

Медведєв М. І., Бобух О. С., Красюк А. В., Ниткін Ю. В., Квак Б. І.

**Математичне моделювання процесу пресування труб із використанням пакету QForm**

Medvediev M.I., Bobukh O.S., Krasiuk A.V., Nytkin Yu.V., Kvak B.I.

**Mathematical modeling of the pipe pressing process using the QForm package**

**Анотація. Мета роботи.** Створення математичної моделі процесу гарячого пресування труб, розробка та вдосконалення технології та конструкції технологічного інструменту шляхом визначення залежностей між температурно-деформаційними та пластичними характеристиками металу в умовах інтенсивної пластичної деформації. **Методика досліджень.** В основу математичної моделі покладена система рівнянь, що включає рівняння рівноваги, рівняння зв'язку між полем швидкостей матеріальних точок і швидкостей деформацій, рівняння зв'язку між напруженням і деформованим станом, умова несжимаемости, критерій пластичності, рівняння енергетичного. Опір деформації матеріалу заготівлі вважається залежним від накопиченої деформації, поточної швидкості деформації та температури. **Результати.** Моделювання процесу пресування труб проведено для сталей аустенітного класу 12X18H10T та феритного класу 12x13 для труб розмірами 45x4.0-5.0 мм, 88,9x6,45 мм, 114x6,88 мм та 219x 7.0-8. У даній моделі використовували закон тертя Леванова А. Н., за яким коефіцієнт тертя на поверхні метал-інструмент знаходиться в межах 0,015-0,02. Перевірка адекватності моделі проведена за геометричними параметрами пресованих виробів (труб 45x4,5 мм і сили пресування для труб розмірами 45x4.0-5.0 мм, 114x6,88 мм і 219x 7.0-8.0 мм. Аналіз результатів моделювання процесу, швидкість закінчення, нормальні та дотичні напруження. **Наукова новизна.** Вперше отримані дані розподілу температури, ступеня та швидкості деформації, нормальних та дотичних напружень в осередку деформації при пресуванні труб з використанням методу кінцевих елементів, що відрізняється урахуванням експериментально визначених реологічних властивостей сталей та комплексного обліку закономірностей та особливостей пружно-пластичного, теплового та кінемату. **Практична значимість.** Використання отриманих даних дозволяє визначити раціональні температурно-деформаційні та швидкісні параметри пресування труб, що забезпечують мінімізацію ймовірності утворення дефектів на поверхні виробів.

**Ключові слова.** Пресування, деформація, моделювання, труба, нержавіюча сталь, напруження.

**Abstract.** Purpose of the work. Creation of a mathematical model of the process of hot pressing of pipes, development and improvement of the technology and design of the technological tool by determining the dependencies between the temperature-deformation and plastic characteristics of the metal under conditions of intensive plastic deformation. **Research methodology.** The mathematical model is based on a system of equations, which includes the equilibrium equation, the equation of connection between the velocity field of material points and deformation rates, the equation of connection between the stressed and deformed state, the incompressibility condition, the plasticity criterion, the energy equation. The resistance to deformation of the workpiece material is considered to depend on the accumulated deformation, the current deformation rate and temperature. **Results.** The modeling of the pipe pressing process was carried out for steels of austenitic class 12X18N10T and ferritic class 12x13 for pipes with dimensions of 45x4.0-5.0 mm, 88.9x6.45 mm, 114x6.88 mm and 219x 7.0-8. This model used the friction law of Levanov A.N., according to which the coefficient of friction on the metal-tool surface is within 0.015-0.02. The adequacy of the model was checked using the geometric parameters of the pressed products (pipes 45x4.5 mm and pressing forces for pipes with dimensions 45x4.0-5.0 mm, 114x6.88 mm and 219x 7.0-8.0 mm. Analysis of the results of the process modeling, completion speed, normal and tangential stresses. **Scientific novelty.** For the first time, data on the distribution of temperature, degree and rate of deformation, normal and tangential stresses in the deformation center during pipe pressing were obtained using the finite element method, which is distinguished by taking into account experimentally determined rheological properties of steels and comprehensive accounting of the regularities and features of elastic-plastic, thermal and kinematics. **Practical significance.** The use of the obtained data allows us to determine rational temperature-deformation and speed parameters for pressing pipes, which ensure the minimization of the probability of defects on the surface of the products.

**Key words.** Pressing, deformation, modeling, pipe, stainless steel, stress.

Введення. В даний час найбільш ефективним, а часто і єдино можливим, способом виробництва труб з корозійностійких сталей і низько пластичних матеріалів є процес гарячого пресування на горизонтальних гідравлічних пресах [1-5]. При розробці технології пресування труб із різних сталей та сплавів незмінно доводиться вирішувати питання

вибору оптимальних температурно-деформаційних параметрів, що дозволяють вести процес без порушення суцільності металу. Існуючі в даний час методи розрахунку температурно-деформаційних параметрів, що визначаються на основі механічних випробувань [6-8], а не опору деформації з урахуванням охолодження металу за час транспортних

© Medvediev M.I. – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine  
Bobukh O.S. – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine  
Krasiuk A.V. – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine  
Nytkin Yu.V. – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine  
Kvak B.I. – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine



This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

операцій, не моделюють схему напруженого стану процесу пресування труб і не дозволяють достовірно прогнозувати поведінку металу в процесі деформації. Використаних у цій роботі, є математичне моделювання засноване на методі кінцевих елементів, а саме програмного продукту QForm [11,12]

#### **QForm (опис програмного продукту)**

Програма QForm призначена для математичного моделювання методом кінцевих елементів технологічних процесів обробки металів тиском з урахуванням термомеханічних процесів нагрівання та охолодження металу, у тому числі, в процесі деформації, а також взаємодії заготовівлі, що деформується, з технологічним інструментом. [11,12].

Математичне моделювання здійснюється на основі методу кінцевих елементів і системи рівнянь, що включає рівняння рівноваги, рівняння зв'язку між полем швидкостей матеріальних точок та швидкостей деформацій, рівняння зв'язку між напруженим та деформованим станом, умова стискання, критерій пластичності, рівняння енергетичного. Реологічні властивості матеріалу заготовівлі залежать від накопиченої деформації, швидкості деформації та температури та задається таблично або у

вигляді формули [11]. Матеріал вважається ізотропним та ізотропно зміцнюваним. Тертя на контакті між інструментом та заготовівлею враховується моделями тертя Зібеля, Леванова [13], Кулона

#### **Методика досліджень.**

Створення математичної моделі процесу пресування труб.

#### **Геометрія елементів математичної моделі**

Початкова задача при створенні математичної моделі будь-якого процесу обробки металів тиском полягає у створенні геометрії деформуючого інструменту та деформованого матеріалу.

Для виконання поставленої задачі математичну модель процесу пресування представили з 5 компонентів (4 відносяться до інструменту та заготовівлі) рис 1 – 5 (на малюнках зображені елементи, які використовуються при створенні математичної моделі для отримання труб розміром 45х4 мм).

Для матричних кілець при пресуванні труб розмірами 45х4 мм, 45х4,5 мм, 88,9х6,45 мм, 114,3х6,88 мм та 219х7-8 мм, використовували основні розміри пресового інструменту фірми SMS MEER.

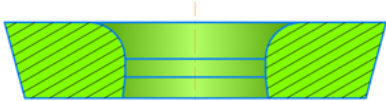


Рис.1. -Калібрування матричного кільця.

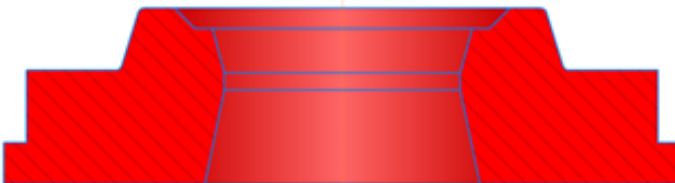


Рис.2 -геометрія матрицетримача.

