

УДК 621.774.35:669.245

М. І. Медведєв¹, д.т.н., пров. наук. співроб., ORCID 0000-0002-1230-420X**А. В. Красюк**², директор з виробництва, ORCID 0009-0009-8354-687X**О. М. Кузьміна**^{1,*}, к.т.н., доц., ORCID 0000-0003-0794-0583**Ю. О. Гладкий**³, інженер, ORCID 0009-0003-1051-2587**Б. І. Квак**¹, аспірант**Д. О. Ревякін**¹, аспірант**Ю. В. Ниткін**¹, аспірант¹ *Український державний університет науки і технологій*² *ПРАТ «СЕНТРАВІС ПРОДАКШН ІУКРЕЙН»*³ *ДП "НВО "Павлоградський хімічний завод", Україна*** Автор для листування: o.m.kuzmina@ust.edu.ua*

ТЕРМІЧНИЙ СТАН ТРУБНИХ ЗАГОТОВОК ПІД ЧАС ПІДГОТОВЧИХ ОПЕРАЦІЙ ГАРЯЧОГО ПРЕСУВАННЯ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

Анотація. У процесі виготовлення безшовних труб зі сплавів на нікелевій основі методом гарячого пресування на горизонтальних гідравлічних пресах істотною та актуальною технологічною проблемою залишається утворення поверхневих дефектів. Однією з основних причин їх виникнення є нестабільність температурно-швидкісного стану трубних заготовок на різних етапах технологічного процесу. Відхилення температури від оптимального вузького інтервалу максимальної технологічної пластичності призводить до стрімкого зниження деформівної здатності металу, наростання вихідних напружень та погіршення загальної якості готової трубної продукції. Особливо гостро ця проблема проявляється при обробці жароміцного сплаву 602СА, який характеризується високою чутливістю до термічних коливань та обмеженою технологічною пластичністю. Метою цього дослідження є встановлення фундаментальних закономірностей зміни температурних полів трубних заготовок зі жароміцного сплаву 602СА на основних стадіях їх підготовки, транспортування та гарячого пресування із застосуванням захисних скломастил на пресових установках зусиллям 16,0 та 31,5 МН. Методика дослідження базується на комплексному аналізі реального промислового процесу виробництва, прямих експериментальних вимірюваннях температури із застосуванням термоелектродів, а також на математичному моделюванні й використанні системи аналітичних і напівемпіричних залежностей для розрахунку поетапних температурних втрат. У роботі детально розглянуто

© М. І. Медведєв, А. В. Красюк, О. М. Кузьміна, Ю. О. Гладкий, Б. І. Квак, Д. О. Ревякін, Ю. В. Ниткін, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

тепловий баланс на п'яти ключових етапах: транспортування заготовки від індукційного нагрівача до столу нанесення мастила, нанесення захисного скломастила, транспортування вкритих заготовок до преса, витримка в контейнері перед розпресовкою та безпосередньо розпресовка з урахуванням тепловіддачі через повітряні зазори, товщину стінок і взаємодію з інструментом. У результаті виконаної роботи встановлено, що сумарне зниження температури заготовок у процесі виконання допоміжних і транспортних операцій обернено пропорційне товщинам стінок отриманих гільз. У досліджуваному діапазоні товщин стінок 40–120 мм та початкових температур нагріву 1050–1250 °C отримана залежність має близький до лінійного характеру. Розроблена математична модель і запропонована інженерна методика розрахунку дозволяють здійснювати науково обґрунтований вибір в'язкісних характеристик скломастила (оптимально в межах 80–100 Па·с) відповідно до фактичного температурного режиму деформування. Практична цінність результатів підтверджена в умовах промислового виробництва: впровадження розробленої методики під час виготовлення партії з 120 труб із жароміцного сплаву 602CA забезпечило стабільний захист інструменту, повне усунення дефектів поверхні, підвищення загальної якості готової трубної продукції та значне зниження рівня виробничого браку.

Ключові слова: гаряче пресування, нікелеві сплави, трубні заготовки, температурний режим, тепловий баланс, скломасило, охолодження заготовок, екструзія, поверхневі дефекти, пластичність.

Посилання для цитування: Термічний стан трубних заготовок під час підготовчих операцій гарячого пресування нікелевих сплавів / М. І. Медведєв, А. В. Красюк, О. М. Кузьміна, Ю. О. Гладкий, Б. І. Квак, Д. О. Ревякін, Ю. В. Ниткін // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 548-561. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-032>

Вступ

Зростання вимог до надійності обладнання в енергетичній, хімічній та аерокосмічній галузях обумовлює активне використання труб із нікелевих сплавів, що характеризуються високою жароміцністю та корозійною стійкістю. Водночас технологічна обробка таких матеріалів залишається складною через їх обмежену пластичність у широкому температурному інтервалі.

