорск : ДГМА, 2013. – С. 107–110.

Автором розглянуті методи статистичної обробки для студентів з напрямку інформаційних технологій

27 Шевцов С. О. Математичне моделювання та оптимізація режимів зварювання електродами, котрі покриті екзотермічною сумішшю / С. О. Шевцов, Д. А. Волков // Математика у технічному університеті ХХІ сторіччя : збірник наукових праць за матеріалами дистанційної всеукраїнської наукової конференції. – Краматорск : ДДМА, 2017. – С. 281–283.

Автором проведена оптимізація режимів зварювання

Додатково наукові результати дисертації відображені у роботах:

28 Разработка новых заготовок для поковок ответственного назначения / О. Е. Марков, А. В. Герасименко, М. С. Косилов, С. А. Шевцов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – № 2 (41). – С. 124–130.

Автором розроблена методика моделювання процесу розкочування пустотілих заготовок

29 Волков Д. А. Выбор оптимальных режимов сварки электродами с экзотермической смесью в покрытии / Волков Д. А., А. Ф. Власов, С. А. Шевцов // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – № 2 (38). – С. 58–69.

Автором проведені оптимізаційні розрахунки режимів зварювання

ДОДАТОК Б

Апробація результатів дисертаційної роботи на міжнародних конференціях

1 Науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті В. Ф. Потапкіна «Розвиток методів розрахунку удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском» 25–27 квітня 2007 р. м. Краматорськ ДДМА, очна форма участі

2 VI Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві» 25–29 вересня 2017 р. Краматорськ ДДМА, очна форма участі

3 XXXVII Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку» 17 листопада 2017 Переяслав-Хмельницький, заочна форма участі

4 Міжнародна науково-методична інтернет-конференція «Інноваційні педагогічні технології у підготовці майбутніх фахівців з вищою освітою: досвід, проблеми, перспективи» 20–23 травня 2014 Вінниця, заочна форма участі

5 XX Международная научно-методическая конференция «Достижения и проблемы развития технологий и машин обработки давлением» посвящена 60-летию кафедры ОМД им. Л.Н. Соколова 24-24 апреля 2017 г. Краматорск ДГМА, очна форма участія.

6 Дистанційна всеукраїнська наукова конференція «Математика у технічному університеті XXI сторіччя» 15-16 травня 2017 Краматорск ДДМА, заочна форма участі

ДОДАТОК В

Методика статистичної обробки тарифовочних графіків

Тарирування тензOMETричної апаратури проводили триразово перед проведенням експериментальних досліджень. Далі визначали:

- дисперсії в кожному рядку S_i^2

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (l_i - l_{ij})^2,$$

де n – число повторень випробувань;

l_i – середнє значення відхилення світowego променя в кожній точці випробувань;

l_{ij} – значення відхилення світowego променя, що досліджується;

- за критерієм Кохрена перевіряли однорідність дисперсій, при цьому розраховували значення σ -критерію

$$\sigma = S_{i\max}^2 / \sum_{i=1}^N S_i^2,$$

де N – кількість точок, що досліджувалися, і порівнювали його з табличними даними, що мають ступені свободи $f_1 = N$ та $f_2 = n - 1$;

- визначали дисперсію відтворення

$$S_{\{l\}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2;$$

- розраховували довірчий інтервал для значень відхилень світowego променя

$$\Delta l = \pm \frac{1}{\sqrt{N}} t_{\text{табл}} S_{\{l\}}^2,$$

де $t_{\text{табл}}$ – значення критерію Стюдента, що має $f = N(m-1)$ ступенів свободи;

- рівняння тарировочного графіка визначали у вигляді $y = kl$

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N y_i l_i}{\sum_{i=1}^N l_i^2};$$

- довірчий інтервал для параметра y визначали за формулою

$$\Delta y = \pm k \Delta l;$$

- похибку експериментальних значень параметра, що досліджується, визначали за формулою

$$\delta = \Delta y \cdot 100\% / y_{\text{max}},$$

де y_{max} – максимальне значення параметра y .

ДОДАТОК Г

Акти впровадження результатів роботи



Утверждаю:

Директор УкрНИИМеталлургмаш

Тимченко В.В.

" " 2006г.

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Результаты диссертационной работы Шевцова Сергея Александровича, посвященной разработке, исследованию и совершенствованию технологий и оборудования по производству баллонов повышенной прочности и герметичности на основе ротационной обкатки, а именно:

- технологические схемы производства баллонов повышенной прочности и герметичности с использованием процесса ротационной обкатки;
- методы расчета процесса ротационной обкатки баллонов повышенной прочности и герметичности;
- практические рекомендации по совершенствованию технологических режимов, а также состава и конструктивных параметров механического оборудования для производства баллонов повышенной прочности и герметичности

были использованы в Украинском научно-исследовательском институте металлургического машиностроения при выполнении ряда научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ, а также при производстве опытно-промышленной партии баллонов и ёмкостей для средств пожаротушения.

Использование данных результатов позволило уточнить и расширить в объеме исходные данные, сократить сроки и повысить качество проектных работ, а также снизить удельные капитальные затраты и сроки освоения.