Матрицетримач вибирали щодо діаметра контейнера. Для труб розмірами 45х4-5,0 мм, 45х4,5 мм, 88,9х6,45 мм, 114,3х6,88 мм, 219х7,0-8,0 мм -

використовували основні розміри матрицеутримувачів пресів фірми SMS MEER

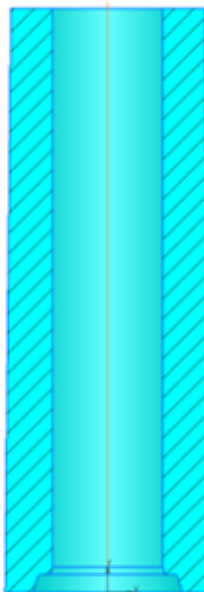


Рис.3-Геометрія контейнера

При математичному моделюванні процесу пресування достатньо геометрії внутрішньої втулки контейнера (надалі "контейнер").

Для труб розмірами 45х4,0-5,0 мм, 88,9х6,45 мм, 114,3х6,88 мм та 219х7,0-8,0 мм-основні розміри контейнерів пресів фірми SMS MEER.

У даній математичній моделі голка та прес штемпель об'єднані в один інструмент, що деформує (надалі "голка").

Геометричні розміри заготовок під час пресування труб кожного типорозміру визначали для кожного контейнера з урахуванням зазору між внутрішньою втулкою та зовнішнім діаметром заготовки.

На рис.6 представлена схема пресування труб (рис. 6 а) та схема її реалізації в програмному продукті (ПП) QForm (рис. 6 б).

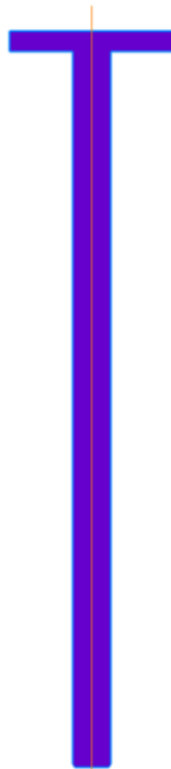


Рис.4 -геометрія голки

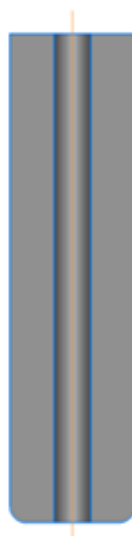


Рис.5 -геометрія заготівлі (гільзи).

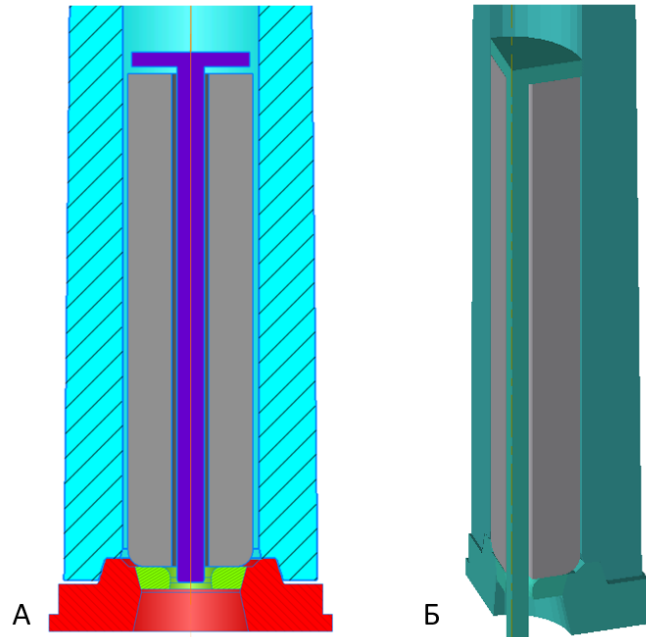
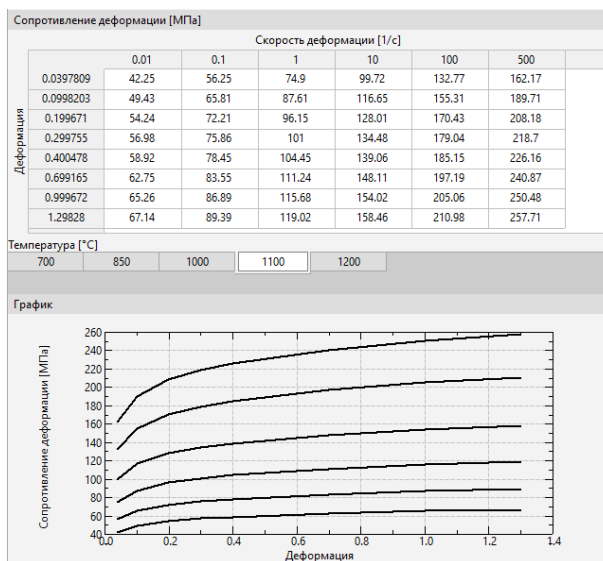


Рис.6 – Схема процесу пресування труб (а) та її відображення у ПП QForm (б)

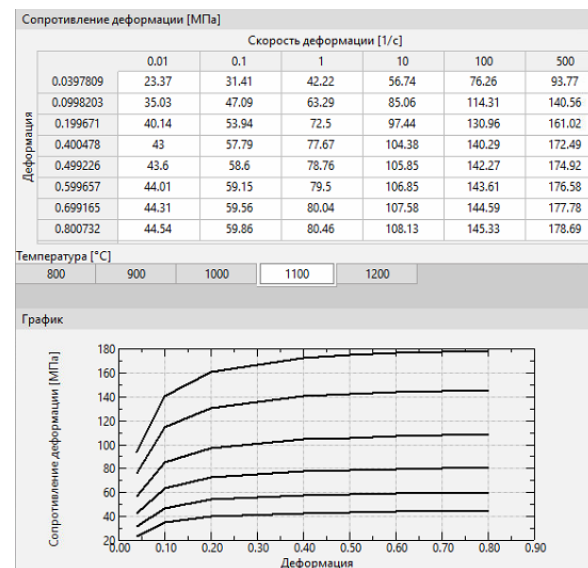
## 2. Властивості матеріалу, що деформується (параметри заготівлі)

Моделювання процесу пресування труб проводили на наступних матеріалах 12X18H10T та 12X13.

Для матеріалів 12X18H10T (рисунок 7, а) та 12X13 (рисунок 7, б) опір деформації вводилося в табличному вигляді залежно від температури, ступеня та швидкості деформації [14].



а)



б)

Рис. 7 – Характеристики марок сталей: а – 12X18H10T, б – 12X13

Крім опору деформації моделі враховували такі властивості металу: щільність, теплопровідність, теплоємність, модуль Юнга.

Для кожного з розглянутих режимів деформації задавалася початкова температура металу та інструменту згідно з рекомендаціями роботи [5]

## 3. Параметри інструмента

У математичних моделях для інструменту було обрано марку сталі – 4X5MΦC.

Матриця, матрицеутримувач та контейнер були жорстко закріплені (не мали можливості переміщення).

Швидкість переміщення голки кожного математичного моделювання приймали відповідно до рекомендаціями работ[2,3]

Для деформуючого інструменту задавалася наступна первісна температура:

матриця 200С ;  
матрицетримач 50 °С;

контейнер 3500С :  
голка 250 °С.

#### 4. Параметри розрахунку

При дискретизації середовища реальний безперервний об'єкт замінювали об'єднанням кінцевої множини малих за розміром областей (кінцевих

елементів), у кожній з яких функцію апроксимували поліномами низьких ступенів. Кінцеві елементи взаємодіють між собою в обмеженій кількості точок, званих вузлами КЕ, і відрізняються розмірністю, геометричною формою та ступенем апроксимації.