Особливо гостро ця проблема проявляється при виготовленні безшовних труб методом гарячого пресування, де навіть незначні відхилення температури заготовки можуть призводити до порушення суцільності металу.

Аналіз виробничого досвіду свідчить, що традиційні підходи до вибору режимів нагріву не забезпечують стабільності температурного стану на всіх стадіях технологічного процесу. При цьому найбільш критичними є саме допоміжні операції – транспортування, нанесення мастила та витримка перед деформацією, під час яких відбувається

неконтрольоване охолодження. У зв'язку з цим виникає необхідність у створенні інструменту для прогнозування температурного стану заготовки з урахуванням реальних умов виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вивчення процесів гарячого деформування нікелевих сплавів у сучасній науковій літературі переважно пов'язане з аналізом їхньої корозійної стійкості, жароміцності та поведінки при високих температурах [1, 2]. Зокрема, на сьогоднішній день безшовні труби з нікелевих сплавів складають біля 30% світового ринку подібної продукції. Встановлено, що підвищення легованості таких матеріалів, з одного боку, покращує їх експлуатаційні характеристики, але з іншого – суттєво ускладнює процеси пластичної деформації.

Згідно з класифікаційними підходами до оброблюваності матеріалів [3], нікелеві сплави у литому стані характеризуються низькою технологічною пластичністю, тобто це вкрай крихкі сплави, обробку яких тиском можливо виконати за одним-двома видами лише в гарячому стані, при вкрай малій швидкості деформації та з невеликим ступенем одноразової деформації заготовки обмежених розмірів та простої конфігурації. Це підтверджується як експериментальними дослідженнями, так і практикою виробництва [4-7].

У ряді робіт показано, що при підвищенні ступеня легування спостерігається зростання опору деформації та звуження температурного інтервалу, в якому досягається максимальна пластичність матеріалу [8, 9]. Унаслідок цього застосування прокатки для таких сплавів часто є неефективним або взагалі неможливим через ризик виникнення внутрішніх дефектів [10, 11].

У зв'язку з цим гаряче пресування із використанням скломастил розглядається як основний промисловий спосіб отримання труб із нікелевих сплавів. При цьому для успішної реалізації процесу гарячого пресування труб та мінімізації рівня їх браку необхідний обов'язковий вибір температури максимальної пластичності деформуемого сплаву і дотримання оптимального температурного діапазону на всіх етапах його реалізації [12, 13]. Необхідність визначення та дотримання обмеженого температурного діапазону деформації (температури 1080...1100 °C), який потребує точного контролю [6, 14], стосується і сплаву типу 602CA - нікель-хромового сплаву з додаванням алюмінію, ітрію та цирконію, стійкого до високих температур (до +1200 °C), який відзначається високою стійкістю до окислення та повзучості, що робить його ідеальним для елементів промислових печей, нафтохімічної арматури та інших високотемпературних систем.

Відомі підходи до аналізу процесів деформації нікелевих сплавів значною мірою базуються на вивченні мікроструктурних змін та

механізмів рекристалізації [14, 17]. Однак такі дослідження здебільшого орієнтовані на стадію безпосередньої деформації, тоді як попередні етапи технологічного процесу залишаються недостатньо дослідженими.

Зокрема, сучасні методи чисельного моделювання, включаючи скінчено-елементний аналіз, фокусуються на зоні пластичної деформації і не враховують зміну температурного стану заготовки під час транспортування та підготовки до пресування [16–18]. Це обмежує можливість їх використання для прогнозування реальних умов виробництва.

Окрему проблему становить відсутність узагальнених підходів до оцінювання теплових втрат заготовки на проміжних стадіях технологічного процесу. Наявні дослідження здебільшого не враховують впливу скломастил на теплообмін, хоча їх роль у забезпеченні стабільності процесу є суттєвою [9, 19].

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить про наявність суттєвого розриву між дослідженнями процесу деформації та реальними умовами підготовки заготовок до пресування. Це зумовлює необхідність розроблення підходів, які дозволяють кількісно оцінювати зміну температурного стану заготовок на всіх стадіях технологічного процесу.

Метою роботи є встановлення закономірностей зміни температури трубних заготовок зі сплавів на нікелевій основі на основних етапах підготовки та гарячого пресування труб на горизонтальних гідравлічних пресах із зусиллям 16,0 та 31,5 МН із використанням скломастил.

