

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТРУБ З ЖАРОМІЦНИХ СТАЛЕЙ І ЖАРОСТІЙКИХ СПЛАВІВ

Анотація. Ціль роботи. Удосконалення технології виробництва безшовних гарячепресованих труб з жароміцних сталей і сплавів аустенітного класу, а також титанових та цирконієвих сплавів. Розробка технічних рішень по визначенню раціональних температуро-деформаційних і швидкісних режимів пресування труб та експандування попередньо свердлених заготовок, які забезпечують виконання вимог нормативних документів, а саме вимог іноземних стандартів (ASTME, DIN та ін.), ГОСТ, ДСТУ, а також зниження витратного коефіцієнту металу. **Методика досліджень.** При визначенні математичної залежності раціональних температуро-деформаційних параметрів пресування труб і експандування попередньо свердлених заготовок були використані дані експериментальних досліджень пресування труб з різних сталей і сплавів. **Результати.** Розроблено ряд технічних рішень по визначенню математичної залежності температур нагрівання заготовок від деформаційних параметрів (коефіцієнта витяжки при пресуванні труб і експандуванні попередньо свердлених заготовок), швидкості пресування, температури максимальної пластичності, залежності величини зерна аустеніта від параметрів технології пресування (температури нагрівання заготовок, геометричних параметрів заготовок та інструменту, тимчасового опору розриву) тощо. **Наукова новизна.** Визначені раціональні температуро-деформаційні режими пресування труб з жароміцних і жаростійких сплавів для авіаційної промисловості. **Практична значимість.** Розроблені режими реалізовані при розробки технології виробництва труб на вітчизняних та іноземних пресових установках з забезпеченням вимог нормативної документації.

Ключові слова: жароміцні і жаростійкі сталі, сплави, пресування труб, температура пластичності, коефіцієнт витяжки.

Посилання для цитування: Медведєв М. І., Бобух О. С. Особливості технології виробництва труб з жароміцних сталей і жаростійких сплавів. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. 2024. Вип. 38. С. 415-430. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-415-430>.

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Вступ. Широке застосування високолегованих сталей і сплавів в авіаційній промисловості та атомній енергетиці обумовлене їх високими експлуатаційними властивостями: високою корозійною стійкістю, жароміцністю і жаростійкістю, атомною міцністю й ін. технологічними характеристиками. К таким матеріалам відносяться важко деформовані титанові сплави, а також сплави на нікелевій та залізо нікелевій основі [1-3].

При виробництві труб з цих матеріалів виникає ряд технічних і технологічних проблем. Високе легування сталей і сплавів поряд з поліпшенням технологічних і експлуатаційних характеристик сприяє суттєвому підвищенню опору деформації і різкому зниженню їх технологічної пластичності, температури обробки і значному розігріву деформованого металу [2], що приводить до неможливості прокатки цих сталей і сплавів на валкових трубопрокатних установках.

Для виробництва труб з зазначених сталей і сплавів єдиним можливим способом є процес гарячого пресування, який має сприятливу схему напруженого стану- всебічне нерівномірне стиснення, що забезпечує високу деформованість металів при значних деформаціях за один цикл обробки. В зв'язку з цим важливим напрямком в забезпеченні ефективного використання металу важко деформованих сталей і сплавів є розробка раціональних температуро-деформаційних параметрів обробки, які забезпечують високу якість виробів згідно вимог нормативних документів (ГОСТ, ТУ, міжнародних стандартів) та низький витратний коефіцієнт металу.

Аналіз літературних джерел. Оцінка деформованості металів при гарячій обробці тиском зводиться до встановлення температурного інтервалу максимальної пластичності і визначення кількісних характеристик граничних можливостей формозміни (граничних ступенів деформації до руйнування) для даного процесу обробки (дані В. Л. Колмогорова та ін. 1977 р).

Визначення температурного інтервалу обробки тисненням та кількісний облік впливу температури на пластичність металів здійснюють за допомогою, так званих, діаграм пластичності, які отримують різними методами випробувань при високих температурах.

В теперішній час здійснюють такі методи випробувань:

- **випробування на розтягування** [2];

Перевага даного методу випробувань полягає в тому, що вони імітують найбільш жорсткі умови деформації, так як дільниці з розтягуючими напруженнями знаходяться в заготовках, які обробляються різними способами ОМТ, окрім пресування та гідроекструзії. Випробування на розтягування є першим етапом

досліджень і дозволяє отримати необхідні відомості з конструктивної міцності та пластичності сталі або сплава;

- **випробування на стискання** [2];
- **випробування на вигин** (дані В. Л. Колмогорова та ін. 1977р);
- **випробування на ударну в'язкість** (дані В. Л. Колмогорова та ін. 1977 р);
- **випробування на кручення** [4-9];

Багато українських та закордонних дослідників [4-8] характеризують метод кручення як найбільш зручний і чутливий для оцінки пластичності.