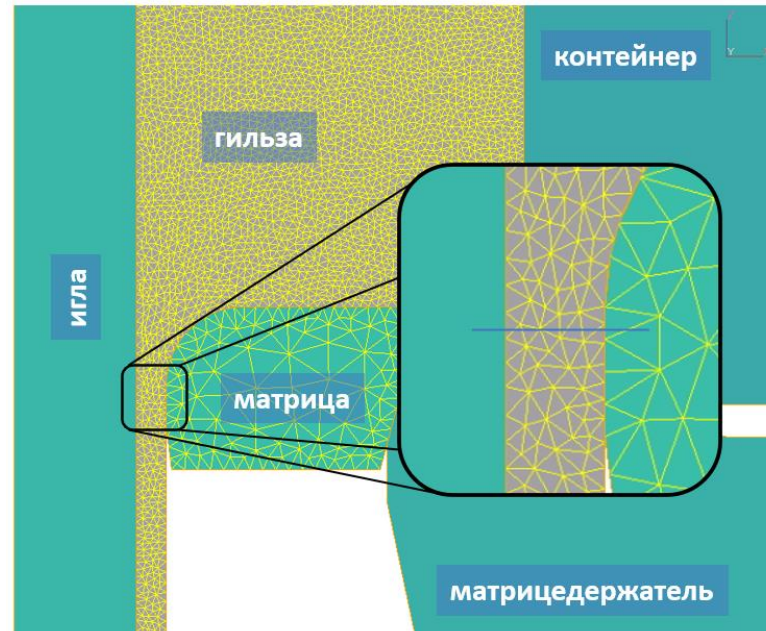


Рис. 8 – Розбивка гільзи на кінцеві елементи

З даних, наведених малюнку 8 слід, що у поперечному переріз вогнища деформації перебувають приблизно 6 КЕ. Подальше збільшення їх кількості не призведе до отримання точніших результатів.

#### 5 Основні параметри для моделювання процесу пресування труб

| № | Розмір труби, мм | Марка сталі | Діаметри, мм |       |                | Гільза, мм |          |      | Швидкість прес-ня, мм/с | Тем-ра, °С | Коеф-нт витяжки |
|---|------------------|-------------|--------------|-------|----------------|------------|----------|------|-------------------------|------------|-----------------|
|   |                  |             | матриці      | голки | контейнера, мм | $D$        | $D_{вн}$ | $L$  |                         |            |                 |
| 1 | 45x4             | 08X18H10T   | 46,1         | 37,4  | 156            | 152        | 45       | 565  | 140                     | 1150       | 33,61           |
| 2 | 45x4,5           | 08X18H10T   | 46,1         | 36,4  | 156            | 152        | 45       | 637  | 140                     | 1150       | 28,46           |
| 3 | 88,9x6,45        | 12X13       | 91,12        | 76,2  | 195            | 191        | 84       | 894  | 180                     | 1150       | 14,43           |
| 4 | 114,3x6,88       | 12X13       | 117,6        | 101   | 266            | 259        | 112      | 736  | 190                     | 1140       | 19,30           |
| 5 | 219x7            | 12X18H10T   | 224,48       | 208,2 | 372            | 366        | 220      | 1092 | 180                     | 1160       | 14,83           |
| 6 | 219x8            | 12X18H10T   | 224,48       | 206,4 | 372            | 366        | 220      | 915  | 190                     | 1160       | 13,44           |
| 7 | 273x8            | 12X18H10T   | 279,82       | 261   | 372            | 366        | 270      | 1299 | 250                     | 1160       | 8,12            |
| 8 | 273x9            | 12X18H10T   | 279,82       | 259,2 | 372            | 366        | 270      | 1160 | 250                     | 1160       | 7,28            |

#### 6. Тертя на контакті метал-інструмент .

У цій моделі на поверхні метал-інструмент використовували закон тертя Леванова, яким фактор тертя (коефіцієнт тертя) перебуває у діапазоні значень 0,015-0,02 [13].

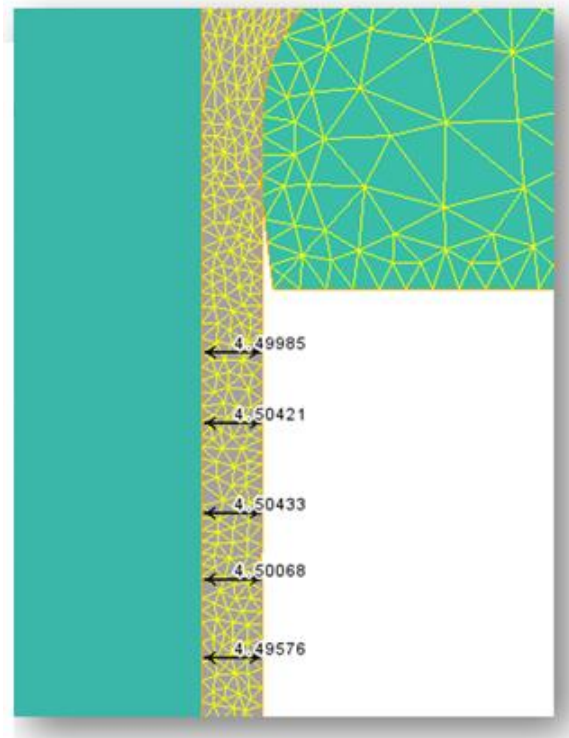
Перевірка адекватності математичної моделі .

Для перевірки адекватності математичної моделі процесів обробки металів тиском використані геометричні параметри виробу, що одержується, і сила, що виникає при деформації.

1 За геометрією виробу (труби) після процесу пресування .

На рис .9 наведено виміри товщини стінки труби 45x4,0 мм.



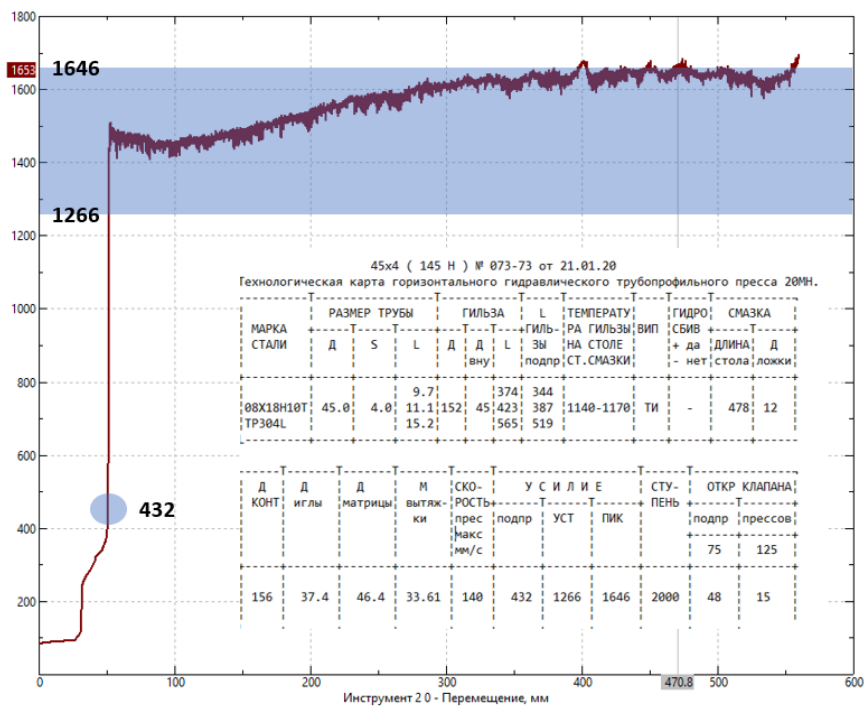


Мал. 9 – Товщина стінки труби 45x4 мм у ПП QForm .

У всіх аналізованих маршрутах пресування труб відхилення за геометричними параметрами не перевищило 1,5%, що підтверджує адекватність моделі.

## 2. За силою пресування .

Инструмент 2.0 - Усилие, тс



В.