Методика дослідження

Методика включала проведення системного аналізу наявного технологічного процесу виробництва гарячепресованих труб з нікелевого сплаву 602СА на пресових установках з горизонтальними гідравлічними пресами силою 16,0 МН і 31,5 МН. При цьому до числа основних технологічних етапів були віднесені:

- 1) транспортування заготовки (гільзи) від індукційного нагрівача до столу нанесення скломастила;
- 2) нанесення скломастила на поверхні заготовки;
- 3) транспортування заготовки зі скломастилом до преса;
- 4) витримка заготовки в контейнері перед розпресовкою;
- 5) розпресовка в контейнері.

Тривалість перерахованих вище технологічних етапів визначали шляхом їхньої реєстрації за секундоміром в умовах реального виробництва гарячепресованих труб на зазначених вище установках.

Хімічний склад заготовок визначали на спектрометрі марки Elvax plus.

Товщину шару скломастила на поверхні заготовки після завершення її розширення визначали після охолодження відколів шару мастила до кімнатної температури, використовуючи штангенциркуль з точністю 0,01 мм.

Температуру зовнішньої поверхні заготовки визначали шляхом термографування з використанням хромель-алюмелевих термоелектродів у комплекті з електронним потенціометром.

Контроль якості виготовлених труб на предмет відповідності нормативно-технічній документації проводили візуально.

Для аналітичного опису розглянутого процесу використовували як відомі, так і власні аналітичні і напівемпіричні рівняння, які наведені в роботі [15].

Оскільки охолодження заготовок у розглянутому технологічному ланцюжку відбувається шляхом віддачі тепла теплопровідністю і випромінюванням у середовище з постійною температурою, а час охолодження заготовок відносно невеликий, то процес тепловіддачі не встигає досягти стаціонарної стадії. У зв'язку з цим зміну температури заготовки на підготовчих етапах пресування можна розрахувати за формулою:

$$m \cdot C_m \cdot \Delta T = A \cdot \bar{q} \cdot \tau, \quad (1)$$

де m - маса заготовки, кг; C_m - питома теплоємність сплаву, Дж/(кг·К); ΔT - зміна температури заготовки, °C; A - площа охолодження заготовки, м²; $\bar{q}$ - середній тепловий потік із поверхонь заготовки, Вт/м²; τ - час охолодження заготовки, с.

Транспортування заготовки (гільзи) від індукційного нагрівача до столу нанесення скломастила. Зміну температури на цьому етапі за його тривалості τ_1 розраховували за перетвореним рівнянням до вигляду:

$$\Delta T_1 = \frac{3,6 \cdot A \cdot \bar{q} \cdot \tau_1}{m \cdot C_m}. \quad (2)$$

З аналізу рівняння (2) випливає, що зміна температури тіла під час охолодження прямо пропорційна питомій поверхні охолодження - A/m , яка для суцільного циліндричного тіла обернено пропорційна його радіусу. Якщо охолодженням від внутрішньої поверхні порожнистого циліндра в цьому випадку можна знехтувати, то для врахування втрат теплоти через її торці торцеву площу випромінювання (поперечний переріз отвору циліндра) необхідно збільшити на 25%. У цьому разі рівняння (2) матиме вигляд:

$$\Delta T_1 = \frac{7,2 \cdot k_G \cdot \bar{q} \cdot \tau}{C_m \cdot \gamma \cdot t}, \quad (3)$$

$$k_G = \frac{1+0,625\frac{d}{D}\frac{d}{l}}{1+\frac{d}{D}},$$

де γ - щільність сплаву; t – товщина стінки заготовки D ; d - зовнішній і внутрішній діаметри порожнистої заготовки відповідно; l - довжина заготовок.

Середню величину теплового потоку, що є кількістю теплоти, яка виділяється з одиниці площі поверхні за одиницю часу, і коефіцієнт теплопередачі з поверхні заготовки в навколишнє середовище розраховували за формулами:

$$\bar{q} = \alpha \cdot (T_0 - 20), \quad (4)$$

$$\alpha = 145,1 \cdot \left(\frac{T_0}{1000} \right)^2 \quad (5)$$

За результатами виконаних вимірювань встановлено, що товщина шару скломастила на заготовках становить 0,1...0,2 мм. У цьому разі коефіцієнт тепловіддачі (α_{GL}) матиме вигляд:

$$\alpha_{GL} = \frac{1}{\frac{t_{GL} + 1}{\lambda_{GL}} + \alpha}, \quad (6)$$

де t_{GL} – товщина скломастила, на поверхні заготовок по закінченню їх обробки, м; λ_{GL} - питома теплопровідність скломастила, Вт/(м·К), (для розрахунків прийняли $\lambda_{GL} = 930$ Вт/(м·К)).