Перевагою метода є:

- можливість моделювання швидкостей деформації, які відповідають реальним процесам гарячого деформування;
 - найбільш висока (в порівнянні з іншими методами досліджень) чутливість показників пластичності до структурних перетворень і висока надійність;
 - переважання дотичних напружень, які краще всього виявляють здібність матеріалу до пластичної деформації; напружений стан практично не змінюється в процесі випробувань;
 - прокатка клинових зразків і прокатка на клин [2];
- **випробування на пластометрі** (дані Фірсової Т. І. 2012 р.).

З розглянутих існуючих методів оцінки пластичності виходить, що досить обґрунтованого методу оцінки деформованості металу при гарячому пресуванні труб не існує. Автори розробили метод попередньої оцінки деформованості металів для гарячого пресування труб [2], який досить точно моделює схему напруженого стану процесу пресування. Суть методу полягає в тому, що нагріту до заданої температури порожнисту заготовку з випробуваного металу на пресі видавлюють в кільцевий зазор, що зменшується по довжині, утворений матрицею і конусоподібною голкою. Це дозволяє на одному зразку отримати гаму величин деформацій і за величиною ступеня деформації, за якої на пресованій трубі з'являються дефекти у вигляді поперечних надривів, дати оцінку граничної пластичності при пресуванні в заданих температуро-швидкісних умовах обробки.

Кількісною мірою пластичності прийнята ступінь деформації зсуву в умовах відомого напруженого стану. Так, для пресування труб, відповідно до даних роботи авторів [2], ступінь деформації зсуву у вихідному перерізі осередку деформації може бути представлена у вигляді:

$$\lambda_{\text{внутр}} = 2,16 \cdot \ln \mu, \quad (1)$$

$$\lambda_{\text{внутр}} = 1,62 \cdot \ln \mu + 0,54 \cdot \ln \left[\left(\frac{R_{mp}^2}{R_k^2} \right) \cdot \mu \right]. \quad (2)$$

Показником пластичності при пресуванні труб є критичне значення ступеня деформації зсуву, яке визначається підстановкою у вирази (1) і (2) геометричних розмірів і коефіцієнтів витяжки, при яких на поверхні пресованих труб з'являються ознаки руйнування металу (поперечні надриви). Критичний коефіцієнт витяжки визначається експериментально пресуванням труб на конусоподібній голці.

Слід зазначити, що розрахунок коефіцієнтів витяжки при пресуванні труб зі змінною товщиною стінки представляє певні труднощі, що призвело до необхідності вирішення окремого завдання. Розрахункова схема пресування труб на конусоподібній голці приведена на рис 1.

Відомо, що коефіцієнт витяжки при пресуванні визначається наступним виразом:

$$\mu = \frac{R_k^2 - R_1^2}{R_{mp}^2 - R_1^2}. \quad (3)$$

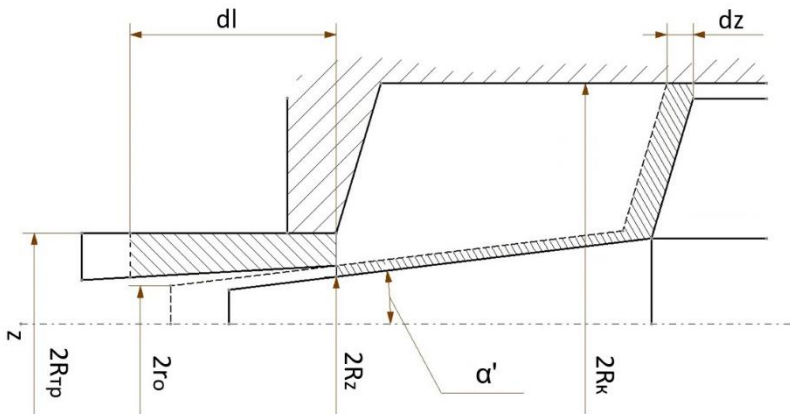


Рисунок 1 – Розрахункова схема при пресуванні труб на конусоподібній голці: R_k – радіус контейнера, мм; R_z – поточний радіус конічної голки, мм; R_{tp} – радіус труби, мм; r_0 – радіус переднього кінця конічної голки, мм; α' – кут конусної голки, град

При пресуванні труб на конусоподібній голці коефіцієнт витяжки змінюється в залежності від зміни радіуса голки і виражається через функцію відносин площини:

$$\mu_{\text{кон}} = \frac{R_{\kappa}^2 - R_Z^2}{R_{\text{mp}}^2 - R_Z^2}. \quad (4)$$

Використовуючи закон сталості обсягу, прийняли, що відрізок труби dl (рис. 1), отриманий за хід прес штемпелю dz , пов'язаний відношенням:

$$dl = \mu_{\text{кон}} \cdot dz = \frac{R_{\kappa}^2 - R_Z^2}{R_{\text{mp}}^2 - R_Z^2} \cdot dz, \quad (5)$$