Рис. 10 – Графік розподілу сили пресування залежно від переміщення голки для труби 45x4 мм

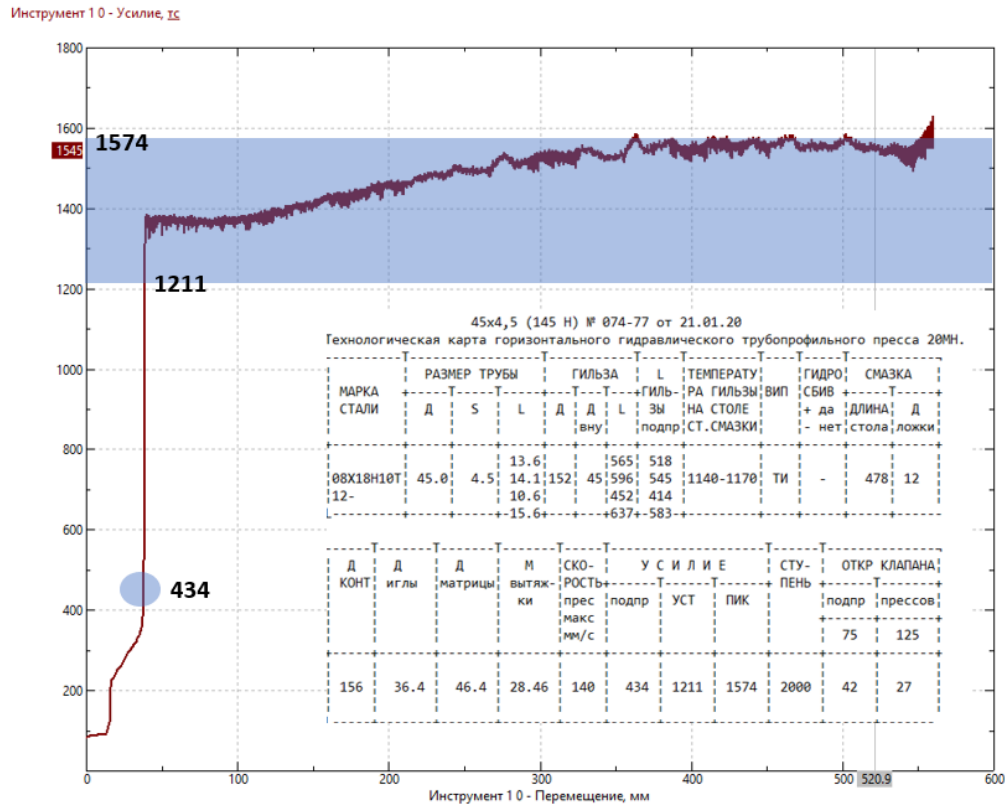


Рис. 11 – Графік розподілу сили пресування залежно від переміщення голки для труби 45x4,5 мм

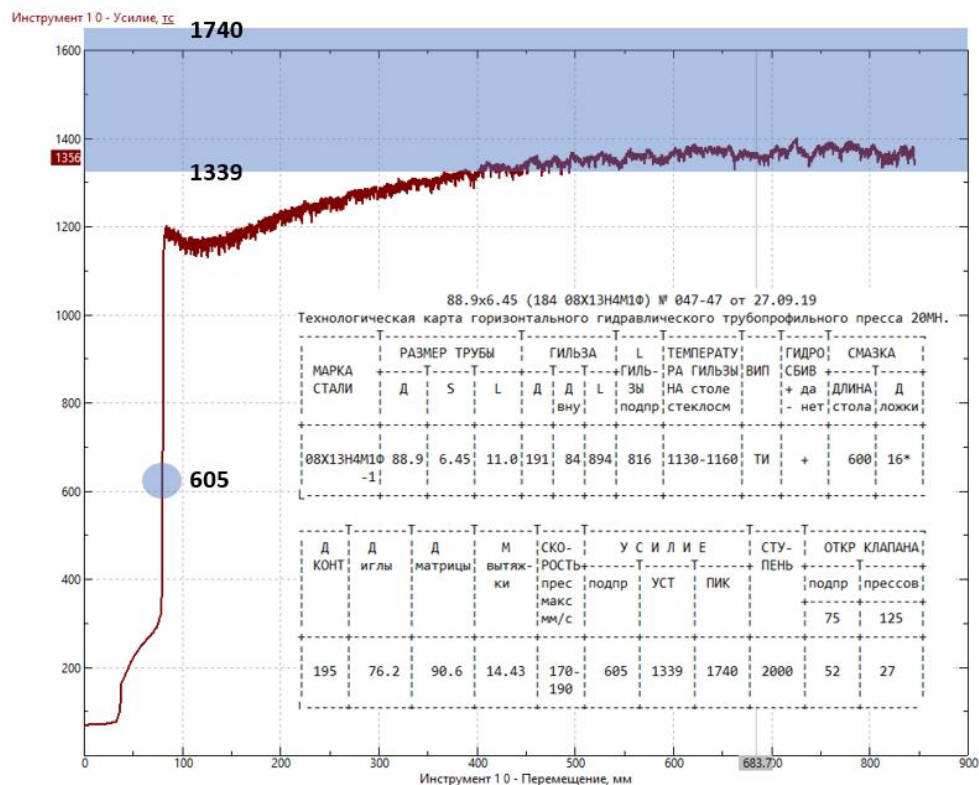


Рис. 12 – Графік розподілу сили пресування, залежно від переміщення голки для труби. 88,9 х6, 45 мм

На рисунках 10, 11 та 12 представлені графіки сили пресування для труб розмірами 45x4, 45x4,5 та 88,9x6,45 мм відповідно, на які накладені діапазони сил у технологічних картах. Як впливає із

графічних залежностей рис. 10-12 розрахункові дані сил пресування знаходяться в діапазоні сил, наведених у технологічних картах, що свідчить про адекватність представленої моделі. Зростання сил

у стадії процесу пресування пов'язані з превалюючим впливом охолодження заготівлі над деформаційним розігрівом з допомогою роботи деформації.

Аналогічна картина має місце і для труб розмірами 114,3х6,88 мм, 219х7 мм, 219х8 мм, на які накладені діапазони пікових сил і сил пресування в процесі, наведені в технологічних картах. При цьому розрахункові дані сил пресування як пікових,

так і встановилися практично знаходяться в діапазоні сил, наведених в технологічних картах, що свідчить про адекватність представленої моделі. Зростання сил у стадії процесу для труб 114х6,88 мм зі сталі феритного класу дуже незначне і пов'язане з превалюючим впливом охолодження заготовок порівняно з деформаційним розігрівом

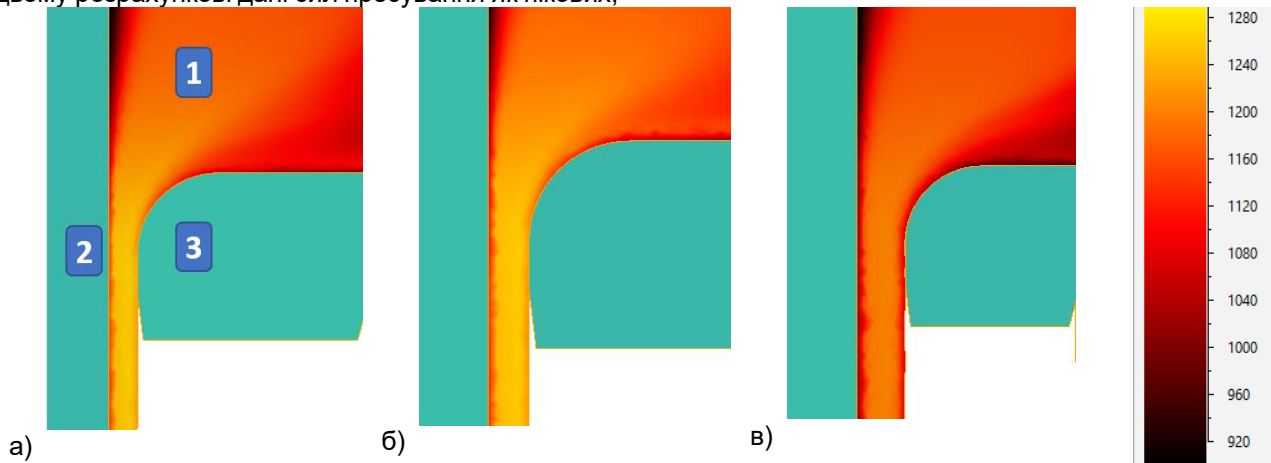


Рис. 13. Температура металу в осередку деформації при моделюванні пресування труб розмірами: а – 45х4 мм; б - 45х4, 5 мм; в - 88,9 х6, 45 мм (де: 1 - гільза, 2 - голка, 3 - матриця).