Рівняння (3)...(6) застосовні для випадку наявності скломастила на поверхні заготовки.

Нанесення скломастила на поверхні заготовки. Розрахунок зниження температури (ΔT_2) під час контакту заготовки з холодним скломастилом за його щільності 1500 кг/м^3 , питомої теплоємності 840 Дж/(кг·К) проводили за емпіричним рівнянням:

$$\Delta T_2 = 0,24 \cdot \frac{T_0 - \Delta T_1}{t}. \quad (7)$$

У рівнянні (7) величину ΔT_1 розраховують за рівнянням (3).

Транспортування заготовки зі скломастилом до преса. На цьому етапі втрати температури ΔT_3 розраховували за рівнянням (3) з урахуванням поточної товщини мастильного шару.

Витримка заготовки в контейнері перед розпресовкою. Під час введення заготовки в контейнер між заготовкою і контейнером, а також голкою, утворюються повітряні зазори. Для цього випадку втрати температури ΔT_4 можна розрахувати за рівнянням (3) з урахуванням поточної товщини шару мастила в рівнянні (6), а рівняння (4) і (5) представивши в такому вигляді:

$$\bar{q} = \alpha \cdot (T_0 - \Delta T_1 - \Delta T_2 - \Delta T_3 - 400), \quad (8)$$

$$\alpha = 203,5 \cdot \left(\frac{T_0 - \Delta T_1 - \Delta T_2 - \Delta T_3}{1000} \right)^{1,7}, \quad (9)$$

де 400 – температура контейнера, °C; 203,5 та 1,7 – емпіричні коефіцієнти.

Розпресовка в контейнері. У процесі розпресовки відбувається заповнення металом заготовки повітряних зазорів між зовнішньою поверхнею заготовки і внутрішньою втулки контейнера. Тому теплопередача від заготовки до контейнера здійснюється тільки теплопровідністю через шар скламастила. Якщо припустити, що під дією нормального контактного напруження під час розпресовки товщина шару скламастила становитиме 0,25 мм, то величину k_G в рівнянні (3) можна розрахувати за рівнянням:

$$k_G = \frac{\lambda_{\text{см}}}{l_{\text{см}}} = \frac{0,93 \cdot 1000}{0,25} \approx 3720. \quad (10)$$

Масу контейнера відносно маси гільз можна вважати величиною нескінченною, тому температура контейнера за час розпресовки істотно не змінюватиметься, що дає змогу прийняти її сталою та такою, що дорівнює 400 °C. У цьому випадку від зовнішньої поверхні гільз матиме місце тепловий потік, що дорівнює:

$$q = k_G \cdot (T - 400). \quad (11)$$

Для оцінки впливу теплового потоку на голку використовували величину середньої калориметричної температури системи, що дає змогу нагрівання й охолодження будь-яких тіл системи розглядати незалежно одне від одного. У цьому випадку:

$$t_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{г}} + w \cdot T_{\text{и}}}{1 + w}, \quad (12)$$

де $T_{\text{г}}$ – середньозважена температура гільзи перед розпресовкою; w – коефіцієнт, що враховує відношення мас і коефіцієнтів теплоємності гільзи та голки; $T_{\text{и}}$ – початкова температура голки, приймаємо $T_{\text{и}} = 400^\circ\text{C}$.

$$w = \frac{M_{\text{и}} \cdot C_{\text{м и}}}{M_{\text{г}} \cdot C_{\text{м г}}}, \quad (13)$$

де $M_{\text{г}}$, $M_{\text{и}}$ – маса відповідно гільзи та голки; $C_{\text{м г}}$, $C_{\text{м и}}$ – теплоємність відповідно гільзи та голки.

Якщо прийняти $C_{\text{м г}} = C_{\text{м и}}$, то

$$t_{\text{кал}} = T_{\text{г}} - \frac{d_{\text{и}}^2}{D_{\text{к}}^2} \cdot (T_{\text{г}} - 400). \quad (14)$$

Питомий тепловий потік на голку становитиме:

$$q_{\text{и}} = k \cdot (T_{\text{Г}} - t_{\text{КАЛ}}) = k \cdot \frac{d_{\text{и}}^2}{D_{\text{к}}^2} \cdot (T_{\text{Г}} - 400), \quad (15)$$

де $t_{\text{КАЛ}}$ – величина середньої калориметричної температури системи, °C; k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·°C); $T_{\text{Г}}$ – середньозважена температура гільзи перед розпресовкою, °C; $d_{\text{и}}$ – діаметр голки, м; $D_{\text{к}}$ – діаметр контейнера, м.