де

$$R_Z = r_0 + z \operatorname{tg} \alpha'. \quad (6)$$

Інтегруючи (5) з урахуванням (6) в межах довжини голки маємо:

$$l = \frac{R_Z - r_0}{\operatorname{tg} \alpha'} + \mu \frac{R_3^2 + R_Z^2}{2R_Z \operatorname{tg} \alpha'} \ln \frac{(R_Z + R_Z)(R_Z - r_0)}{(R_Z - R_Z)(R_Z + r_0)}. \quad (7)$$

Вимірявши в експериментах l , тобто довжину труби від переднього кінця до перерізу, що відповідає початку появи руйнування, за допомогою рівняння (7) розрахуємо значення змінного радіуса голки R_Z . Критична величина коефіцієнта витяжки визначиться підстановкою в (4) значення R_Z .

Використовуючи надалі ці величини, визначимо критичну ступінь деформації зсуву, що є кількісною характеристикою пластичності досліджуваного металу.

Проводячи пресування при різних температурах і визначаючи в кожному випадку момент початку руйнування, можна вибрати і температуру максимальної пластичності, і допустимий ступінь деформації, величини які необхідні для розробки технології в промислових умовах.

Мета і завдання досліджень. Метою досліджень є вдосконалення технології виробництва труб з жароміцних і жаростійких сталей і сплавів способом гарячого пресування

Методи дослідження. При визначенні математичних залежностей раціональних температуро-деформаційних параметрів пресування труб і експандування попередньо свердлених заготовок були використані дані експериментальних досліджень пресування труб з різних сталей і сплавів.

Результати дослідження. Для підвищення достовірності визначення температуро-деформаційних режимів жароміцних і

жаростійких сталей і сплавів розроблено спосіб [10], що включає нагрів порожнистої заготовки з випробуваного матеріалу до заданої температури і видавлювання її в кільцевий зазор, що зменшується по ходу процесу, утворений матрицею і конічною голкою, при цьому нагрів заготовки здійснюють нерівномірно по її довжині відповідно до залежності [10]:

$$T_{\text{нагр}} = T_0 + k \cdot (\mu_{\text{зм}} - \mu_0). \quad (8)$$

де $T_{\text{нагр}}$ – температура нагріву в будь-якому перерізі заготовки, °С; T_0 – температура переднього кінця заготовки; k – коефіцієнт пропорційності, $k=3-3,5$; $\mu_{\text{зм}}$ – коефіцієнт витяжки, що змінюється по довжині труби; μ_0 – коефіцієнт витяжки на передньому кінці труби.

Для перевірки достовірності результатів оцінки деформованості провели експериментальні пресування труб жаростійкої сталі 15X18H12C4TЮ при різних температурах 1050, 1100, 1150 и 1200 °С. Заготовки зовнішнім діаметром 82 мм і внутрішнім діаметром, що змінюється по довжині заготовки від 20 мм до 39 мм, довжиною 170 мм нагрівали нерівномірно у вертикальному індукційному нагрівачі. При цьому температура на передньому кінці заготовки складала 1050, 1100, 1150 и 1200 °С, а температуру по її довжині визначали відповідно до формули (8). Нагріті заготовки пресували в кільцевий зазор, що зменшувався по ходу процесу, утворений матрицею і конічною голкою. Діаметр пресованих труб складав 39 мм. При цьому на одній трубі від переднього кінця до заднього кінця коефіцієнт витяжки змінювався від 6 до 85.

Деформованість даної сталі оцінювали за величиною коефіцієнта витяжки при якій на поверхні труб з'являлися перші признаки руйнування (поперечні надриви). Аналогічні експериментальні дослідження провели для жаростійких сталей 36НХТЮМ і 12Х18Н15МБР та жароміцних сплавів на нікелевій основі ХН60ВТ.ХН78Т і ХН77ТЮР. Результати досліджень приведені на рис. 2, 3.

Як видно з даних рис. 2 для досліджених сталей існує чітко виражений максимум пластичності, завдяки якому визнається температура максимальної пластичності і навпаки, для кожної температури нагріву визначена критична ступінь деформації. Залежність критичного коефіцієнта витяжки від температури для жароміцних сплавів на нікелевій основі (рис. 3) носить параболічний характер і має ярко виражений максимум при певній температурі. Даний максимум для кожного сплаву має місце при певній температурі нагріву заготовок.