#### 4 Аналіз отриманих даних.

Для дослідження процесу пресування вибрали такі характеристики:

- температура металу;
- середня напруга;
- швидкість деформації;
- швидкість закінчення металу;
- нормальні та дотичні напруги.

##### 1. Температура металу .

На рис. 13 представлено розподіл температури ( $^{\circ}\text{C}$ ) по осередку деформації на прикладі моделювання процесу пресування труб розмірами 45х4 мм, 45х4,5 мм та 88,9х6,45 мм.

Як впливає з даних, наведених на рис. 13 температура металу в осередку деформації досягає

свого максимуму в його вихідному перерізі. При цьому максимальні значення температури характерні для труб, що пресуються з більш високими значеннями коефіцієнта витяжки і відповідно більш високим деформаційним розігрівом металу, що може призводити до утворення поверхневих дефектів внаслідок оплавлення меж зерен деформованого металу [5] .

##### 2 . Середня напруга

На рис. 14 представлено розподіл середньої напруги (МПа) в металі при моделюванні процесу пресування труб 45х4 мм, 45х4,5 мм і 88,9х6,45 мм відповідно.

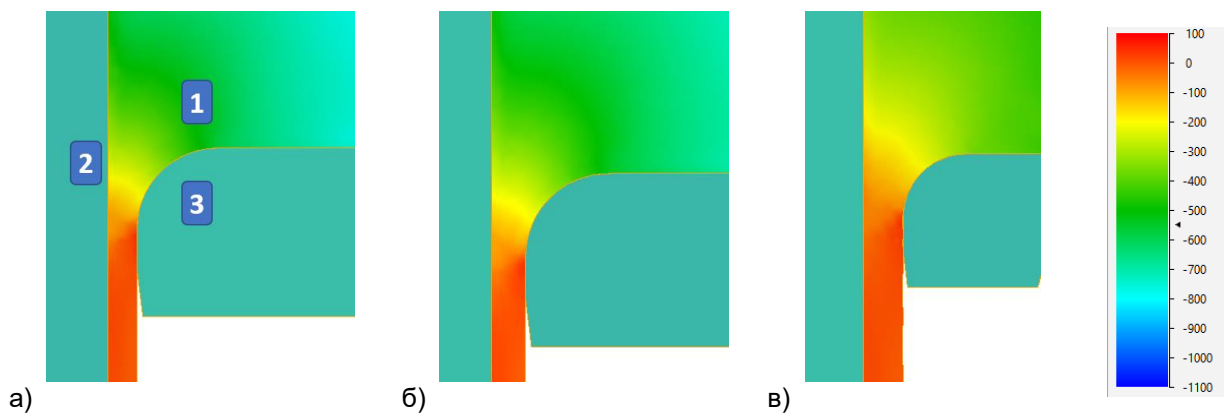


Рис. 14 . розподіл середньої напруги в осередку деформації для труб розмірами: а – 45х4 мм; б - 45х4, 5 мм; в - 88,9 х6, 45 мм (де: 1 - гільза, 2 - голка, 3 - матриця).



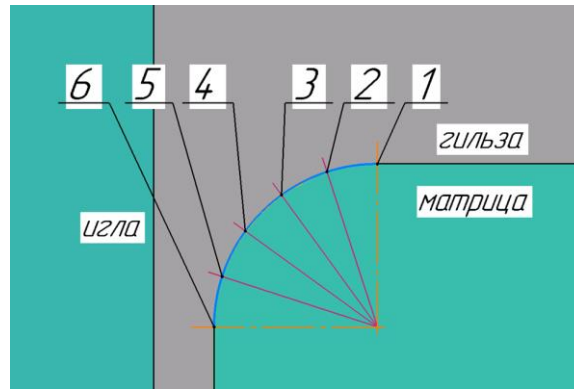


Рис 15 – Схема поділу осередку деформації на контрольні перерізи.

Для аналізу середніх напруг вибрали схему, представлену на рис.15. Середню напругу розглянули в 6 контрольних точках, які знаходяться в шарах металу на контакті з інструментом. Позиції контрольних точок (рис. 15) розташовані на рівній відстані один від одного по довжині кола, утвореного радіусом матриці, починаючи від горизонтальної поверхні до калібруючого пояса.

У таблиці 1. представлені дані розподілу середньої напруги (МПа) для описаних вище маршрутів.

На рис. 16. наведено діаграму розподілу середніх напруг у контрольних точках для розглянутих маршрутів пресування. Аналіз розподілу середніх

напруг показує, що з просування металу до вихідного перерізу вогнища деформації середні напруги змінюють знак, тобто. від стискаючих переходять до тих, що розтягують. Це може призвести до порушення суцільності металу та утворення дефектів. Характер розподілу середніх напруг по довжині деформуючої зони матриці практично лінійний за винятком точки 6, що вимагає внесення коригувань калібрування матричного кільця.

3 Швидкість деформації.

На рис.17 представлено розподіл швидкості деформації (1/с) у металі при пресуванні труб 45x4 мм, 45x4,5 мм та 88,9x6,45 мм відповідно.

Таблиця 1. - Розподіл середніх напруг (МПа)

| Контрольні точки | Розміри труб, мм |        |           |
|------------------|------------------|--------|-----------|
|                  | 45x4             | 45x4,5 | 88,9x6,45 |
| 1                | -547             | -548   | -356      |
| 2                | -451             | -439   | -279      |
| 3                | -356             | -335   | -216      |
| 4                | -269             | -247   | -158      |
| 5                | -166             | -158   | -75       |
| 6                | 11               | -2     | 22        |

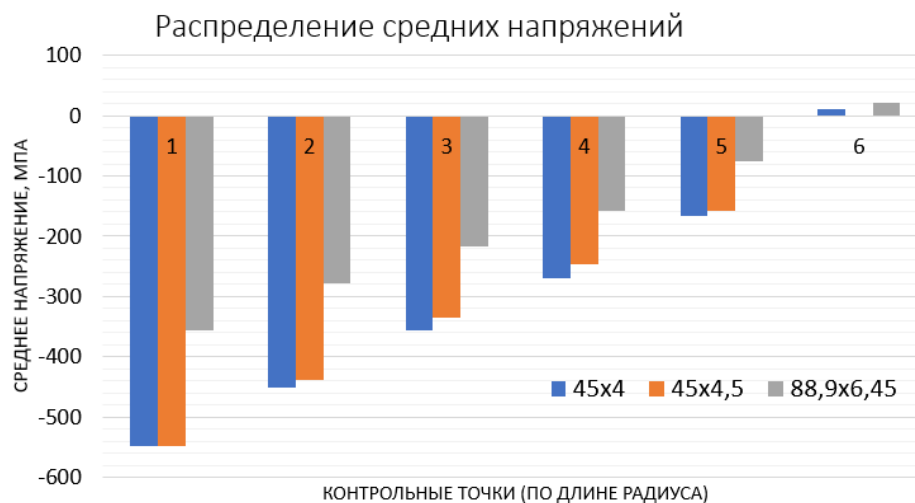


Рис. 16 – Графік розподілу середньої напруги в контрольних точках.