Підсумовуючи питомі теплові потоки на контейнер і голку, множачи їх на площу поверхні охолодження і час після перетворень, отримуємо:

$$\Delta t = \frac{1,15 \cdot \tau}{S_{\text{p}}} \cdot (T_{\text{Г}} - 400), \quad (16)$$

де τ – час розпресовки, с; S_{p} – товщина стінки гільзи в розпресованому стані, мм.

За загальноприйнятих зазорів із контейнером і голкою [19] товщина гільзи становить $S_{\text{p}} = 1,15 \cdot S$. Тоді:

$$\Delta t = \frac{\tau}{S} \cdot (T_{\text{Г}} - 400), \quad (17)$$

де $T_{\text{Г}}$ – температура гільзи з урахуванням охолодження за час попередніх технологічних операцій; S – початкова товщина стінки заготовки (гільзи), мм.

Вихідні дані та результати дослідження

Хімічний склад нікелевого сплаву 602СА в аналізованих заготовках наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад нікелевого сплаву 602СА в заготовках

Масовий вміст хімічних елементів, % (Ni - інше)											
Cr	Fe	C	Mn	Si	Cu	Al	Ti	Y	Zr	P	S
25-26	9-10	0,20- 0,23	0,10- 0,12	0,4- 0,5	0,05- 0,10	2,0- 2,2	0,10- 0,15	<0,05	<0,05	<0,01	<0,01

За результатами проведеного хронометражу встановлено, що тривалість усіх стадій охолодження заготовки до початку процесу пресування становить 30...37 секунд, зокрема:

- час транспортування заготовки до столу нанесення скломастила 12...15 с;

- транспортування заготовки, покритої скломасилом, 11...14 с;

- охолодження в контейнері перед розпресовкою 3...6 с;

- охолодження в процесі розпресовки 1...2 с.

Для оцінки втрат температури на всіх стадіях охолодження

розраховували середню за масою температуру гільз. Зміни питомої теплоємності та теплопровідності нікелевого сплаву 602СА в інтервалі температур 1000...1200 °С для розрахунків прийняли лінійними, які відповідно перебували в межах 626...636 Дж/(кг·К) і 28,2...30,6 Вт/(м·К). Для розрахунків прийняли питому щільність сплавів типу 602СА рівною 8000 кг/м³.

Результати розрахунків зміни температури гільз у процесі охолодження для пресових установок 16,0 МН і 31,5 МН наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Зміна температури гільз у процесі охолодження на пресах 16,0 МН і 31,5 МН

T ₀ , °С	Етапи охолодження гільз	Δt, °С						
		Товщина стінки заготовки (t), мм						
		40	45	50	55	60	65	70
1200	1*	24,9	22,2	20,1	18,3	16,8	15,5	14,4
	2	7,1	6,0	5,4	4,9	4,3	4,2	3,9
	3	21,9	19,7	17,9	16,4	15,1	14,0	13,1
	4	6,0	5,4	4,9	4,5	4,2	3,9	3,6
	5	37,0	33,2	30,0	27,5	25,3	23,5	21,8
	ΣΔt	96,9	86,5	78,3	71,6	65,7	61,1	56,8
1150	1*	22,0	19,6	17,7	16,1	14,8	13,7	12,7
	2	6,2	6,0	5,4	4,9	4,3	4,2	3,9
	3	19,5	17,5	15,9	14,6	13,4	12,4	11,6
	4	5,3	4,8	4,4	4,0	3,7	3,4	3,2
	5	34,8	31,2	28,3	25,8	23,8	22,0	20,5
	ΣΔt	87,8	79,1	71,7	65,4	60,0	55,7	51,9
1100	1*	19,3	17,2	15,5	14,1	13,0	12,0	11,1
	2	6,5	5,8	5,2	4,7	4,3	4,0	3,7
	3	17,2	15,5	14,0	12,9	11,9	11,0	10,3
	4	4,7	4,2	3,8	3,5	3,2	3,0	2,8
	5	32,6	29,2	26,4	24,2	22,7	20,6	19,2
	ΣΔt	80,3	71,9	64,9	59,4	55,1	50,6	47,1
1050	1*	16,8	15,0	13,5	12,3	11,5	10,4	9,6
	2	6,2	5,5	5,0	4,5	4,2	3,8	3,6
	3	15,2	12,9	12,4	11,3	10,4	9,6	9,0
	4	4,0	3,6	3,3	3,0	2,8	2,6	2,4
	5	30,3	27,2	24,6	22,5	20,7	19,2	17,8
	ΣΔt	72,5	64,2	58,8	53,6	49,6	45,6	42,4

Примітка* 1 – транспортування заготовки (гільзи) від індукційного нагрівача до столу нанесення скломастила; 2 – нанесення скломастила на поверхні заготовки; 3 – транспортування заготовки зі скломастилом до преса; 4 – витримка заготовки в контейнері перед розпресовкою; 5 – розпресовка в

контейнері.