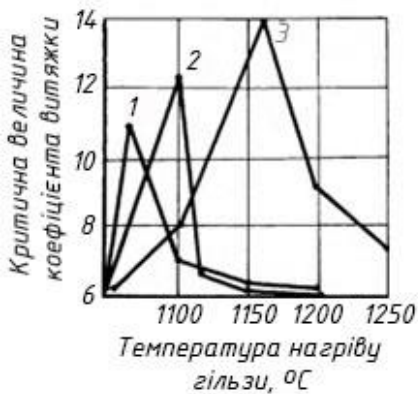


Рисунок 2 – Залежність критичних коефіцієнтів витяжок від температури для жаростійких сталей:
1 – 12X18H15MBP;
2 – 36HXТЮМ;
3 – 15X18H12C4ТЮ

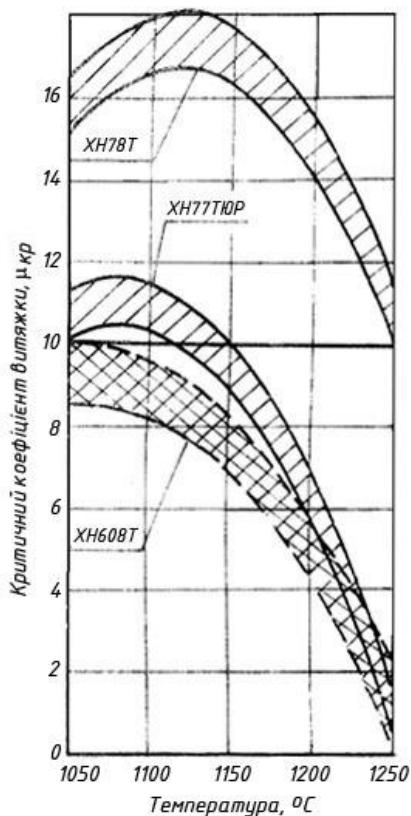


Рисунок 3 – Залежність критичного коефіцієнта витяжки від температури нагріву жароміцних сплавів

Так, для сплаву ХН78Т максимум пластичності відповідає температурі 1125 °С, ХН77ТЮР – 1075 °С, ЖН60ВТ при температурі близько 1050 °С. При цьому, чим вищий характер легування сплаву, тим менше величина критичного ступеню деформації, а максимум пластичності переходить в зону нижчих температур нагріву заготовок перед пресуванням. Це пояснюється зростанням опору деформації і, в свою чергу, зростанням температури метала в осередку деформації. Так для сталей 15Х18Н12С4ТЮ, 36НХТЮМ і 12Х18Н15МБР величина деформаційного розігріву складає 40-80 °С, а для нікелевого сплаву ХН60ВТ ця величина досягає 150-175 °С. Проведені експериментальні дослідження з виміром підвищення температури при пресуванні труб з коефіцієнтом витяжки $\mu_{кр} = 10$ для даного сплаву величина розігріву складала 1080-1070 °С.

Як було показано вище, температурний інтервал максимальної пластичності багатьох авторів визначають по результатам іспитів на гаряче кручення [4-8].

Такі дослідження провели для ряду високолегованих сталей і сплавів на нікелевій основі. Результати досліджень представлені на рис. 4-6.

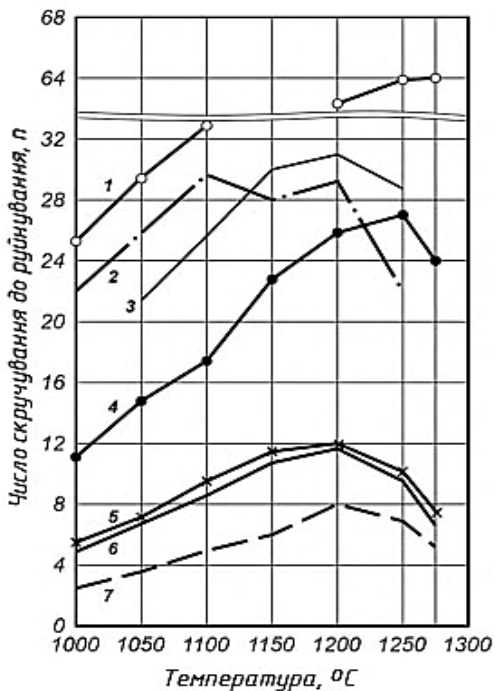


Рисунок 4 – Температурні інтервали максимальної пластичності за результатами випробувань на гаряче кручення для сплавів: 1 – ХН78Т; 2 – ХН77ТЮР; 3 – 12Х18Н10Т; 4 – ХН70В; 5 – ХН70Ю; 6 – ХН60ВТ; 7 – Н70МФ

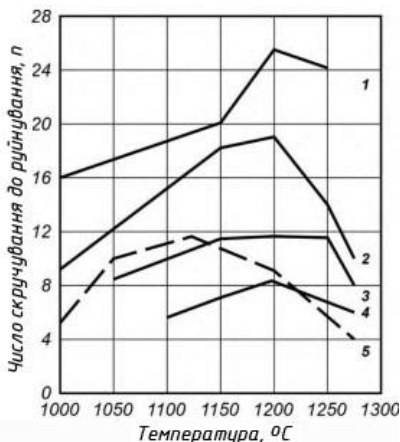


Рисунок 5 – Температурні інтервали максимальної пластичності за результатами випробувань на гаряче кручення для сплавів: 1 – ХН45МКТЮБ; 2 – 06Х23Н28МДТ; 3 – ХН45МБЦ; 4 – ХН40МДТЮ; 5 – ХН55МБЦ; 6 – 03Х20Н32МЗБ