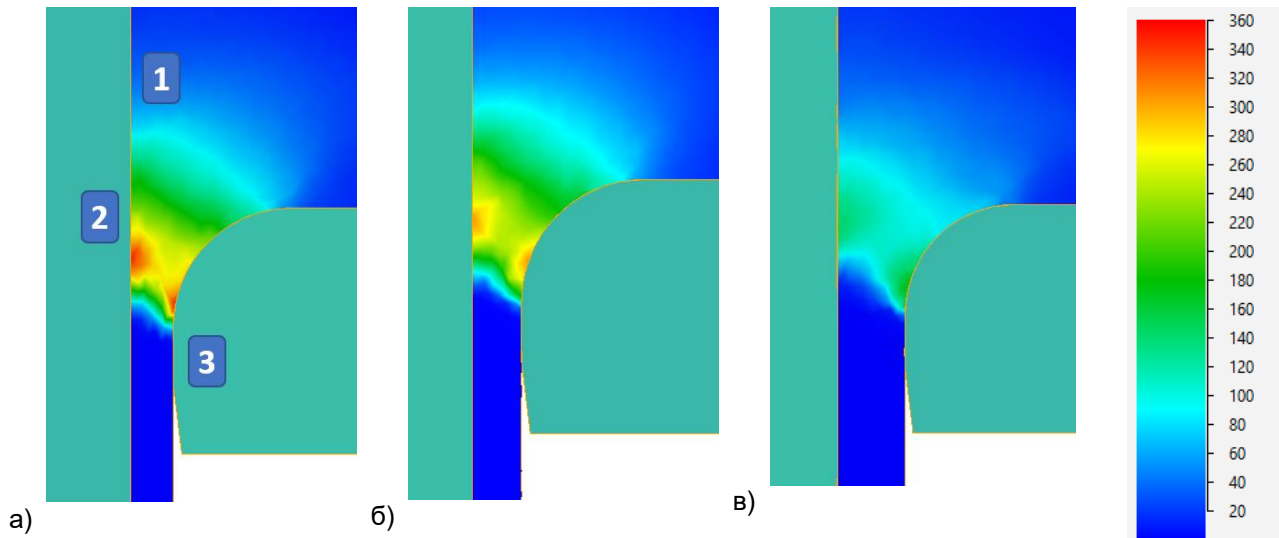


Рис 17. - Розподіл швидкості деформації в осередку деформації для труб розмірами: а - 45x4 мм; б - 45x4, 5 мм; в – 88,9x6,45 мм (де: 1 – гільза, 2 – голка, 3 – матриця)

Розподіл швидкостей деформації показує наявність зон із збільшеною (до 3 разів) швидкістю поблизу поверхні голки та матриці. При цьому позиції таких зон осі пресування не збігаються і не перебувають у перерізі виходу з матриці. Величина локально підвищеної швидкості деформації та позиції зон такої локалізації залежить від маршруту пресування.

Така тенденція проявляється яскравіше при пресуванні труб 45x4мм і 45x4,5мм, що може призводити до підвищеної витрати технологічного інструменту та утворення поверхневих дефектів.

#### 4 Швидкість закінчення металу .

На рис. 18 наведена швидкість закінчення металу по осі Z (мм/с) для труб розмірами 45x4 мм, 45x4,5 мм і 88,9x6,45 мм.

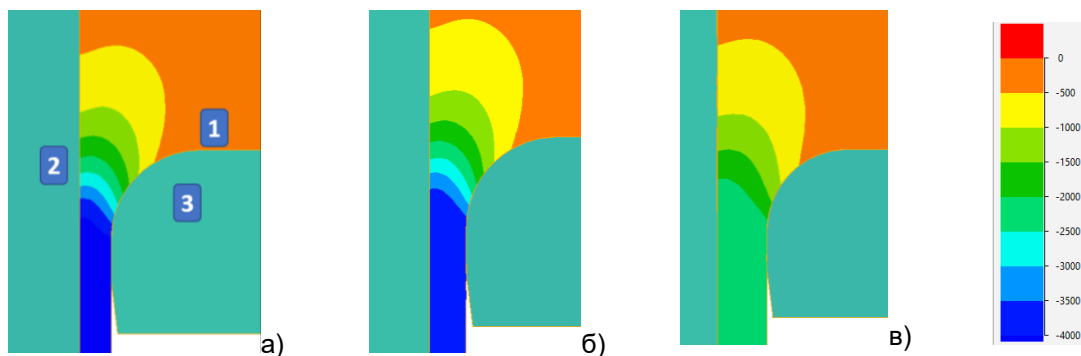


Рис.18.-Розподіл швидкості закінчення металу в осередку деформації для труб розмірами: а - 45x4 мм; б - 45x4, 5 мм; в - 88,9 х6, 45 мм (де: 1 - гільза, 2 - голка, 3 - матриця).

Аналіз швидкості закінчення металу осі Z проводився в контрольних точках відповідно до рисунка 15.

На рис. 19 представлена діаграма розподілу швидкості металу контрольними точками для розглянутих маршрутів пресування.

У таблиці 2 наведено дані про швидкість металу в осередку деформації (мм/с) для описаних вище маршрутів.

Таблиця 2. Розподіл швидкості течії металу (мм/с)

| Контрольні точки | Розміри труб, мм |        |           |
|------------------|------------------|--------|-----------|
|                  | 45x4             | 45x4,5 | 88,9x6,45 |
| 1                | 12               | 3      | 5         |
| 2                | 230              | 208    | 159       |
| 3                | 766              | 653    | 492       |
| 4                | 1713             | 1502   | 956       |
| 5                | 3156             | 2768   | 1707      |
| 6                | 4301             | 3882   | 2228      |

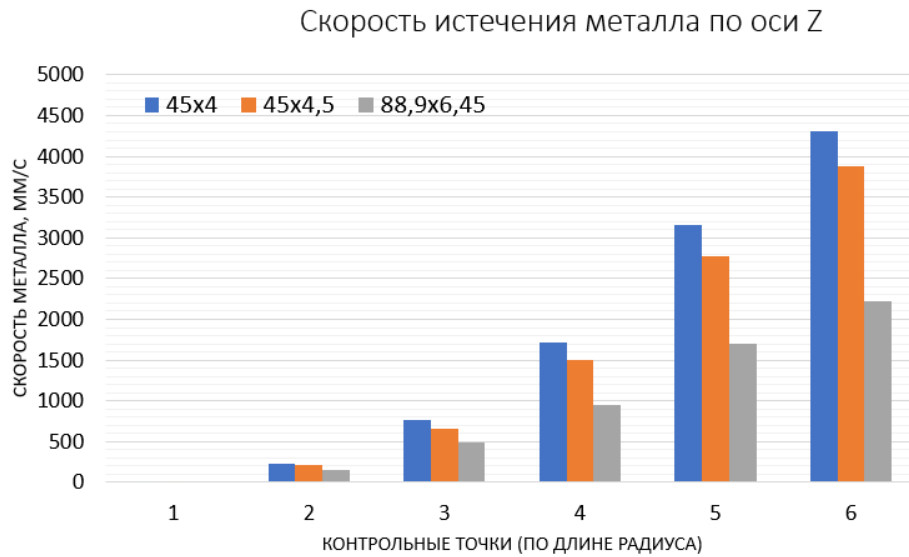


Рис. 19 – Графік розподілу швидкості витікання металу.

Наведені дані показують, що швидкість закінчення монотонно збільшується від перерізу до перерізу згідно із законом, близьким до лінійного. Інтенсивність зростання швидкості закінчення металу залежить від маршруту пресування. Безперервне зростання швидкості закінчення (мм/с) та немонотонне зростання швидкості деформації (1/с) (див. рис. 17) підвищує нерівномірність деформації

і може призвести до підвищеного зносу інструменту та появи дефектів.

Наведені дані підтверджують адекватність представленої моделі та добре кореспондуються з даними інших дослідників [1-3].

