

Кругляков О. А.
Медведєв М. І.
Коноводов Д. В.
Губа Р. В.

СХЕМИ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ МАТРИЦЬ ЗІ СТАЛІ З РЕГУЛЬОВАНИМ АУСТЕНІТНИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Найбільш теплостійкі традиційні штампові сталі на феритно-перлітній основі з карбідним та змішаним зміцненням при нагріванні вище 650-700 °С суттєво знижують міцність, що призводить до швидкого виходу інструменту з ладу. Не вирішує проблему і застосування жароміцних аустенітних сталей і сплавів, які при високих температурах перевершують за міцністю сталі феритного класу і за рахунок цього іноді забезпечують значне підвищення стійкості інструменту. Однак внаслідок їх схильності до розтріскування, поганої оброблюваності різанням, високої вартості та дефіцитності компонентів, що входять до складу, їх застосування дуже обмежене. Штампові сталі з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації є новим і єдиним класом інструментальних сталей, для яких характерне явище збереження гарячого деформаційного зміцнення (гарячий наклеп). Ступінь наклепу в сталі, отримана після аустенізації за температури 1150 °С з подальшою циклічною деформацією при 450 °С, посилюється при подальшій циклічній деформації за температури 700-850 °С. Аустенізація за температури 1150 °С, витримка і попередня деформація при 450 °С з подальшим охолодженням до кімнатної температури і швидким нагріванням до температури деформації 750 °С стабілізує стан гарячого наклепу і сприяє максимальному зміцненню сталі за температури 700-850 °С. З урахуванням стабілізації гарячого наклепу в роботі було запропоновано дві технологічні схеми деформаційного зміцнення пресових матриць, що забезпечують їхню високу експлуатаційну стійкість. Встановлено кількісні залежності між зміною розмірів матриці та температурою нагрівання або охолодження. Отримані в роботі залежності дають змогу проєктувати початкові розміри пресового інструмента, враховуючи особливості фазових перетворень у сталях з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації.

Ключові слова: інструментальна сталь, штампова сталь, гарячий наклеп, матриця, пресування, технологічна схема, деформаційне зміцнення, геометричні розміри, фазові перетворення.

Стійкість пресового інструменту багато в чому визначає економічну ефективність процесів гарячого формоутворення точних заготовок. Наявні штампові сталі, що застосовуються для виготовлення робочого інструменту, не здатні задовольняти повною мірою експлуатаційні вимоги до інструменту через низку причин, таких як: низька технологічність, дефіцит і висока вартість компонентів, які входять до складу, інтенсивне знеміцнення інструменту під час експлуатації [1-4]. Це стосується і процесу пресування труб і профілів з мідних і титанових сплавів, що важко деформуються, за якого інструмент розігрівається до 700–850 °С і вище [5].

Сталі з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації (сталі з РАПЕ) – новий клас інструментальних сталей для гарячого пресування [6, 7]. У вихідному стані такі сталі мають структуру на базі α -твердого розчину і легко обробляються різанням. Під час нагрівання до робочих температур 700-850 °С ці сталі зазнають α - γ -перетворення і зберігають аустенітну структуру протягом усієї високотемпературної експлуатації [8, 9]. Основним інноваційним ефектом при створенні сталей з РАПЕ є використання сили деформації і високих температур для підвищення міцності інструменту (ефект Озерського-Круглякова), тобто такі сталі мають яскраво виражену схильність до гарячого наклепу. До основних процесів, що забезпечують стабілізацію гарячого наклепу, належать: деформаційне зміцнення; дисперсійне та нанофазне зміцнення; зміцнення від поліморфних перетворень і зміцнення від деформації у двофазній ($\gamma + \alpha$)-області. Показано, що основний внесок у зміцнення під час гарячої деформації сталі з РАПЕ вносять деформаційне зміцнення, а також зміцнення під час деформації у двофазній ($\gamma + \alpha$)-області [10]. Стійкість пресового інструменту зі сталей з РАПЕ у 5–10 разів перевищує стійкість матриць і пресшайб зі сталі високої теплостійкості 3X2B8Ф. За своїми властивостями сталі з РАПЕ перевершують усі традиційні штампові сталі в діапазоні температур експлуатації 600-850 °С.