Зам. Директора по научно-исследовательским
и опытно-конструкторским работам



А.Н. Бойденко

АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
НОВО-КРАМАТОРСЬКИЙ
МАШИНОБУДІВНИЙ
ЗАВОД



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
НОВО-КРАМАТОРСКИЙ
МАШИНОСТРОТЕЛЬНЫЙ
ЗАВОД

НКМЗ, м. Краматорськ, Донецька область, 84305, УКРАЇНА тел. (06264)7-88-00, факс (06264)7-22-49, телетайп 330171
E-mail: ztm/nkmz.donetsk.ua, http://www.NKMZ.com

№ _____

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Комісія у складі представників ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ): головний металург ПрАТ «НКМЗ» к.т.н. В. М. Злигорєв, начальник бюро крупних поковок к.т.н. І. А. Грачов, начальник ковальсько-пресового цеха М. В. Олешко склали цей акт в тім, що в результаті проведених спільних наукових досліджень та опитно-промислових апробацій на ПрАТ «НКМЗ» у рамках науково-практичного договору о співдружності впроваджені на ПрАТ «НКМЗ» наступні результати дисертаційних робіт О. В. Герасименко, М. С. Косілова та С. О. Шевцова:

1. Нові ресурсозберігаючі технологічні процеси кування крупних поковок відповідального призначення з використанням спеціального інструменту, що сприяє зменшенню витрат металу, зниженню витрат, пов'язаних з механічною обробкою та покращенню якості виробів. Рекомендації з розробки нових енергозберігаючих технологічних процесів кування крупних поковок, креслення спеціального оснащення для розкочування та механічні режими кування. Нові технологічні процеси кування забезпечили наближення форми поковки до форми деталі, що зменшило час подальшої механічної обробки деталі на 20% і дозволило заощадити близько 10% електроенергії. Все це дозволило забезпечити зниження собівартості виготовлення крупних поковок на 10-15% та покращити механічні властивості в середньому на 5-10%.

2. Удосконалені ресурсозберігаючі технологічні процеси виготовлення пустотілих поковок із внутрішніми буртами відповідального призначення, які передбачають використання операції заковування дна. Запропоновані нові процеси покращують проробку структури металу заготовки та сприяють заварюванню внутрішніх свищів за рахунок деформування інструментом із криволінійним профілем. Запропоновані рекомендації з розробки нових технологічних процесів виготовлення поковок із дном та термомеханічні режими деформування. Розроблений новий технологічний процес забезпечив підвищення якості металу днища та зменшення відсотку браку на 20...30 %, що дозволило забезпечити зниження витрат при виготовленні пустотілих заготовок. Механічні властивості днища покращилися в середньому на 9...14 %.

Акт призначений для спеціалізованих вчених рад з захисту дисертацій та не є основою для висунення фінансових вимог.

Головний металург ПрАТ «НКМЗ», к.т.н.



В.М. Злигорев

Начальник бюро крупних поковок, к.т.н.



І. А. Грачов

Начальник ковальсько-пресового цеха





М. В. Олешко



ДОДАТОК Д

Акти впровадження результатів роботи у навчальний процес

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
Донбаської державної
машинобудівної академії
А.М. Фесенко



« 06 » травня 2018

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
аспіранта Шевцова Сергія Олександровича на тему
«Удосконалення технології виробництва балонів на основі комбінування
ротаційного обкочування інструментом тертя з підсадкою днища»
у навчальний процес**

Члени комісії у складі завідувача кафедри «Обробка металів тиском» (ОМТ), професора, д.т.н. Алієва І. С. та завідувача кафедри «Механіка пластичного формування» МПФ, професора, д.т.н. Маркова О. Є. склали цей акт про те, що на кафедрах ОМТ та МПФ Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА) в період 2016–2018 р.р. Шевцовим С. О. були впроваджені у навчальний процес методичні матеріали, що увійшли до лекцій, практичних та лабораторних робіт наступних дисциплін: «Спеціальні види обробки металів тиском», «Спецкурс за напрямком магістерської підготовки». В наведених дисциплінах використані результати теоретичних та експериментальних досліджень, які були виконані аспірантом С. О. Шевцовим при підготовці дисертаційної роботи:

- новий спосіб обкочування пустотілих заготовок з підсадкою днища, який підвищує якість виробів відповідального призначення;
- методика проектування технологічних процесів обкочування та підсадки днищ, яка дозволяє визначити геометрію деформуючого інструменту і режими деформування для максимального заковування осьових дефектів;
- нові технологічні процеси обкочування пустотілих заготовок із застосуванням операцій підсадки сферичних днищ, які підвищили якість металопродукції.

Науково-практичні розробки, отримані Шевцовим С. О. при виконанні кандидатської дисертаційної роботи, використані в методичних вказівках з курсового та дипломного проектування на кафедрах ОМТ та МПФ, а також використовуються в НДР студентів та магістрів кафедр.

Зав. кафедри ОМТ,
проф. д.т.н.



І. С. Алієв

Зав. кафедри МПФ,
проф. д.т.н.



О. Є. Марков