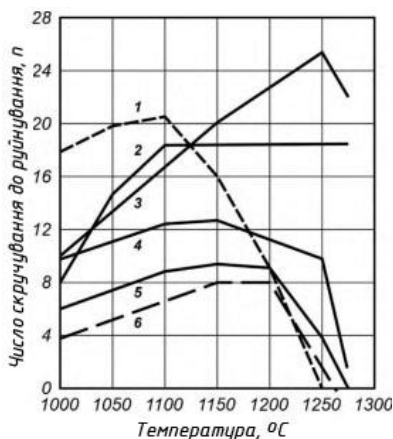


Рисунок 6 – Температурні інтервали максимальної пластичності за результатами випробувань на гаряче кручення для сплавів: 1 – ХН45МКТЮБ; 2 – 06Х23Н28МДТ; 3 – ХН45МБЦ; 4 – ХН40МДТЮ; 5 – ХН55МБЦ; 6 – 03Х20Н32МЗБ

Для зіставлення температурних інтервалів максимальної пластичності, визначених за результатами пресування на конусоподібній голці і гаряче кручення зразків, пластичність висловили через ступінь деформації зсуву. Вважаючи процес крутіння монотонним ступінь деформації згідно [2, 4-8] може бути розраховано за такою залежністю:

$$\lambda_{ркр} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot N_{кр}}{l} \quad (9)$$

де r – радіус зразка; $N_{кр}$ – кількість оборотів зразка до руйнування; l – довжина робочої частини зразка.

При пресуванні пластичність розраховували згідно залежності (1).

На рис. 7 наведені зіставлення температурних інтервалів максимальної пластичності, отриманих за результатами досліджень з пресування труб на конусоподібній голці і кручення зразків, з яких випливає, що має місце розбіжність максимумів пластичності високолегованих сталей. Така ж картина спостерігається і при зіставленні даних по сплавам на нікелевій основі, як приклад наведено результати по сплаву ХН60ВТ (рис. 8).

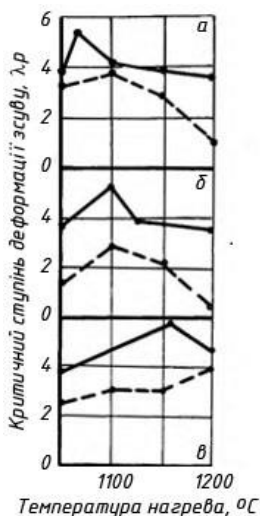


Рисунок 8 – Температурні інтервали максимальної пластичності сталей:
 а – 12Х18Н15МБР,
 б – 36НТЮМ,
 в – 15Х18Н12С4ТЮ

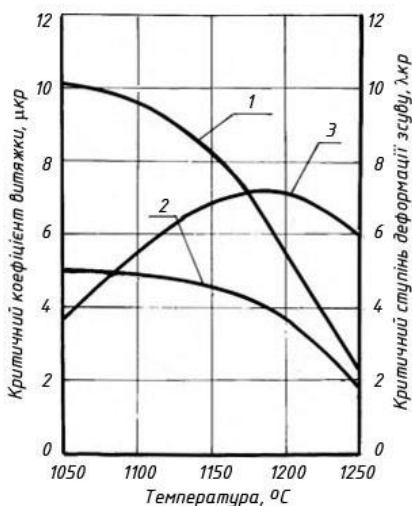


Рисунок 9 – Залежність критичного ступеня деформації від температури сплаву ХН60ВТ: 1 – $\mu_{кр}$; 2 – ступінь деформації зсуву $\lambda_{кр}$ при пресуванні; 3 – ступінь деформації зсуву $\lambda_{кр}$ при крученні

Дані розбіжності максимумів пластичності пояснюється тим, що процес пресування труб відрізняється від крутіння зразків високими разовими деформуваннями і малою тривалістю процесу. У цих умовах тепло, що виділяється значно підвищує температуру металу в осередку деформації.

Розбіжності максимумів пластичності пояснюється незначною величиною неврахованого теплового ефекту роботи деформації. Так для сталей 15Х18Н12С4ТЮ, 36НХТЮМ і 12Х18Н15МБР величина деформаційного розігріву складає 40-80 °С, а для нікелевого сплаву ХН60ВТ така величина досягає 150-175 °С. Проведені експериментальні дослідження з виміром підвищення температури при пресуванні труб з коефіцієнтом витяжки $\mu_{кр}=10$ для даного сплаву ХН60ВТ величина розігріву склала 1060-1070 °С.

Проведений комплекс досліджень дозволяє визначати оптимальний температурно-деформаційний режим пресування труб та рекомендувати наступне:

- провести випробування матеріалу на гаряче кручення і визначити

температурний інтервал максимальної пластичності (залежність $n_{кр} = f(T)$);

- розрахувати тепловий ефект при заданих умовах формозміни і скорегувати температурний інтервал, отриманий за результатами крутіння;

- провести пресування труб на конусоподібній голці при трьох температурах, що знаходяться в інтервалі максимальної пластичності і визначити допустимий (без руйнування) коефіцієнт витяжки.