Метою роботи є розробка схем деформаційного зміцнення пресових матриць, що виготовлені зі сталей з регульованим аустенітним перетворенням при експлуатації.

Під час розробки технологічних режимів зміцнювальної обробки матриць зі сталі з РАПЕ виходили з такого:

1. Найбільший ефект зміцнення і підвищена термічна стабільність зміцненого стану досягається в тому випадку, якщо перші цикли багаторазової пластичної деформації аустеніту здійснюються в дорекристалізаційному інтервалі температур (400–500 °С).

2. Зміцнювальна обробка повинна здійснюватися на наявному пресовому обладнанні.

3. Зміцнювальна обробка повинна забезпечувати задані геометричні розміри матриць (тобто повинна виключати подальшу механічну обробку).

Було досліджено та впроваджено у виробництво дві технологічні схеми зміцнення.

Під час обробки за першою схемою піддані остаточному механічному обробленню матриці нагрівали до температури 930–950 °С, витримували 20–30 хв, охолоджували на повітрі до 350–400 °С, а потім встановлювали на прес і здійснювали пресування злитків. При цьому необхідно лише зазначити, що діаметр калібрувального отвору матриці виконувався за верхнім допуском на розмір.

Протягом перших 5–8 циклів пресування відбувається пластична деформація тонкого поверхневого шару матриці і поступове зміцнення цієї зони. Наприклад, за діаметра калібрувального отвору 25–40 мм сумарне зменшення діаметра зазвичай не перевищує 0,3–0,5 мм, що перебуває в межах допуску на розміри продукції, що випускається (труб, прутків, профілів). Протягом цих же циклів температура матриці поступово підвищується за рахунок тепла злитків і виходить на робочий режим. Після 8–10 циклів пресування розміри матриці стабілізуються і настає тривалий період експлуатації інструменту, що за стійкістю перевищує всі наявні сучасні штампові сталі. Спосіб зміцнення за першою схемою вельми простий у реалізації та не вимагає будь-якого спеціального оснащення.

Основним недоліком розглянутої технології зміцнювальної обробки інструменту зі сталі з РАПЕ є те, що практично неможливо керувати ступенем деформації за кожен цикл. Під час пресування деяких мідних і титанових сплавів, що важко піддаються деформації, спричинене пластичною деформацією зменшення розміру (запливання) калібрувального отвору, може випереджати процес зміцнення сталі. Це зумовлює необхідність розточування матриць.

Цей недолік практично усувається при використанні другої технологічної схеми зміцнення, яка передбачає багаторазову пластичну деформацію за допомогою спеціальних пуансонів. Метою такої деформації є зміцнення аустеніту і забезпечення заданих розмірів інструменту перед початком його експлуатації.

Під час пресування геометричні розміри матриці залежать від величини деформації поверхневого шару і отвору для калібрування, а також від теплового розширення і фазових перетворень.

Для зміцнення пресових матриць зі сталей із РАПЕ було розроблено один із режимів зміцнювальної обробки [11]: нагрівання до 950–1000 °С, витримка 30 хв.; підстужування на повітрі до температури 600–500 °С, а потім посадка в піч із температурою 400 °С; витримка в печі для вирівнювання температури в перерізі; деформація зони калібрувального отвору матриці шляхом трьох-чотириразового обтиснення зі ступенем 0,5–3 % за цикл; нагрівання матриці до температури експлуатації.

Деформацію можна здійснювати безпосередньо на виробничих пресах спеціальними пуансонами, а подальше нагрівання до робочих температур досягається під час експлуатації за рахунок тепла злитків, що пресуються.