#### 5 Нормальні напруги.

На рис. 25 наведено розподіл нормальних ( $\sigma_z$ , МПа) напруг у металі для труб розмірами 45x4 мм, 45x4,5 мм та 88,9x6,45 мм відповідно.

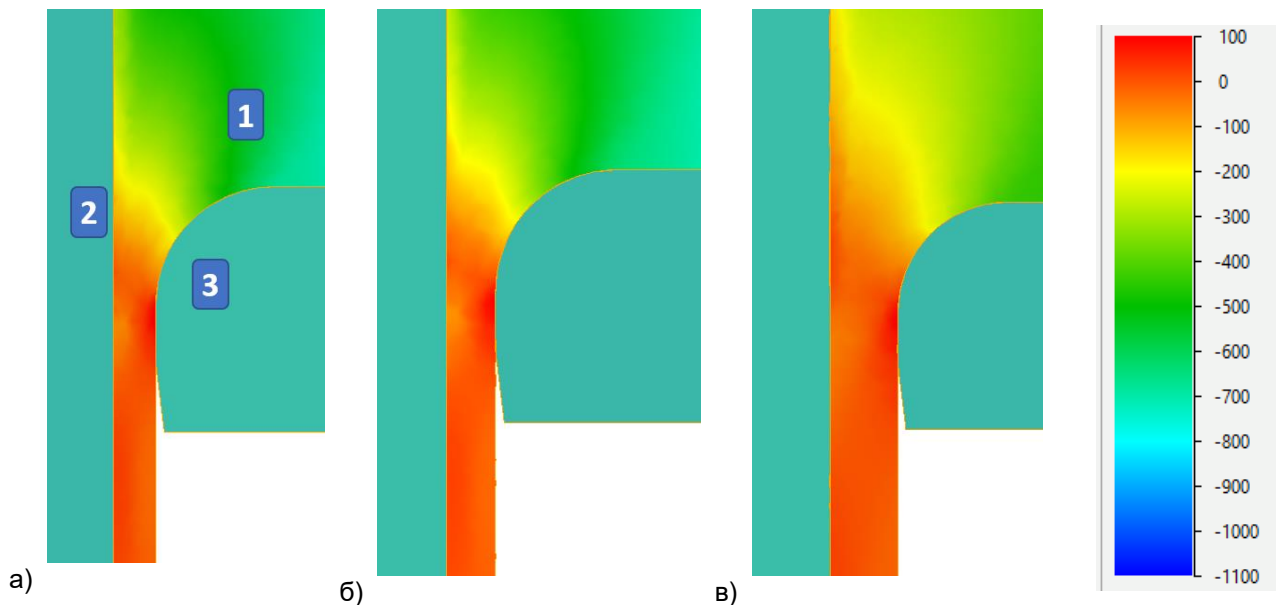


Рис. 20 – Розподіл нормальних напруг в осередку деформації для труб розмірами: а – 45x4 мм; б – 45x4, 5 мм; в – 88,9x6,45 мм (де: 1 – гільза, 2 – голка, 3 – матриця)

Для аналізу нормальних напруг, що виникають у металі в зоні деформації, скористалися описаною вище методикою (рис. 15).

На рис 21 представлена діаграма розподілу нормальних напруг контрольними точками для розглянутих маршрутів пресування.

У таблиці 3 представлені дані про нормальні напруги в осередку деформації (МПа) для описаних вище маршрутів.

Таблиця 3. - Розподіл нормальних напруг (МПа)

| Контрольні точки | Розміри труб, мм |        |           |
|------------------|------------------|--------|-----------|
|                  | 45x4             | 45x4,5 | 88,9x6,45 |
| 1                | -640             | -654   | -445      |
| 2                | -522             | -520   | -365      |
| 3                | -376             | -357   | -240      |
| 4                | -240             | -217   | -133      |
| 5                | -80              | -71    | 3         |
| 6                | 88               | 82     | 99        |

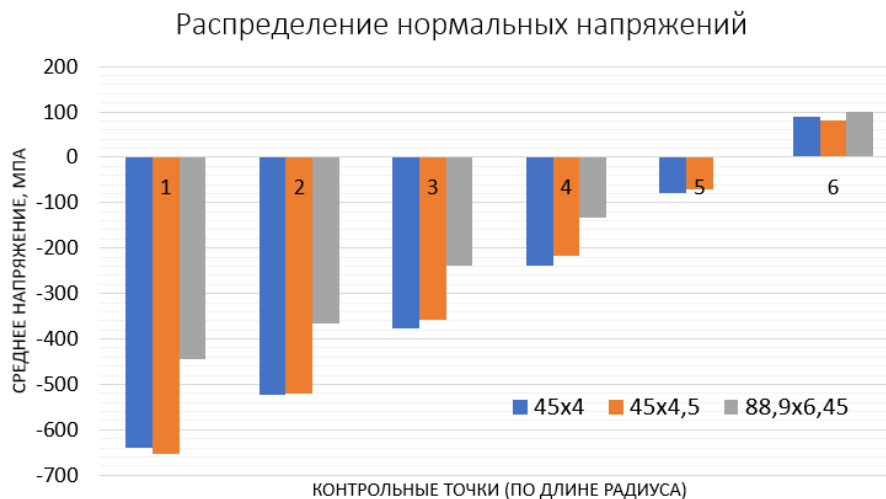


Рис. 21 - Графік розподілу нормальних напруг

Аналіз розподілу нормальних напруг показує, що в міру просування металу до вихідного перерізу вогнища деформації нормальні напруги змінюють знак, тобто від стискаючих переходять до розтягують. За певних умов це може призводити до порушення суцільності металу та утворення дефектів. Характер розподілу нормальних напруг по довжині деформуючої зони матриці практично лінійний, хоча і вимагає внесення коригувань калібрування матричного кільця, яка забезпечить лінійний характер їх розподілу і відсутність ймовірності

утворення дефектів. Для коригування калібрування матриць та запобігання утворенню дефектів на поверхні пресованих труб можна рекомендувати результати роботи [ 3 ]/

#### .6 Дотичні напруги

На рис/ 22 представлено розподіл дотичних ( $\tau_{zx}$ , МПа) напруг уздовж осі z при моделюванні процесу пресування труб розмірами 45x4 мм, 45x4,5 мм і 88,9x6,45 мм.

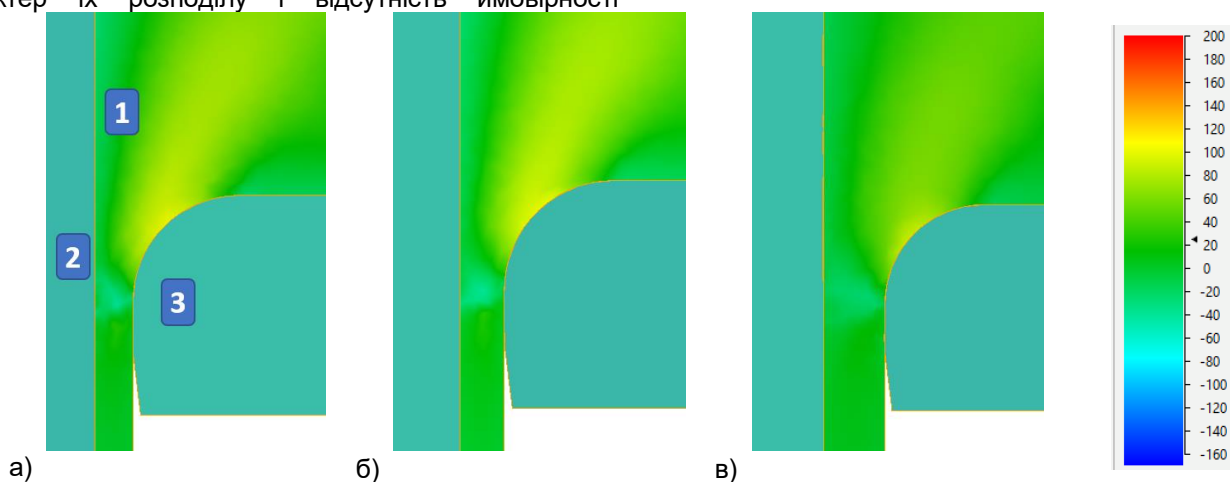


Рис. 22 – Розподіл дотичних напруг в осередку деформації для труб розмірами: а – 45x4 мм; б - 45x4, 5 мм; в – 88,9x6,45 мм (де: 1 – гільза, 2 – голка, 3 – матриця)

Як впливає із даних, наведених на рис. 22 до-  
тичні напруги досягають максимуму на зовнішній  
поверхні труби, при цьому у вихідному перерізі во-  
гнища вони практично відсутні і не впливають на  
ймовірність утворення дефектів на трубах.