З аналізу даних таблиці 2 випливає, що загальна зміна температури гільз у процесі їх охолодження за час виконання допоміжних технологічних операцій на пресових установках за однакової початкової температури нагріву обернено пропорційна товщині стінки гільз. При цьому дана залежність у діапазоні прийнятих товщин стінок гільз має практично лінійний характер, про що свідчать залежності на рис. 1.

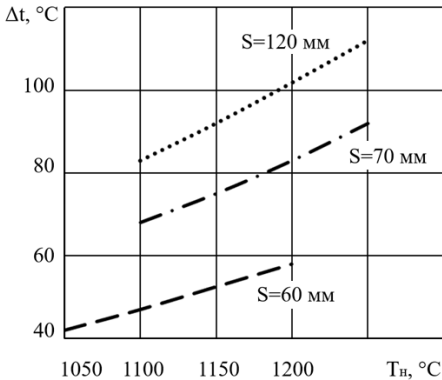


Рисунок 1 – Залежність зміни температури гільз Δt у процесі охолодження за час проведення допоміжних операцій від температури нагріву гільз T_n .

Наведені вище залежності дають змогу з достатньою для інженерних розрахунків точністю визначати величини змін температури заготовок (гільз) з товщиною стінок 40...120 мм у процесі їхнього охолодження на стадії проведення допоміжних технологічних операцій на пресових установках 16,0 МН і 31,5 МН в інтервалі зміни їхніх початкових температур 1050...1200 °C.

Отримані залежності рекомендовані для використання в цеху пресування труб з метою визначення раціональних величин температурно-деформаційних параметрів пресування з жароміцного сплаву на основі нікелю 602СА. Використання даних температурно-деформаційних параметрів під час розроблення та вдосконалення технології пресування труб із жароміцного сплаву на основі нікелю 602СА у виробничих умовах за результатами роботи [19] дало змогу вибрати скломастила з оптимальною в'язкістю в діапазоні 80-100 Па с, тим самим забезпечити отримання труб з високою якістю поверхні. Візуальний контроль якості виготовлених на підприємстві труб свідчить, що зі 120 труб, виготовлених з використанням результатів розрахунку за запропонованою методикою, не було жодної труби з дефектами поверхонь. Якість зовнішньої та внутрішньої поверхні труб наведена на рис. 2.

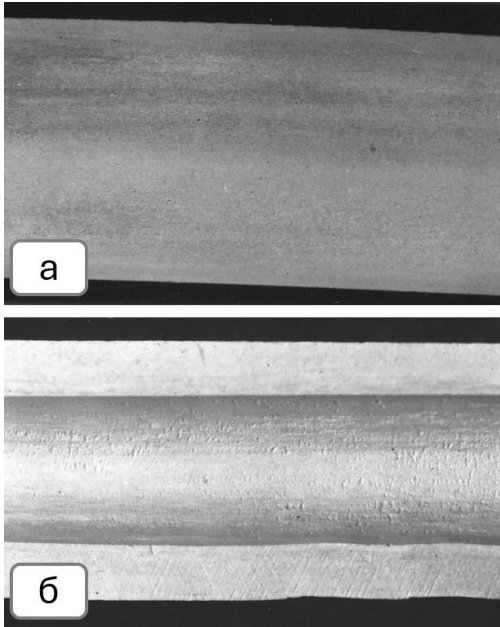


Рисунок 2 – Зовнішня та внутрішня поверхні пресованих труб: а) зовнішня, б) внутрішня.

Висновки

1. Розроблено методику розрахунку значень температур гільз на різних стадіях їхньої підготовки до процесу пресування, використання якої дозволяє проводити вибір раціонального скломасила виходячи з відомих залежностей її в'язкості від температури.

2. Зміна температури гільз з однаковою початковою температурою в процесі проведення з ними допоміжних і транспортних операцій обернено пропорційна товщині їхніх стінок.

3. Для гільз із товщиною стінок 40...120 мм і початковою температурою 1050...1250 °С характер зниження температури у часі, витраченому на проведення допоміжних і транспортних операцій, може бути описаний лінійною залежністю.