Для забезпечення заданого ступеня деформації матриці виготовляють із припуском на обтиск. Під час розрахунку величини припуску необхідно було пов'язати змінні розміри матриці із заданим ступенем деформації ε .

Розрахунок було виконано для матриць $\varnothing 115 \times 40$ мм, які використовують на горизонтальних гідравлічних пресах із силою 15 МН (рис. 1).

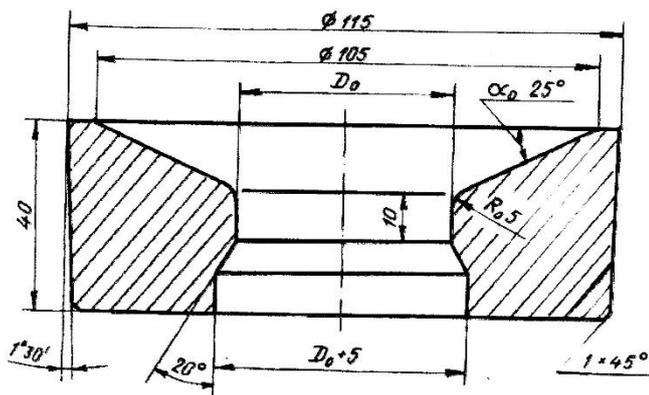


Рис. 1. Пресова матриця

Припуск залишали в конусоподібній зоні матриці. При цьому змінювався радіус калібрувального паска R_0 , діаметр калібрувального отвору D_0 і кут конуса α_0 .

Для розрахунку зміни зазначених параметрів залежно від заданого ступеня деформації можна використовувати схему, наведену на рис. 2.

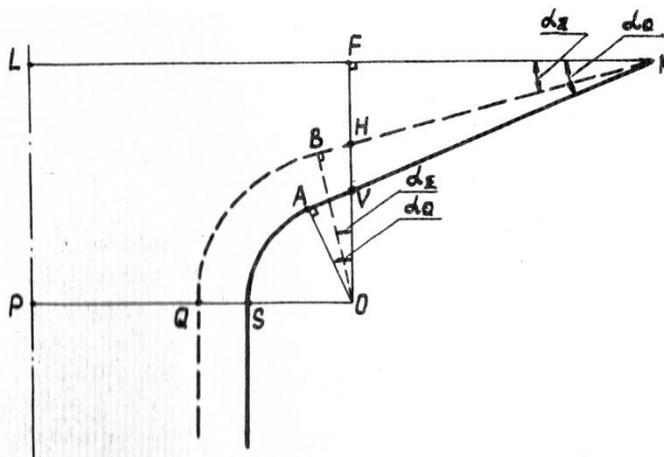


Рис. 2. Схема зміни розмірів матриці з припуском

Введемо позначення:

$$LN = \frac{L}{2} = \frac{105}{2} \text{ – радіус конуса матриці, мм;}$$

$$PS = \frac{D_0}{2} \text{ – радіус калібрувального отвору, мм;}$$

$$PQ = \frac{D_\Sigma}{2} \text{ – радіус калібрувального отвору з припуском, мм;}$$

$$OA = R_0 = 5 \text{ – радіус калібрувального паска, мм;}$$

$$OB = R_\Sigma \text{ – радіус калібрувального паска з припуском, мм;}$$

$$\alpha_0 = 25^\circ \text{ – кут конусу.}$$

Заданий ступінь деформації можна виразити як:

$$\varepsilon_\Sigma = \frac{R_\Sigma - R_0}{R_0} 100\%. \tag{1}$$

Звідси виходить, що радіус калібрувального паска з припуском складає:

$$R_{\Sigma} = R_0(1 + 0,01\varepsilon_{\Sigma}), \tag{2}$$

а діаметр калібрувального отвору з припуском:

$$D_{\Sigma} = D_0 - 0,02R_0\varepsilon_{\Sigma}. \tag{3}$$

Кут конуса матриці з припуском α_{Σ} визначимо зі співвідношень відрізків (рис. 2) та виразимо як:

$$\alpha_{\Sigma} = \arctg \left(\frac{MK - R_{\Sigma} \sqrt{M^2 + K^2 - R_{\Sigma}^2}}{M^2 - R_{\Sigma}^2} \right), \tag{4}$$