### Висновки

1. Розроблено «математична модель процесу  
пресування труб для аустенітних і феритних сталей  
розмірами 45,0x4,0-5,0 мм, 88,9x6,45 мм,  
114,3x6,8 мм і 219,0x7,0-8,0 мм з використанням  
ПП Q - Form

2. Виконано перевірку адекватності розробленої  
моделі, внаслідок чого встановлено, що цю модель  
можна використовувати для дослідження процесу  
пресування труб з метою зниження ймовірності  
утворення внутрішніх та зовнішніх дефектів на тру-  
бах та підвищення стійкості технологічного інстру-  
менту.

3. На підставі моделювання реального техноло-  
гічного процесу пресування труб встановлено ос-  
новні фактори, які зумовлюють ймовірність утво-  
рення внутрішніх та зовнішніх дефектів на трубах  
та підвищений знос інструменту та запропоновано  
шляхи їх запобігання.

### Перелік посилань

1. Пресування сталевих труб та профілів / Г. І. Гуляев, А. Є. Притоманов, О. П. Дробіч та ін - М.: Металургія, 1973. - 192 с.
2. Гаряче пресування труб та профілів / Ю. В. Манегін, А. Є. Притоманов, Т. Шпіттель, А. Кнаушнер. - М.: Металургія, 1980. - 272 с.
3. Медведєв М. І., Гуляев Ю. Г., Чукмас С. А. Удосконалення процесу пресування труб. - М.: Металургія, 1986. - 149 с.
4. Друян В.М., Гуляев Ю.Г., Чукмас С.А. Теорія та технологія трубного виробництва. Підручник.- Дніпропетровськ, РІА, Дніпро-ВАЛ, 2001.-544 с
5. Медведєв М. І. Пресування труб з нікелевих і титанових . сплавів (питання теорії і технології) Дніпро, 2020 Нова ідеологія, ISBN 978-617-7068-61-6, 228с.
6. Шломчак Г. Г. Реологічна концепція теорії прокатки металів / Г. Г. Шломчак // Теорія і практика металургії. - 2005. - № 3 (52). - С. 39-43.
7. Experimental evaluation of the curves of maximal ductility and fluidity for titanium alloys in hot torsion testing Світлови Metally 2021-05-31 М. Medvedev, Y. Frolov, V. Andreiev, O. Bobukh . DOI: 10.17580/tsm.2021.05.09.
8. Pernis R. Application of torsion test in calculation extrusion force / R. Pernis, Y. Bidulska, T. Kvackaj, I. Pokorniy // Archives of metallurgy and materials . - Vol 56(1). - 2011. - Pp. 81-85. - Doi: 102478/v10172-011-0009-9 .
9. Yang LH Визначення hardening coefficient of green strain constitutive model based on torsion tests / LH Yang, LZ Wu // Advanced materials research. - Vol. 197-198. - 2011. - Pp. 1528-1531. - https://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.197-198.1528
10. . Medvedev, M., Shyfrin, Y., Frolov, Y., & Bobukh, O. (2022). Усунення скло lubricant viscosity для гарячої викиди Cr-Ni steel and Ni alloy tubes. Науковий Вісник Національного Хімічного Університету, (1), 33-37. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/033 (Q3)
11. QForm UK, version 10 . 2 . 4 . Windows; Micas Simulations Limited: Oxford, UK, 202 2 .
12. Gerasimov D., Biba N., Stebunov S., Kadach M. Implementation of a dual метод місії для тривалогоролінування в QForm V8. International Conference on Production and Further Processing of Flat Products, MEFORM 2016. 2016. V. 854. P. 158-162. DOI: 10.4028/ www.scientific.net/MSF.854.15
13. Леванов AN Improvement of metal forming process by means of useful effects of plastic friction. Journal of Materials Processing Technology. 1997. 72. P. 314-316. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00191-X
14. Study of Chromium Steel Ductility During Pipe Extrusion / AV Vydrin, AS Zhukov, EV Khramkov, vd Nikolenko // Metal Science and Heat Treatment. - 2020. - Т .62, No.1-2. - С. 103-105. - DOI: 10.1007/s11041-020-00520-5.

### Reference

1. Huliaiev, H. I., Prytomanov, A. Ye., & Drobich, O. P. (1973). *Presuvannia stalevykh trub ta profiliv*. Metalurhiia.
2. Manehin, Yu. V., Prytomanov, A. Ye., Shpittel, T., & Knaushner A. (1980). *Hariache presuvannia trub ta profiliv*. Metalurhiia.
3. Medvediev, M. I., Huliaiev, Yu. H., & Chukmas, S. A. (1986). *Udoskonalennia protsesu presuvannia trub*. Metalurhiia.
4. Druian, V .M., Huliaiev, Yu. H., & Chukmas, S. A. (2001). *Teoriia ta tekhnolohiia trubnoho vyrobnytstva. Pidruchnyk*. RIA, Dnipro-VAL.
5. Medvediev, M. I. (2020). *Presuvannia trub z nikelevykh i tytanovykh . splaviv (pytannia teorii i tekhnolohii)*. Nova ideolohiia, 228.
6. Shlomchak, H. H. (2005). Reolohichna kontseptsiiia teorii prokatky metaliv. *Teoriia i praktyka metalurhii*, 3(52), 39-43.
7. Medvedev, M., Frolov, Y., Andreiev, V., & Bobukh, O. (2021). Experimental evaluation of the curves of maximal ductility and fluidity for titanium alloys in hot torsion testing Svitlovi Metally. https://doi.org/10.17580/tsm.2021.05.09.
8. Pernis, R. (2011). Application of torsion test in calculation extrusion force. *Archives of metallurgy and materials*, 56(1), 81-85.
9. Yang, L. (2011). *Advanced materials research*, 197-198, 1528-1531.
10. Medvedev, M., Shyfrin, Y., Frolov, Y., & Bobukh, O. (2022). Usunennia sklo lubricant viscosity dlia hariachoi vykydy Cr-Ni steel and Ni alloy tubes. *Naukovii Visnyk Natsionalnoho Khimicheskoho Universytetu*, (1), 33-37. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/033 (Q3).
11. QForm UK, version 10. 2. 4. Windows; Micas Simulations Limited: Oxford, UK, 202 2.



12. Gerasimov, D., Biba, N., Stebunov, S., & Kadach, M. (2016). Implementation of a dual method misii dlia tryvalohorolnivanja v QForm V8. International Conference on Production and Further Processing of Flat Products, MEFORM V. 854. P. 158-162. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.854.15>.
13. Levanov, A. N (1997). Improvement of metal forming process by means of useful effects of plastic friction. *Journal of Materials Processing Technology*. 72. 314-316. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00191-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00191-X).
14. Vydrin, A. V, Zhukov, A. S, Khramkov, E. V. (2020). Study of Chromium Steel Ductility During Pipe Extrusion *Metal Science and Heat Treatment*, 62(1-2), 103-105. <https://doi.org/10.1007/s11041-020-00520-5>.

Надіслано до редакції / Received: 28.01.2025

Прийнято до друку / Accepted: 30.05.2025