Дослідження проводились у межах виконання науково-дослідної роботи «Розробка інноваційної технології виробництва жароміцних труб для авіаційної промисловості України» за програмою «Наукова і науково-технічна діяльність закладів вищої освіти та наукових установ» МОН (Наказ МОН від 27.12.2023 №1572).

Перелік посилань / References

1. Karimihaghighi, R., & Naghizadeh, M. (2023). Effect of alloying elements on aqueous corrosion of nickel-based alloys at high temperatures: A review. *Materials and Corrosion*. <https://doi.org/10.1002/maco.202213705>

2. Chyrkin, A., Sloof, W. G., Pillai, R., Galiullin, T., Grüner, D., Singheiser, L., & Quadackers, W. J. (2015). Modelling csitional changes in nickel base alloy 602 CA during high temperature oxidation. *Materials at High Temperatures*, 32(1-2), 102–112. <https://doi.org/10.1179/0960340914z.000000000082>
3. Kimstach, T., Uzlov, K., Repyakh, S., & Bilyi, O. (2025). Determination of the preferential method of manufacturing products from metals and alloys. International Scientific and Technical Conference Information Technologies in Metallurgy and Machine Building, 56–61. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.009>
4. Wang, X., Liu, Z., Cheng, K., & Kong, Y. (2023). Chlorine-induced high-temperature corrosion characteristics of Ni-Cr alloy cladding layer and Ni-Cr-Mo alloy cladding layer. *Corrosion Science*, 216, 111102. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111102>
5. Schwing, R., Linn, S., Kontermann, C., Neubert, S., & Oechsner, M. (2021). Isothermal and anisothermal creep behavior of the nickel base Alloy 602 CA. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 52(2), 231–247. <https://doi.org/10.1002/mawe.202000248>
6. Qin, X., Huang, D., Yan, X., Zhang, X., Qi, M., & Yue, S. (2019). Hot deformation behaviors and optimization of processing parameters for Alloy 602 CA. *Journal of Alloys and Compounds*, 770, 507–516. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.144>
7. Karsten, E., Gerstein, G., Golovko, O., Dalinger, A., Lauhoff, C., Krooss, P., Niendorf, T., Samsonenko, A., & Maier, H. J. (2019). Tailoring the Microstructure in Polycrystalline Co–Ni–Ga High-Temperature Shape Memory Alloys by Hot Extrusion. *Shape Memory and Superelasticity*, 5(1), 84–94. <https://doi.org/10.1007/s40830-019-00208-7>
8. Liu, Z., Deng, G., Wang, Z., Zhou, W., Yu, Y., & Zhou, J. (2023). Numerical simulation and experiment study on hot extrusion process of 18Ni (250) maraging steel large fan shaft for aero-engines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11301-8>
9. Medvediev, M., Frolov, Ya., & Bobukh, O. (2023). Presuvannia trub z nikelvykh i tytanovykh spлавiv (pytannia teorii i tekhnolohii). Vydavnytstvo Zhurfond
10. Lu, X., Díaz, A., Ma, J., Wang, D., He, J., Zhang, Z., & Johnsen, R. (2023). The effect of plastic deformation on hydrogen diffusion in nickel Alloy 625. *Scripta Materialia*, 226, 115210. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.115210>
11. Amininejad, A., Jamaati, R., & Hosseinipour, S. J. (2021). Influence of Deformation and Post-Annealing Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02277-8>
12. Carrozza, A., Lorenzi, S., Carugo, F., Fest-Santini, S., Santini, M., Marchese, G., Barbieri, G., Cognini, F., Cabrini, M., & Pastore, T. (2023). A comparative analysis between material extrusion and other additive manufacturing techniques: Defects, microstructure and corrosion behavior in nickel alloy 625. *Materials & Design*, 225, 111545. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111545>
13. Mandal, M., Aashrath, B., Davinci, M. A., Samantaray, D., & Vasudevan, M. (2024). Mitigating manufacturing defects in seamless tubes: A failure analysis perspective. *Procedia Structural Integrity*, 60, 510–516. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.05.070>
14. An, W., Liu, C.-z., Xiong, Q.-l., Li, Z., Huang, X., & Suo, T. (2023). Shear localization in polycrystalline metal at high-strain rates with dynamic

recrystallization: Crystal plasticity modeling and texture effect. *International Journal of Plasticity*, 165, 103616. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2023.103616>

15. Medvedev, M. I., & Bobukh, O. S. (2024). Features of the technology of manufacturing pipes from heat-resistant steel and heat-resistant alloys. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 415-430. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-415-430>