де

$$M = \frac{L - 2R_0 - D_0}{2}$$

$$K = \frac{R_0 - M \sin \alpha_0}{\cos \alpha_0}$$

при

$$0 \leq \alpha_{\Sigma} \leq \alpha_0$$

Таким чином, для знаходження параметрів матриці з припуском залежно від заданого ступеня деформації, слід розв'язати три рівняння: (2) – (4).

Конфігурація пуансона, що забезпечує заданий ступінь деформації, також визначається за наведеним розрахунком. Обраний профіль пуансона може забезпечити одноразове або багаторазове пластичне деформування робочої зони матриці (рис. 3).

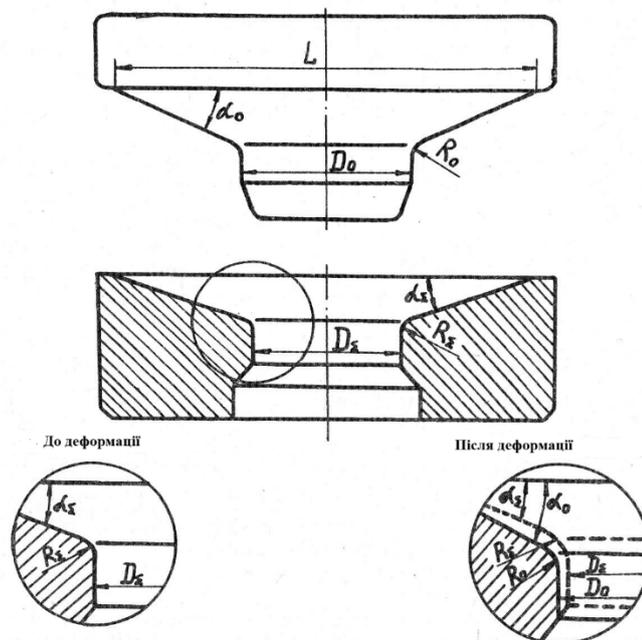


Рис. 3. Схема зміцнення пресової матриці із заданим ступенем деформації

У випадку одноразового деформування задають кінцеві розміри матриці R_0 , D_0 , α_0 в цьому випадку відбувається разове зміцнення за рахунок змінання припуску.

Загальний ступінь деформації можна розділити на проміжні і піддавати матрицю багаторазовому зміцненню. Для цього слід мати набір пуансонів різної конфігурації, параметри яких можна розрахувати за отриманими формулами.

У кожному конкретному випадку, задаючи ступінь деформації, необхідно враховувати температуру розігріву інструменту в момент зміцнення, тривалість витримки до початку експлуатації, марку і типорозмір пресованого матеріалу, а також температуру розігріву злитка.

При ступені деформації до 2–3 % зміцнення матриці можна зробити за один цикл. Тоді параметри пуансона відповідатимуть необхідним розмірам матриці (R_0 , D_0 , α_0), а розміри матриці з припуском визначаються за формулами (2)–(4).

Якщо обраний ступінь деформації становить 4–5 % і більше, то доцільно здійснювати зміцнення за кілька циклів. Деформація за кожен цикл має становити 1–3 %.

Після вибору ступеня деформації ε необхідно розрахувати параметри пуансона і розміри матриці з припуском на деформацію.

Параметри матриці до деформації визначаються з урахуванням граничного ступеня деформації ε , а розміри пуансона з урахуванням проміжної деформації $\varepsilon_{\Sigma-K_i}$ (де i - величина кроку проміжних деформацій; K – ціле додатне число).