Проведений комплекс експериментальних досліджень дозволив розробити ряд способів пресування труб із жароміцних і жаростійких сталей і сплавів [11-14].

Так, в роботі [11] запропоновано спосіб пресування труб шляхом зміни умов охолодження пресованих труб в залежності від технологічних параметрів процесу пресування, які забезпечують отримання регламентованого середнього діаметру зерна (структури металу труб), яке відповідає вимогам вітчизняних та міжнародних стандартів з корозійної стійкості труб. Спосіб пресування включає нагрів порожнистих заготовок до температури максимальної пластичності, пресування в кільцевий зазор, утворений матрицею та голкою, і подальше охолодження у воді, при цьому, згідно з роботою [11], пресування здійснюють з коефіцієнтом витяжки в межах 5-30 та швидкостями деформування в межах 100-350 мм/с, витримують пресовану трубу на повітрі в межах 35-95 с перед охолодженням у воді, при цьому середній діаметр зерна аустеніту готових труб визначають за формулою:

$$D = 0,39T_{\text{деф.}} + 1,03\mu - 0,307V_{\text{пр.}} - 1,2\sigma_{\text{в.}} + 0,057\tau - 288,6, \quad (9)$$

де D – середній діаметр зерна аустеніту готових труб, мкм; $T_{\text{деф.}}$ – температура максимальної пластичності деформованого металу, °С; μ – коефіцієнт витяжки при пресуванні труб; $V_{\text{пр.}}$ – швидкість деформування, мм/с; $\sigma_{\text{в.}}$ – межа міцності деформованого металу при температурі деформації, кгс/мм²; τ – час витримки труби на повітрі, с.

В залежності від геометричних розмірів пресованих труб і деформаційних параметрів процесу для обраної марки сталі визначають температуру максимальної пластичності з літературних даних, наприклад за результатами випробувань на гаряче скручування зразків, визначають коефіцієнт витяжки при пресуванні труби, який повинен знаходитись в межах 5-30, для температури максимальної пластичності визначають міцність деформованого металу та час витримування пресованої труби на повітрі і проводять подальше охолодження у воді, а потім розраховують середній діаметр зерна аустеніту пресованих труб

згідно з даними роботи [11]. При відхиленні середнього діаметру зерна аустеніту від вимог нормативних документів проводять корегування технологічних параметрів до відповідності значень середнього діаметру зерна аустеніту вимогам вітчизняних та міжнародних стандартів з корозійної стійкості.

При пресуванні важкодеформованих сплавів в роботі [12] для забезпечення вимог нормативних документів (а саме, вимог міжнародних стандартів, а також ГОСТ, ТУ) запропоновано змінити параметри нагріву порожнистих заготовок і провести його згідно залежності:

$$T_{\text{н}} = T_{\text{пл}} + K \cdot \left(\frac{1000}{S_r} - 20 \right). \quad (10)$$

де $T_{\text{пл}}$ – температура максимальної пластичності деформованого металу, $^{\circ}\text{C}$; K – коефіцієнт пропорційності ($K=6$ – для вуглецевих, легованих та аустенітних нержавіючих сталей, $K=10$ – для феритних нержавіючих, титанових, нікелевих та цирконієвих сталей); S – товщина стінки гільзи, мм.

В роботі [13] температуру нагріву заготовок запропоновано визначати в залежності від коефіцієнту витяжки при пресуванні труб:

$$T_{\text{н}} = T_{\text{шт}} - K \cdot \left[10 - \frac{100}{\mu_{\text{пр}}} \right], \quad (11)$$

де: $T_{\text{шт}}$ – температура максимальної пластичності деформованого металу, $^{\circ}\text{C}$; K – коефіцієнт пропорційності ($K=10$ – для вуглецевих, легованих та аустенітних нержавіючих сталей, $K=6$ – для феритних нержавіючих, титанових, нікелевих та цирконієвих сплавів); $\mu_{\text{пр}}$ – коефіцієнт витяжки при пресуванні.

Рекомендовані параметри процесу нагріву гільз були визначені експериментально.

Результатом запропонованих режимів є забезпечення мінімальних силових умов пресування та високого рівня механічних властивостей готової труби, які відповідають вимогам нормативної документації, при одночасному зниженні витратного коефіцієнту металу.

В роботі [14] запропоновано при виготовленні труб з корозійностійких сталей, сплавів на основі титану, цирконію, нагрівати суцільні заготовки до температури $1100 - 1180^{\circ}\text{C}$, наносити технологічне мастило, їхню прошивку, підігрів отриманих гільз до температури максимальної пластичності, пресування труби в кільцевий

зазор, який утворюється матрицею та голкою, швидкість деформування при прошивці визначати за формулою:

$$v_{\text{пр}} = \frac{220}{\mu_{\text{пр}}}$$

де $\mu_{\text{пр}}$ – коефіцієнт витяжки при прошивці, що дорівнює 1,2-1,5.

Рекомендовані параметри процесу нагріву гільз визначені експериментально.

Результатом запропонованого способу є забезпечення високого рівня якості внутрішньої поверхні готової труби, які відповідають вимогам нормативної документації (міжнародних стандартів, а також ГОСТ і ТУ) при одночасному зниженні витратного коефіцієнту металу.

Висновки. Розроблено ряд технічних рішень по визначенню математичної залежності температур нагрівання заготовок від деформаційних параметрів (коефіцієнта витяжки при пресуванні труб, швидкості пресування, температури максимальної пластичності), залежності величини зерна аустеніту від параметрів технології пресування (температури нагрівання заготовок, геометричних параметрів заготовок та інструменту, тимчасового опору розриву) та інші. Розроблені режими реалізовані для розробки технології виробництва труб на вітчизняних та іноземних пресових установках з забезпеченням вимог нормативної документації.

Фінансова підтримка. Дослідження проводились в рамках 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

1. Друян В. М., Гуляев Ю. Г., Чукмасов С. О. Теорія та технологія трубного виробництва. Підручник. Дніпропетровськ: РВА "Дніпро-VAL", 2000. 587 с.
2. Медведєв М. І., Фролов Я. В., Бобух О. С. Пресування труб з нікелевих і титанових сплавів(питання теорії і технології). Дніпро, 2023. 299 с.
3. Гуляев Ю. Г., Друян В. М., Шифрин Е. И. Стальные трубы. Производство, применение, сортамент: Справочник. Днепропетровск : РИА "Днепр-ВАЛ", 2002. 350 с.
4. Experimental estimation of maximal ductility and flow curves of titanium alloys with hot-torsion tests / M. Medvediev, Y. Frolov, V. Andreiev, O. Bobukh, A. Vovk // *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2019. №5-6. С. 114-122. <https://doi.org/10.34185/0543-5749.2019-5-6-114-122>
5. Application of the torsion test in calculating the extrusion force / R. Pernis, Y. Bidulska, T. Kwackaj, I. Pokorniy // *Archives of metallurgy and materials*. 2011. Vol.

56. No. 1. P. 81-85. <https://doi.org/102478/v10172-011-0009-9>

6. Pintão C. A., Corrêa D. R., Grandini C. R. (2019). Torsion modulus as a tool to evaluate the role of thermo-mechanical treatment and composition of dental Ti-Zr alloys. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8. Iss. 5. P. 4631-4641. <https://doi.org/10/1016/j.jmrt.2019.08.007>

7. Pintão C. A. F., Correa D. R. N., Grandini C. R. Torsion modulus using the technique of mechanical spectroscopy in biomaterials. *J Mech Sci Technol*. 2017. Vol. 31. P. 2203–2211. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0416-6>

8. Yang L. H., Wu L. Z. Determination of hardening coefficient of large strain constitutive model based on torsion tests. *Advanced materials research*. 2011. Vol. 197-198. P. 1528-1531. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.197-198.1528>

9. Yield Stress and Reversible Strain in Titanium Nickelide Alloys after Warm Abc Pressing / A. Lotkov, V. Grishkov, A. Baturin et al // *Materials*. 2019. 12. Vol. 3258. P. 1-14. <http://doi.org/10.3390/ma12193258>

10. Пат. 125844 Україна. МПК В 21 С 23/01. Спосіб попередньої оцінки деформовності металу для гарячого пресування труб / Проїдак Ю. С., Фролов Я. В., Медведєв М.І. та інш. Опубл. 25.05.2018, Бюл. №10.

11. Пат. 148925 Україна. Спосіб пресування труб з аустенітних сталей. МПК (2021.01) В21С 23/00, В21С 37/00 / Медведєв М. І., Фролов Я. В., Шифрін Є. І., Бобух О. С. Опубл. 29.09.2021, Бюл. №39

12. Пат. 148267 Україна. Спосіб виготовлення труб з важкодеформівних металів. МПК В21С 23/08 (2006.01) / Медведєв М. І., Фролов Я. В., Шифрін Є. І. та ін. Опубл. 21.07.2021, Бюл. №29.

13. Пат. 151552 Україна. Спосіб виготовлення труб з важкодеформівних металів. МПК В21С 23/00, В 21С 37/06 / Медведєв М. І., Бобух О. С., Самсоненко А. А., Березос В. О. Опубл. 10.08.2022, Бюл. №32.

14. Пат. 155960 Україна. Спосіб виготовлення труб зкорозійностійких сталей і сплавів. МПК В21С 23/00, В 21С 37/00 / Медведєв М. І., Бобух О. С., Самсоненко А. А., Березос В. О. Опубл. 25.04.2024, Бюл. №17.

References

1. Druian, V. M., Hulciaiev, Yu. H., & Chukmasov, S. O. (2000). *Teoriia ta tekhnolohiia trubnoho vyrobnystva*. RVA "Dnipro-VAL"

2. Medvediev, M. I., Frolov, Ya. V., Bobukh, O. S. (2023). *Presuvannia trub z nikelevykh i tytanovykh splaviv(pytannia teorii i tekhnolohii)*

3. Gulyaev, Y. G., Druyan, V. M., & Shifrin, E. I. (2002). *Fistula ferro. Productio, application, assortment: Reference book*. RIA "Dnipro-VAL"

4. Medvediev, M., Frolov, Y., Andreiev, V., Bobukh, O., & Vovk, A. (2019). Experimental estimation of maximal ductility and flow curves of titanium alloys with hot-torsion tests. *Metalurhiina ta hirnychorudna promyslovist*, (5-6), 114-122. <https://doi.org/10.34185/0543-5749.2019-5-6-114-122>

5. Pernis, R. Bidulska, Y., Kvackaj, T., & Pokorniy, I. Application of the torsion test in calculating the extrusion force. *Archives of metallurgy and materials*, 56(1), 81-85. <https://doi.org/102478/v10172-011-0009-9>

6. Pintão, C. A., Corrêa, D. R., & Grandini, C. R. (2019). Torsion modulus as a

tool to evaluate the role of thermo-mechanical treatment and composition of dental Ti-Zr alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4631-4661. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.08.007>

7. Pintão, C. A. F., Correa, D. R. N. & Grandini, C. R. (2017). Torsion modulus using the technique of mechanical spectroscopy in biomaterials. *J Mech Sci Technol.*, 31, 2203–2211. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0416-6>

8. Yang L. H., & Wu L. Z. (2011). Determination of hardening coefficient of large strain constitutive model based on torsion tests. *Advanced materials research*, 197-198, 1528-1531. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.197-198.1528>

9. Lotkov A., Grishkov V., & Baturin A. et al. (2019). Yield Stress and Reversible Strain in Titanium Nickelide Alloys after Warm Abc Pressing. *Materials*, 12, 3258. <https://doi.org/10.3390/ma12193258>

10. Pat. 125844 Ukraine. (2018). Sposib poperednoi otsinky deformovnosti metallu dlia hariachoho presuvannia trub, *Bul.* No. 10

11. Pat. 148925 Ukraine. (2021). Sposib presuvannia trub z austenitnykh stalei.

12. Sposib vyhotovlennia trub z vazhkodeformivnykh metaliv, *Bul.* No. 39

12. Pat. 148267 Ukraine. (2021). Sposib vyhotovlennia trub z vazhkodeformivnykh metaliv, *Bul.* No. 29

13. Pat. 151552 Ukraine. (2022). Sposib vyhotovlennia trub z vazhkodeformivnykh metaliv, *Bul.* No. 32

14. Pat. 155960 Ukraine. (2024). Sposib vyhotovlennia trub zkoroziiinostiikykh stalei i splaviv, *Bul.* No. 17

M. I. Medvedev¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-1230-420X
O. S. Bobukh¹, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-7254-3854

¹ *Ukrainian State University of Science and Technologies*

FEATURES OF THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING PIPES FROM HEAT-RESISTANT STEEL AND HEAT-RESISTANT ALLOYS

Abstract. The purpose of the work. Improvement of the production technology of seamless hot-pressed pipes from heat-resistant steels and alloys of the austenitic class, as well as titanium and zirconium alloys. Development of technical solutions for determining rational temperature-deformation and speed modes of pipe pressing and expansion of pre-drilled blanks, which ensure compliance with the requirements of regulatory documents, namely requirements of foreign standards (ASTME, DIN, etc.), GOST, DSTU, as well as a reduction in the consumption rate of the metal.

Research methodology. When determining the mathematical dependence of the rational temperature-deformation parameters of pipe pressing and expansion of pre-drilled blanks, data from experimental studies of pipe pressing made of various steels and alloys were used. **Results.** A number of technical solutions have been developed to determine the mathematical dependence of the heating temperatures of the workpieces on the deformation parameters (coefficient of extraction during pressing of pipes and expansion of pre- drilled workpieces), pressing speed, temperature of maximum plasticity), dependence of the size of the austenite grain on the parameters

of the pressing technology (temperature of heating the workpieces, geometric parameters of the workpieces and tool, temporary tear resistance) and others. **Scientific novelty.** Rational temperature-deformation regimes for pressing pipes made of heat-resistant and heat-resistant alloys for the aviation industry are determined. **Practical significance.** The developed regimes were implemented during the development of pipe production technology at domestic and foreign press installations to ensure the requirements of regulatory documentation.

Key words: heat-resistant and heat-resistant steels, alloys, pipe pressing, plasticity temperature, extraction coefficient.

For citation: 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>

*Стаття надійшла до редакції збірника 29.09.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)*