16. Medvedev, M. I., Bobukh, O. S., Boiarkin, V. V., Konovodov, D. V., & Samsonenko, A. A. Features of low-plastic nickel-alloyed steel pipes hot extrusion. *Theory and Practice of Metallurgy*. 2022, (6), 18-26. URL: https://nmetau.edu.ua/file/zh_06_2022_vv2.pdf. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2022.06>

17. Song, Y., Li, Y., Li, H., Zhao, G., Cai, Z., & Sun, M. (2022). Hot deformation and recrystallization behavior of a new nickel-base superalloy for ultra-supercritical applications. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.141>

18. Jiang, H., Li, L., Dong, J., & Xie, X. (2018). Microstructure-based hot extrusion process control principles for nickel-base superalloy pipes. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(3), 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.04.009>

19. Medvedev, M., Shyfrin, Y., Frolov, Y., & Bobukh, O. (2022). Estimation of glass lubricant viscosity for hot extrusion of Cr-Ni steel and Ni alloy tubes. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 33–37. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/033>

M. I. Medvediev¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-1230-420X

A. V. Krasiuk², Production Director, ORCID 0009-0009-8354-687X

O. M. Kuzmina^{1,*}, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0794-0583

Yu. O. Hladkyi³, Engineer, ORCID 0009-0003-1051-2587

B. I. Kvak¹, Ph. D. Student

D. O. Reviakin¹, Ph. D. Student

Yu. V. Nytkin¹, Ph. D. Student

¹ Ukrainian State University of Science and Technologies

² PJSC "CENTRAVIS PRODUCTION UKRAINE"

³ State Enterprise "State Research and Production Enterprise "Pavlograd Chemical Plant"

* Corresponding author: o.m.kuzmina@ust.edu.ua

THERMAL STATE OF TUBE BILLETS DURING PREPARATORY OPERATIONS OF HOT EXTRUSION OF NICKEL ALLOYS

Abstract. In the manufacturing process of seamless nickel-based alloy tubes by hot extrusion on horizontal hydraulic presses, the formation of surface defects remains a significant and pressing technological problem. One of the main causes for their occurrence is the instability of the temperature-velocity state of the tube billets at various stages of the technological process. Temperature deviations from the optimal narrow range of maximum technological plasticity lead to a rapid decrease in the metal's deformability, an increase in initial stresses, and a deterioration in the

overall quality of the finished tube products. This problem is particularly acute during the processing of the heat-resistant 602CA alloy, which is characterized by high sensitivity to thermal fluctuations and limited technological plasticity. The purpose of this study is to establish the fundamental regularities of changes in the temperature fields of heat-resistant 602CA alloy tube billets at the main stages of their preparation, transportation, and hot extrusion using protective glass lubricants on press installations with capacities of 16.0 and 31.5 MN. The research methodology is based on a comprehensive analysis of the actual industrial production process, direct experimental temperature measurements using thermoelectrodes, as well as mathematical modeling and the use of a system of analytical and semi-empirical relationships to calculate step-by-step temperature losses. The paper details the heat balance at five key stages: transportation of the billet from the induction heater to the lubrication table, application of the protective glass lubricant, transportation of the coated billets to the press, holding in the container before extrusion, and the actual extrusion, taking into account heat transfer through air gaps, wall thickness, and interaction with the tool. As a result of the work performed, it has been established that the total temperature decrease of the billets during auxiliary and transport operations is inversely proportional to the wall thickness of the resulting hollows. In the studied range of wall thicknesses from 40 to 120 mm and initial heating temperatures from 1050 to 1250 °C, the obtained dependence is close to linear. The developed mathematical model and proposed engineering calculation methodology allow for a scientifically justified selection of the glass lubricant's viscosity characteristics (optimally within the range of 80–100 Pa·s) according to the actual temperature regime of deformation. The practical value of the results has been confirmed under industrial production conditions: the implementation of the developed methodology during the production of a batch of 120 tubes made of the heat-resistant 602CA alloy ensured stable tool protection, the complete elimination of surface defects, an improvement in the overall quality of the finished tube products, and a significant reduction in the defect rate.

Key words: hot extrusion, nickel-base alloys, tube billets, thermal regime, heat balance, glass lubricant, billet cooling, extrusion, surface defects, plasticity.

For citation: Medvediev, M. I., Krasiuk, A. V., Kuzmina, O. M., Hladkyi, Yu. O., Kvak, B. I., Reviakin, D. O., & Nytkin, Yu. V. (2026). Thermal state of tube billets during preparatory operations of hot extrusion of nickel alloys. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 548-561. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-032>

Рукопис надійшов до редакції / Received 01.04.2026

Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026

Опубліковано / Published 30.05.2026