Значення розрахованих параметрів матриці з припуском і розмірів зміцнювальних пуансонів, залежно від заданого ступеня деформації, доцільно представити у вигляді таблиці.

Таблиця 1

Зразок складання таблиці проміжних розмірів матриці та пуансона
(на прикладі матриці розміром $\varnothing 115 \times 40$ мм з калібрувальним отвором $\varnothing 23,5$ мм)

Ступінь заданої деформації, %	Параметри інструменту		
	R, мм	D, мм	α
Σ	5,50	22,5	24°19'
$\Sigma-1i$	5,45	22,6	24°23'
$\Sigma-2i$	5,40	22,7	24°27'
.....			
$\Sigma-(K-1)i$	5,05	23,4	24°56'
$\Sigma-Ki$	5,00	23,5	25°00'

За запропонованою методикою було розроблено карту калібрувань матриць і пуансонів усієї номенклатури типорозмірів матриць $\varnothing 115 \times 40$ мм горизонтального гідравлічного преса силою 15 МН. Для розрахунку параметрів пресового інструменту залежно від заданого ступеня деформації було складено програму алгоритмічною мовою Фортран-4.

Зміну розмірів матриці з урахуванням фазових перетворень у процесі нагрівання й охолодження досліджували на матрицях зі сталі РАПЕ із зовнішнім діаметром 109 мм і внутрішніми діаметрами 30,9; 40,0; 45,7 мм.

Вимірювання проводили за допомогою індикатора-нутроміра підвищеної точності (ГОСТ 9384-60), який налаштовували за кінцевими мірками, і мікрометра типу МК100-125 мм з нерухомою п'ятою та гвинтом мікрометричного подавання з твердого сплаву. Тривалість вимірювання (контакту інструменту з матрицею) не перевищувала 2–3 с. Температуру контролювали термопарою, привареною до матриці.

Залежності, що характеризують зміну внутрішнього і зовнішнього діаметрів матриць від температури, були отримані шляхом обробки експериментальних результатів відомими методами математичної статистики.

Під час побудови моделі вводили значення температури t і діаметра d внутрішнього калібрувального отвору матриці. У всьому діапазоні досліджуваних температур, крім інтервалів 650–700°C і 800–840°C, виявилось достатнім апроксимувати регресію Δd на t лінійною функцією (лінійна регресія), а в зазначених інтервалах регресія була апроксимована за допомогою многочлена другого порядку (параболічна регресія другого порядку). При цьому коефіці-

енти регресії були розраховані кроковим регресійним методом. Функціональна залежність коефіцієнтів регресії від величини внутрішнього діаметра d визначена многочленом другого порядку.

Математичний опис залежності зміни внутрішнього і зовнішнього діаметрів матриці від вихідних розмірів і температури нагріву та охолодження може бути представлено у вигляді таких рівнянь регресії.

1. Нагрівання. Зміна діаметра внутрішнього калібрувального отвору матриці, мм:

$$\Delta d(d, t) = \begin{cases} (0,0035d^2 - 0,065d + 2,67)t/10^4 -; \\ -(0,03d^2 - 1,9d + 31,07)/10^2, & \text{якщо } t < 650 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ -(0,009968d^2 - 0,742046d + 14,69275)t^2/10^5 + \\ +(0,013457d^2 - 1,001763d + 19,8353)t/10^4 - \\ -(0,0455d^2 - 3,4000316d + 67,15923), & \text{якщо } 650 \text{ } ^\circ\text{C} < t < 700 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ -(0,036d^2 - 2,553d + 48,518)t/10^4 + \\ +(0,229055d^2 - 15,291616d + 306,31972), & \text{якщо } 700 \text{ } ^\circ\text{C} < t < 800 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ (0,00777877d^2 - 0,579724d - 12,228674)t^2/10^6 - \\ -(0,001277648d^2 - 0,0951109d + 2,00622)t/10^2 + \\ +(0,468269d^2 - 340629d + 743,0881)/10^2, & \text{якщо } 800 \text{ } ^\circ\text{C} < t < 840 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ -(0,00014d^2 - 0,0154d + 0,29)t/10^2 + \\ +(0,058d^2 - 7,74d + 159,42)/10, & \text{якщо } 850 \text{ } ^\circ\text{C} < t < 1000 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{cases}$$

2. Нагрівання. Зміна зовнішнього діаметра матриці, мм:

$$\Delta D(t) = \begin{cases} 000135t & \text{якщо } t < 700^\circ\text{C}, \\ -0,001t + 1,65 & \text{якщо } 700^\circ\text{C} < t < 800^\circ\text{C}, \\ 0,0034t - 1,87 & \text{якщо } 800^\circ\text{C} < t < 950^\circ\text{C}. \end{cases}$$

Охолодження. Зміна діаметра внутрішнього калібрувального отвору матриці, мм:

$$\Delta d(t) = \begin{cases} 00003t & \text{якщо } t < 100^\circ\text{C}, \\ -0,00075t + 0,105 & \text{якщо } 100^\circ\text{C} < t < 300^\circ\text{C}, \\ 0,0008t - 0,36 & \text{якщо } 300^\circ\text{C} < t < 850^\circ\text{C}. \end{cases}$$

4. Охолодження. Зміна зовнішнього діаметра матриці, мм:

$$\Delta D(t) = \begin{cases} 00003t & \text{якщо } t < 100^\circ\text{C}, \\ -0,0023t + 0,4 & \text{якщо } 150^\circ\text{C} < t < 300^\circ\text{C}, \\ 0,0021t - 0,92 & \text{якщо } 300^\circ\text{C} < t < 850^\circ\text{C}. \end{cases}$$

Частка поясненої варіації становила 97,3 %.

При розрахунку зміни розмірів пресової матриці під час нагрівання зазвичай враховують коефіцієнти лінійного розширення матеріалу. Це справедливо для сталей, що працюють в однофазній області.

З розробкою та використанням нового класу сталей з РАПЕ необхідно враховувати зміну розмірів інструменту у міжкритичному інтервалі температур, оскільки температура експлуатації цих сталей, як правило, збігається з областю $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення.

З рис. 4 видно, що зміна розмірів матриць зі сталі РАПЕ в міжкритичному інтервалі температур 600–850 °C залежить від фазових перетворень, а також від початкових розмірів інструменту.

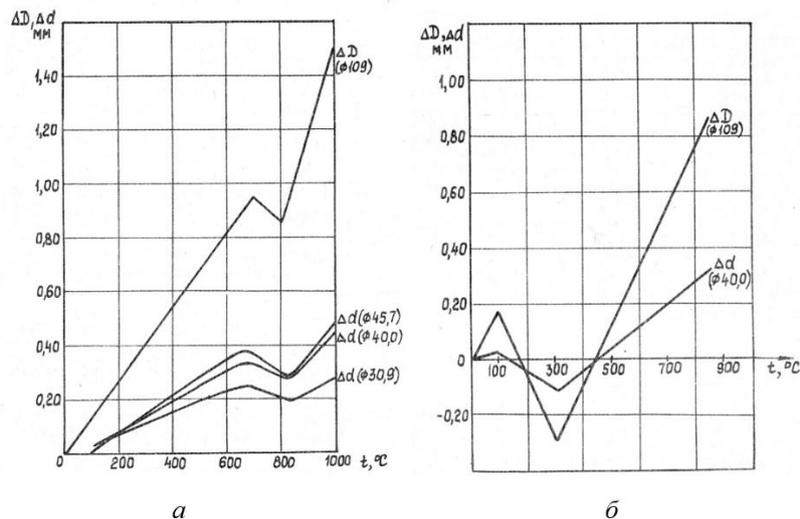


Рис. 4. Зміна розмірів матриці: а – під час нагрівання; б – при охолодженні

За незмінного зовнішнього діаметра діапазон зміни діаметра внутрішнього калібрувального отвору матриці буде тим більшим, чим більшим є його вихідне значення.

ВИСНОВКИ

Розроблено дві технологічні схеми деформаційного зміцнення пресових матриць. Встановлені кількісні залежності між зміною розмірів матриці та температурою нагрівання чи охолодження дозволяють проектувати початкові розміри з урахуванням фазових перетворень, тобто управляти допуском на розмір при різній температурі, підвищуючи тим самим точність і якість виробів, що пресуються. Це особливо важливо враховувати при розробці технологічних режимів зміцнювальної обробки інструменту зі штампових сталей з РАПЕ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Roberts G., Krauss G., Kennedy R. Tool Steels, 5th ed. ASM International, USA, 1998. 364 p.
2. Логинов Ю.Н., Инарович Ю.В. Инструмент для прессования металлов. 2-е изд., исправленное и дополненное. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014, 224 с.
3. Alimi A., Fajoui J., Kchaou M., Branchu S., Elleuch R., Jacquemin F. Multi-scale hot working tool damage (X40CrMoV5-1) analysis in relation to the forging process. *Engineering Failure Analysis*. 2016. V. 62. Pp. 142-155.
4. Позняк Л.А. Инструментальные стали. Киев: Наукова думка, 1996. 488 с.
5. Пат. 157816 Україна. Спосіб виготовлення труб з титанових сплавів. Медведєв М.І., Кругляков О.А., Коноводов Д.В., Губа Р.В. № u202401735; заявл. 08.04.2024; опубл. 27.11.2024, Бюл. №48. 2 с.
6. Озерский А.Д., Кругляков А.А. Штамповые стали с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации. Ленинград: ЛДНТП, 1988. 28с.
7. Кругляков А.А., Никулин С.А. Структура и особенности деформационного упрочнения штамповых сталей с регулируемым аустенитным превращением. *Деформация и разрушение материалов*. 2014. № 11. С. 23-25.
8. Сидорчук О.М. Властивості штампової сталі 4X4H5M4Ф2 для гарячого деформування кольорових металів та сплавів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 1. С. 108-112. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-108-112>
9. Сидорчук О.М., Миронюк Л.А., Гогаєв К.О., Радченко О.К. Штампова кована сталь 4X4H5M4Ф2 підвищеної стійкості. *Металознавство та обробка металів*. 2020. № 26 (96). С. 30-38. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2020.04.030>
10. Krugljakow A.A., Rogachev S.O., Lebedeva N.V. et al. On the nature of hot work hardening phenomenon in die steel with regulated austenitic transformation during exploitation. *Materials Science and Engineering A*. 2022. V. 833. P. 142548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142548>
11. Способ упрочняющей обработки инструмента из штамповых сталей: А.с. 1013500 СССР. С21D 8/00. № 3287255/22-02; заявл. 13.05.81; опубл. 23.04.1983. Бюл. № 15. 4 с.

REFERENCES

1. Roberts G., Krauss G., Kennedy R. Tool Steels, 5th ed. ASM International, USA, 1998. 364 p.
2. Loginov Yu.N., Inatovich Yu.V. Tool for pressing metals. 2nd edition, corrected and supplemented. Ekaterinburg: Publishing house of the Ural. University, 2014, 224 p. (in Russian).

3. Alimi A., Fajoui J., Kchaou M., Branchu S., Elleuch R., Jacquemin F. Multi-scale hot working tool damage (X40CrMoV5-1) analysis in relation to the forging process. *Engineering Failure Analysis*. 2016. V. 62. pp. 142-155.
4. Pozniak L.A. *Унструментальні сталі*. Київ: Наукова думка, 1996. 488 p.
5. Pat. 157816 Ukraine. Method for manufacturing pipes from titanium alloys. Medvediev M.I., Kruhliakov O.A., Konovodov D.V., Huba R.V. November 27, 2024 (in Ukrainian).
6. Ozersky A.D., Kruglyakov A.A. Stamp steels with controlled austenitic transformation during operation. Leningrad: LDNTP, 1988. 28 p. (in Russian).
7. Krugljakow A.A., Nikulin C.A. Structure and features of deformation hardening of die steels with controlled austenite formation. *Deformation and destruction of materials*. (in Russian). 2014. 11. pp. 23-25.
8. Sydorhuk O.M. Properties of stamped steel 4Kh4N5M4F2 for hot deformation of non-ferrous metals and alloys. 2021. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2021. 1. 108-112. (in Ukrainian).
9. Sydorhuk O. M., Myroniuk L. A., Hohaiev K. O., Radchenko O. K. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2020. Vol.26. (96), pp. 30-38 (in Ukrainian).
10. Krugljakow A.A., Rogachev S.O., Lebedeva N.V. et al. On the nature of hot work hardening phenomenon in die steel with regulated austenitic transformation during exploitation. *Materials Science and Engineering A*. 2022. V. 833. P. 142548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142548>
11. Method of hardening treatment of tools made of die steels: A.s. 1013500 USSR. C21D 8/00. No. 3287255/22-02; declared 13.05.81; published 23.04.1983. Bulletin No. 15. 4 p. (in Russian).

Krugljakow O., Medvediev M. Konovodov D., Huba R. Schemes of deformation strengthening for dies from steel with regulated austenitic transformation during exploitation.

The most heat-resistant conventional ferrite-pearlite-based stamping steels with carbide and mixed hardening reduce their strength when heated above 650-700°C, which leads to rapid tool failure. Using heat-resistant austenitic steels and alloys does not solve the problem. In fact, at high temperatures, these are sometimes stronger than ferrite-class steels. This can sometimes make tools last longer. However, these steels can crack easily, are difficult to machine, and are expensive and in short supply. Stamp steels with controlled austenitic transformation during exploitation are a new and only class of tool steels characterized by the phenomenon of retention of hot strain hardening (hot hardening). The degree of hot work hardening in steel obtained after austenitizing at 1150 °C followed by cyclic deformation at 450 °C increases with further cyclic deformation at 700-850 °C. Austenitizing at 1150 °C, holding and pre-deformation at 450 °C, followed by cooling to room temperature and rapid heating to a deformation temperature of 750 °C stabilizes the hot metal state and contributes to maximum steel hardening at 700-850 °C Taking into account of the stabilisation of the hot hardening, two technological schemes of deformation strengthening of extrusion dies have been proposed in this paper, which ensure their high operational stability. Quantitative dependencies have been established between the change in die dimensions and the heating or cooling temperature. The dependencies obtained in this work enable the design of the initial dimensions of the extrusion tool, taking into account the peculiarities of phase transformations in steels with controlled austenitic transformation during exploitation.

Keywords: tool steel, die steel, hot hardening, die, hot extrusion, technological scheme, deformation strengthening, geometric dimensions, phase transformations.

Кругляков Олександр Аркадійович – канд. техн. наук, науково-виробниче об'єднання WBH
Krugljakow Olekhandr – Candidate of Technical Sciences, Scientific Production Association WBH
 E-mail: dr.a.krugljakow@t-online.de
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8130-4134>

Медведєв Михайло Іванович – д-р техн. наук, старш. наук. співроб., УДУНТ
Medvediev Mykhailo – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, USUST
 E-mail: m.i.medvedev@ust.edu.ua
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1230-420X>

Коноводов Дмитро Володимирович – канд. техн. наук, доцент, УДУНТ
Konovodov Dmytro – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, USUST
 E-mail: d.v.konovodov@ust.edu.ua
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8282-4991>

Губа Роман Володимирович – аспірант, УДУНТ
Huba Roman – Graduate student, USUST
 E-mail: dn190675grv@gmail.com

УДУНТ – Український державний університет науки і технологій, Дніпро
 USUST – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro