

Лютый Р. В.
Федоров М. М.
Дьяченко Ю. Г.
Кочешков А. С.

ШТАМПОВКА РІДКОГО МЕТАЛУ ЯК СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ТОЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

Сучасними технологічними процесами виготовлення металевих деталей різного призначення є пластична деформація заготовок в гарячому або холодному стані, лиття металів та сплавів, порошкова металургія тощо. Зазначені методи мають власні переваги, недоліки, а також обмеження за родом сплаву та технологічними умовами виробництва. Пластична деформація металів дозволяє змінювати форму та розміри деталей без руйнування, покращувати механічні властивості (стійкість, міцність), зменшувати шорсткість поверхні та збільшувати довговічність виробів, що робить цей технологічний процес незамінним у машинобудуванні та металообробці. Проте, суттєвим недоліком обробки металів тиском є низькі показники виходу придатного, що зумовлено необхідністю призначення підвищених припусків на механічну обробку й відповідно подальшого видалення великої кількості металу на металорізальних верстатах. Так, наприклад, коефіцієнт використання кольорового металу в штамповому виробництві становить 30 % і навіть менше. Штампування деталей з рідкого металу, будучи прогресивним технологічним процесом їх виготовлення, у ряді випадків успішно вирішує проблему підвищення якості виробів, дозволяє позбутися низки недоліків, які притаманні іншим методам виготовлення деталей складної конфігурації. У порівнянні з литтям під тиском перевагою штампування з рідкого металу є те, що зазначений метод дозволяє отримувати деталі складного профілю майже без пір та раковин. Цей прогресивний технологічний процес поєднує в собі переваги як ливарного виробництва (використання рідкого металу та заповнення ним необхідної форми), так і штампувального (застосування високого тиску та спеціального штампового обладнання). Штампування з рідкого металу дозволяє отримувати цільні металеві вироби складної конфігурації зі зменшеними припусками на механічну обробку, з виходом придатного металу до 95%, з високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. Точність заготовок відповідає 11-12 квалітетам, а шорсткість поверхні Ra становить 2,5...5 мкм. У деяких випадках отримані штампуванням з рідкого металу деталі використовують у машинах та пристроях без подальшої обробки. Зазначена технологія потенційно може поєднувати в собі переваги ливарного та штампового виробництв, уникаючи деяких недоліків. Виконана робота характеризується теоретичною спрямованістю. Основною метою є дослідження умов кристалізації металів та сплавів під дією високих та надвисоких зусиль тиску та особливостей формування зернової структури і механічних властивостей. Одержані результати: встановлення особливостей структуроутворення штамповано-литих деталей, а також визначення впливу тиску на параметри кристалізації металів і сплавів; визначення оптимальних розмірних та масових груп деталей для їх виготовлення методом штампування рідкого металу, а також встановлення найбільш придатних ливарних сплавів для промислового виробництва штамповано-литих деталей.

Ключові слова: штамповка рідкого металу, ливарні сплави, точні металеві вироби, структуроутворення штамповано-литих деталей, параметри кристалізації металів і сплавів, кінетика кристалізації, оптимальний тиск пресування, алюмінієво-кремнієвий сплав, коефіцієнт використання металу.

Серед методів виготовлення металевих деталей найбільш поширеними є гаряча та холодна пластична деформація, ливарне виробництво та порошкова металургія. Кожен метод має свої переваги, недоліки, а також обмеження за родом сплаву, тобто галузі їх використання перетинаються лише частково.

Штампове виробництво забезпечує найкращі показники виробів за міцністю, пластичністю, ударною в'язкістю, а також за якістю поверхонь. Однак цей метод характеризується низьким виходом придатного (часто не більше 30 %), тобто коефіцієнт використання металу є найменшим.

Ливарне виробництво є більш універсальним, тому що існує багато різних спеціальних та особливих способів лиття, які забезпечують широку номенклатуру різноманітних металевих виробів [1]. Однак досягти такого високого рівня властивостей, як у поковок, у ливарних технологіях не вдається. Це зумовлено тим, що процеси лиття передбачають фазовий перехід у процесі формоутворення виробу, тобто кристалізацію. Під час цього відбувається побудова

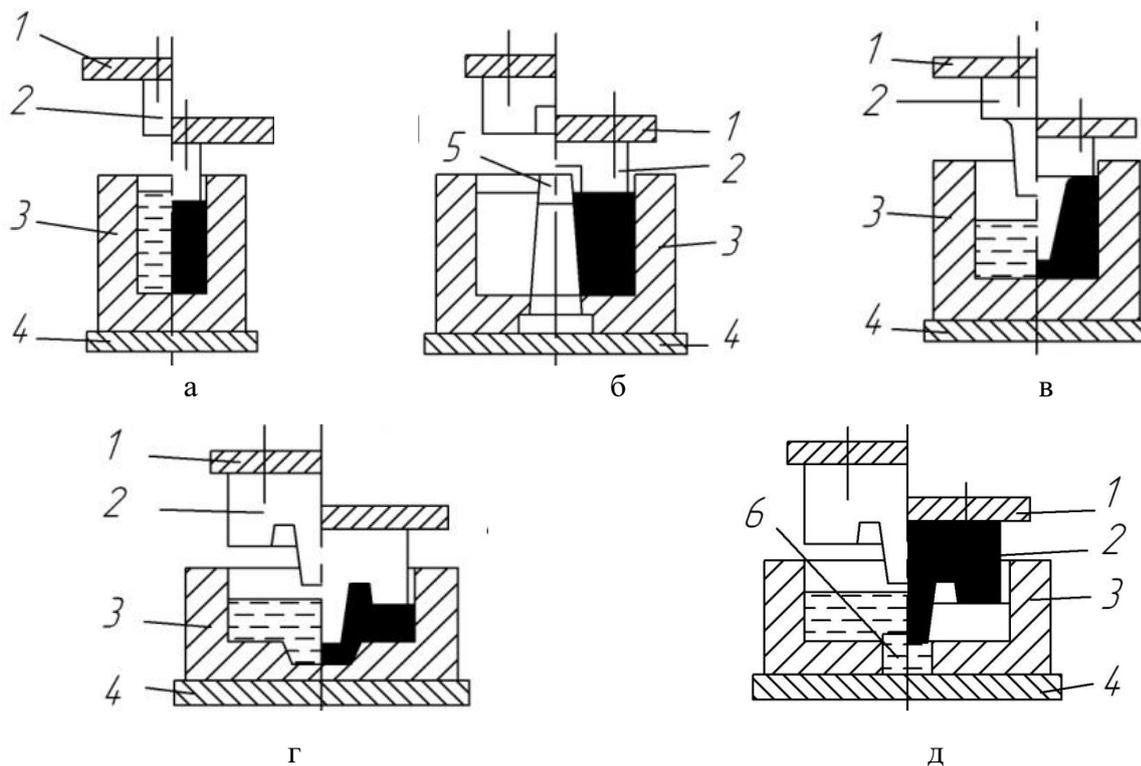
зернової (кристалічної) структури із розплаву [2]. Як відомо, механічні властивості металу на пряму залежать від його структури [3]. Литі вироби, як правило, мають крупніші зерна, ніж деталі, виготовлені іншими способами. Форма зерен часто є також неправильною (дендритною), що і знижує механічні властивості металу у виливках.

З метою керування кристалічною структурою виливків застосовують технології модифікування [2, 4], суспензійного лиття [5], прискореного охолодження виливків у ливарній формі [6] тощо. У готових литих деталях зернову структуру можна виправити термічним обробленням. Однак після цього механічні властивості залишаються на 20...30 % нижчими, ніж у деталей, виготовлених штамповим виробництвом.

Метод порошкової металургії дає змогу отримати дрібнозернисту структуру, навіть на рівні наночасток, і відповідно високі механічні властивості [7]. Однак номенклатура деталей обмежена як розмірами і конфігурацією, так і сплавами.

Поєднання ливарних і штампових технологій знайшло відображення у створенні ще у 1942 р. способу виготовлення деталей [8], який на сьогодні не має поширення через недостатню вивченість на теоретичному рівні, а також складність і дефіцитність устаткування.

Він полягає в тому, що рідкий метал заливають у нероз'ємну або роз'ємну металеву форму (матрицю), досить міцну, щоб витримати тиск у кілька тисяч атмосфер, який передається на вилівок поршнем або пуансоном. У матрицю занурюють пуансон, який під високим тиском розподіляє метал у порожнині. Метал заповнює зазор між матрицею і пуансоном, тиск зберігається під час твердіння вилівка (рис. 1).



1 – верхня плита; 2 – пуансон; 3 – матриця; 4 – нижня плита; 5 – стрижень
б – підпружинене дно

Рис. 1. Схема процесу рідкої штамповки: а, б – під поршневим тиском; в – під пуансонним тиском; д, е – під пуансонно-поршневим тиском (ліва частина рисунків – положення матриці та пуансона до штамповки, права частина рисунків – після штамповки, чорним кольором – контур литої деталі)

Процес рідкої штамповки зазвичай здійснюють на гідравлічних пресах із зусиллям до 500 тон.

Цей спосіб потенційно може поєднувати в собі переваги ливарного та штампового виробництв, уникаючи деяких недоліків.

Отже метою даної теоретичної роботи є дослідження умов кристалізації металів та сплавів під дією високого та надвисокого тиску та формування їх зернової структури і механічних властивостей.

Завдання роботи: 1) встановити особливості структуроутворення штамповано-литих деталей; 2) дослідити вплив тиску на параметри кристалізації металів і сплавів; 3) визначити найбільш придатні ливарні сплави для виготовлення штамповано-литих деталей; 4) визначити розмірну та масову групу деталей для їх виготовлення рідкою штамповкою.

Структура і властивості металів і сплавів головним чином визначаються швидкістю охолодження. Найбільш впливовими параметрами процесу кристалізації під тиском є: значення тиску, спосіб його створення і тривалість дії.

В умовах кристалізації під високим тиском різні метали і сплави ведуть себе по-різному. Відомо, що зміна зовнішнього тиску впливає на температуру кристалізації металу, що описується рівнянням Клапейрона [2]:

$$\Delta T = T_{\text{пл}} \frac{V_{\text{р}}^{t_{\text{пл}}} - V_{\text{т}}^{t_{\text{пл}}}}{L} (P_1 - P_0), \quad (1)$$

де $T_{\text{пл}}$ – температура плавлення металу, К;

$V_{\text{р}}^{t_{\text{пл}}}$ і $V_{\text{т}}^{t_{\text{пл}}}$ – питомий об'єм рідкого та твердого металу за температури плавлення, м³/кг;

L – теплота плавлення металу, Дж/кг;

P_1 – тиск під час плавлення або під час кристалізації, Па;

P_0 – атмосферний тиск; $P_0 = 102\,000$ Па.

Як видно із формули (1), різниця між питомими об'ємами металу в рідкому і твердому станах визначає те, в який бік змінюється температура плавлення. Розглянемо це на прикладі заліза, яке під час кристалізації зменшує питомий об'єм (тобто має усадку), та кремнію, який під час кристалізації цей об'єм збільшує.

Дані для розрахунку за формулою (1) для заліза вибираємо із довідкової та навчальної літератури [2, 9]:

– $T_{\text{пл}} = 1539 + 273 = 1812$ К;

– $L = 247\,000$ Дж/кг;

– питомий об'єм, як відомо, величина зворотна густині, тому в рідкому стані за температури плавлення:

$$V_{\text{р}}^{t_{\text{пл}}} = \frac{1}{\rho_{\text{р}}^{t_{\text{пл}}}} = \frac{1}{7000} = 143 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{кг};$$

– питомий об'єм заліза у твердому стані за нормальної температури:

$$V_{\text{т}}^{20} = \frac{1}{\rho_{\text{т}}^{20}} = \frac{1}{7870} = 127 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{кг},$$

але для розрахунку за формулою (1) потрібно використати значення об'єму за температури плавлення, який додатково розраховується за формулою [2]:

$$V_{\text{т}}^t = V_{\text{т}}^{t_0} [1 + \varepsilon_{\text{т}}^0 (t - t_0)], \quad (2)$$

де $\varepsilon_{\text{т}}^0$ – коефіцієнт об'ємного термічного розширення твердого металу.

В такому разі:

$$V_T^{t_{пл}} = 127 \cdot 10^{-6} \cdot [1 + 36 \cdot 10^{-6} \cdot (1539 - 20)] = 134 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Прийнявши максимально можливе в умовах рідкої штамповки значення тиску 5000 МПа та врахувавши, що атмосферний тиск 0,1 МПа, за формулою (1) зміна температури кристалізації заліза становить:

$$\Delta T = 1812 \frac{(143 - 134) \cdot 10^{-6}}{247000} (5000 \cdot 10^6 - 0,1 \cdot 10^6) = 330 \text{ К}.$$

Отже, за умови накладення зовнішнього тиску 5000 МПа під час твердіння розплаву заліза його температура плавлення зростає на вказану величину і становить:

$$t = 1539 + 330 = 1869 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Аналогічний розрахунок проведено для кремнію:

$$- T_{пл} = 1430 + 273 = 1703 \text{ К};$$

$$- L = 1\,800\,000 \text{ Дж/кг};$$

- питомий об'єм в рідкому стані за температури плавлення:

$$V_P^{t_{пл}} = \frac{1}{\rho_P^{t_{пл}}} = \frac{1}{2530} = 395 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{кг};$$

- питомий об'єм у твердому стані за нормальної температури:

$$V_T^{20} = \frac{1}{\rho_T^{20}} = \frac{1}{2350} = 425 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{кг};$$

- питомий об'єм у твердому стані за температури плавлення за формулою (2):

$$V_T^{t_{пл}} = 425 \cdot 10^{-6} \cdot [1 + 23 \cdot 10^{-6} \cdot (1430 - 20)] = 438 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Прийнявши максимально можливе в умовах рідкої штамповки значення тиску 5000 МПа та врахувавши, що атмосферний тиск 0,1 МПа, за формулою (1) зміна температури кристалізації кремнію становить:

$$\Delta T = 1430 \frac{(395 - 438) \cdot 10^{-6}}{1800000} (5000 \cdot 10^6 - 0,1 \cdot 10^6) = -203 \text{ К}.$$

Порівнюючи результати цих двох розрахунків, слід звернути особливу увагу на те, що для кремнію результат є від'ємним, тобто температура плавлення його знижується і становить:

$$t = 1430 - 203 = 1227 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Аналогічні розрахунки проведено для низки металів, які широко використовуються в промисловості, а також для деяких ливарних сплавів. Залежність температури плавлення від тиску очевидно є лінійною, враховуючи те, що значення P_0 із формули (1) є гранично малим та ним можна знехтувати.

Графіки залежності температури плавлення металів від зовнішнього тиску наведено на рис. 2 (а, б), сплавів – на рис. 2 (в).

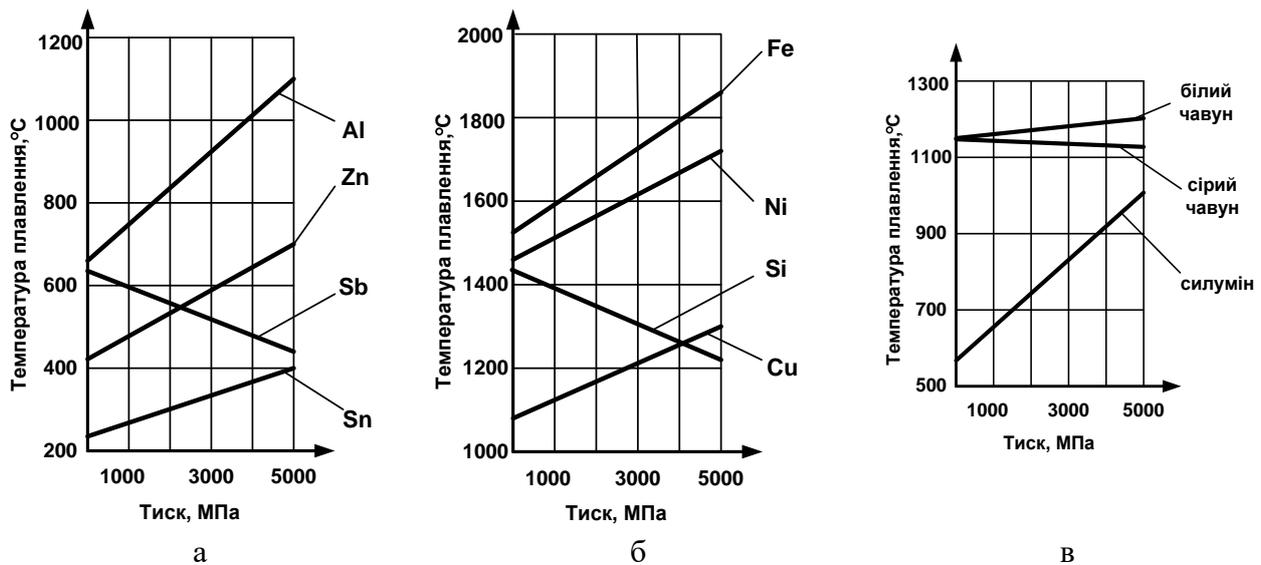


Рис. 2. Зміна температури плавлення деяких металів і сплавів за високого тиску

Отже, для всіх металів, які плавляться зі збільшенням питомого об'єму, із збільшенням тиску температура плавлення збільшується. І навпаки для групи «аномальних» хімічних елементів, до яких, крім кремнію, відносяться сурма, вісмут, германій та галій, підвищення тиску призводить до зменшення температури плавлення (як, до речі, і для води).

Евтектичні сплави також ведуть себе по-різному. Для алюмінієво-кремнієвих сплавів та чавуну, який кристалізується за метастабільною системою (з вільним цементитом) підвищення тиску сприяє збільшенню температури плавлення. Для чавуну, який кристалізується за стабільною системою (з вільним графітом) – навпаки (рис. 2, в).

Розглянемо більш детально трансформації діаграми стану алюмінієво-кремнієвих сплавів (силумінів) за умов накладення різного зовнішнього тиску. Наприклад, за тиску 1000 МПа температура евтектичного перетворення зростає на 94 К, за тиску 3000 МПа – на 227 К, а за тиску 5000 МПа – на 450 К (рис. 3).

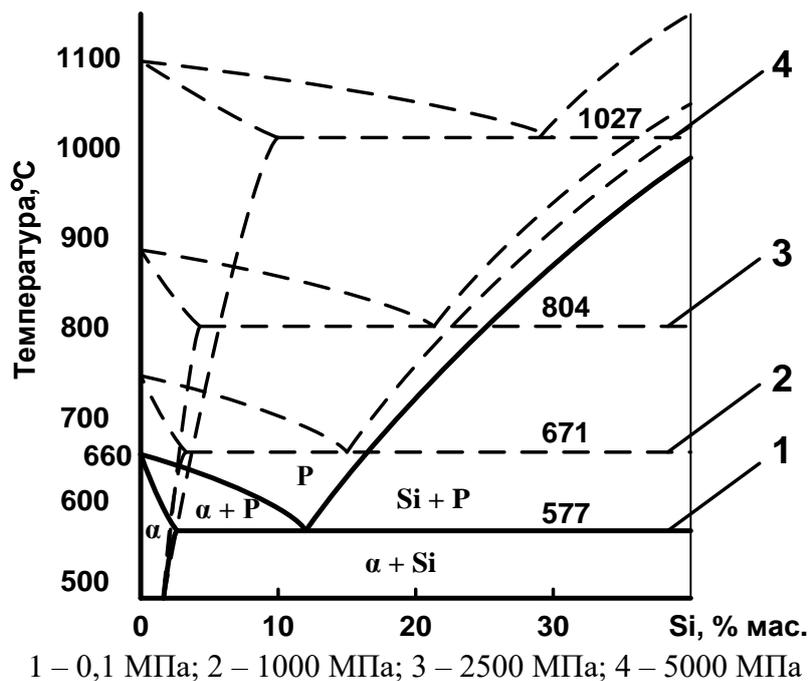


Рис. 3. Вплив тиску на зміну діаграми стану системи Al-Si (α – α -твердий розчин Si в Al, P – рідка фаза)

Змінюється також і положення точок на подвійній діаграмі стану: зона розчинності кремнію збільшується до 10 %, а евтектична точка з 11,7 % мас. Si зміщується до 30 % мас. S., тобто по суті евтектичний за нормальних умов сплав стає глибоко доевтектичним. Отже за високого тиску можна отримувати сплави зі структурою і властивостями, відмінними від аналогічних сплавів за звичайних умов. У табл. 1 показано зміну механічних властивостей доевтектичного силуміну (9 % мас. Si) залежно від тиску пресування.

Таблиця 1

Механічні властивості сплаву АК9ч залежно від тиску під час затвердіння

Властивості	Тиск під час затвердіння сплаву, МПа					
	0,1	60	80	100	120	160
Міцність на розрив, МПа	135	167	172	180	195	207
Відносне видовження, %	4,2	8,7	12,4	13,9	14,0	15,0
Гідроцилінність, МПа	5	6	7,5	8,5	9,5	12,5

Кінетика кристалізації, як відомо [2], оцінюється кількістю центрів кристалізації, які утворюються в процесі охолодження, і лінійною швидкістю їх зростання. Чим більше утворено центрів кристалізації і менша швидкість їх зростання, тим менше зерно. Отже найважливішим є ступінь переохолодження. Під час кристалізації під тиском весь об'єм розплаву переходить у переохолоджений стан, а тому завжди буде формуватися дрібнозерниста структура. Під час рідкої штамповки чим ближчою є температура розплаву до точки кристалізації за атмосферного тиску, тим менший тиск на нього треба створити для забезпечення об'ємної кристалізації та утворення дрібнозернистої структури.

Оптимальні значення тиску пресування для різних сплавів наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Оптимальний тиск пресування

Різнovid пресування (за рис. 1)	Тиск P , МПа, за міцності сплаву, МПа		
	менше 250	251...300	301...600
Поршневе	1500	2000	2500
Пуансонне	1000	1500	2000
Пуансонно-поршневе	1500	2000	2500

Значний вплив тиску на температуру плавлення, як показано на рис. 2 та рис. 3, відкрив теоретичну можливість для отримання виливків не з кристалічною, а з аморфною структурою. Іншим способом отримання такого вилівка є забезпечення швидкості охолодження понад 100 000 К/с, що в цілому об'ємі вилівка є технічно неможливим.

Метал заливають у форму (матрицю) із певною температурою, за якої він знаходиться у стабільно рідкому стані та має перегрівання над температурою плавлення. Після змикання частин форми (матриці й пуансона) на метал діє великий тиск, за якого температура його плавлення зростає на десятки або сотні градусів. Тому за цієї ж самої температури стабільним станом цього металу є твердий. Метал миттєво переходить із рідкого у твердий стан із збереженням структури розплаву (тобто аморфної).

Переваги аморфного металу зумовлені відсутністю окремих зерен і міжзеренних границь:

- значно більша міцність (у 5...10 разів);
- значно більша твердість;
- абсолютна корозійна стійкість (процеси корозії відбуваються по межах зерен, які тут відсутні).

Однак до сьогодні отримати фасонний виливок із повністю аморфною структурою так і не вдалося, хоча дрібні заготовки простої форми товщиною порядку 1 мм було отримано [10].

В реальності всі виливки мають кристалічну структуру, однак вона має свої особливості. При накладанні високого тиску за рахунок пластичних деформацій у процесі кристалізації виливка відбувається заліковування усадкових пор і стиснення газоповітряних пор, розчинені гази не виділяються з металу під час кристалізації у вигляді пор, тому формується деталь підвищеної густини.

Висока швидкість кристалізації металу в металевій формі завдяки відсутності зазору між виливком і формою, а також високий тиск сприяють подрібненню структури (розміри зерен зменшуються у 2,0...2,5 разів). Рух металу під дією пуансона або поршня забезпечує внутрішнє переміщення шарів металу, руйнування дендритів, додаткове зменшення розмірів зерна.

Це істотно покращує механічні властивості штамповано-литих деталей порівняно із звичайними: міцність збільшується в 1,2...1,5 рази, відносне видовження – у 2...4 рази, ударна в'язкість – у 2,0...2,5 рази. Таким чином, деталі, отримані кристалізацією під високим тиском, мають механічні властивості на рівні з поковками.

З огляду на проведені дослідження умов кристалізації штампово-литих деталей та впливу зовнішнього тиску, спосіб може бути рекомендовано для виготовлення зливок, фасонних виробів із цинкових, алюмінієвих, магнієвих, мідних сплавів, чавуну і сталі. Це означає, що практично всі ливарні матеріали є придатними для рідкої штамповки, оскільки, як встановлено на рис. 2, тверднуть із зменшенням питомого об'єму (тобто з усадкою).

Співвідношенням висоти H до діаметра D деталі має бути не більше 1 : 1. Збільшення висоти H призводить до значного ускладнення вилучення деталі з форми і підвищеного зносу пуансона.

Через дію високого тиску під час кристалізації, можливість виготовлення тонкостінних деталей відсутня. Мінімальна товщина стінок становить 6...8 мм. Але можливість виконувати в деталях литі отвори існує, якщо товщина стінок менше 20 мм.

Також існує можливість виготовлення деталей з наскрізними отворами, але без внутрішніх порожнин, оскільки для їх формування потрібні додаткові елементи (стрижні [11]), застосування яких в даних умовах неможливе.

ВИСНОВКИ

1. В результаті розрахунків встановлено, що накладення високого та надвисокого тиску під час кристалізації металів і сплавів значною мірою впливає на їх температура плавлення. Зокрема, за тиску 5000 МПа температура плавлення заліза зростає з 1539 до 1869 °С, а температура плавлення кремнію знижується з 1430 до 1227 °С. Наведений ефект зумовлено особливостями кристалізації (із зменшенням або із збільшенням об'єму) і дає змогу керувати формуванням структури та властивостями.

2. Розглянуто трансформацію подвійної діаграми стану Al – Si в межах тисків від 0,1 МПа до 5000 МПа і показано, що зона α -твердого розчину значною мірою розширюється, а евтектика практично у три рази збагачується кремнієм. Отже, за високого тиску можна отримувати сплави зі структурою і властивостями, відмінними від аналогічних сплавів за звичайних умов. Показано покращення властивостей (міцність в 1,7 рази, пластичність в 4 рази, гідроцильність у 2,5 рази) деталей із алюмінієво-кремнієвого сплаву, виготовлених з кристалізацією під високим тиском.

3. Показано, що за рахунок збільшення температури плавлення металів і сплавів під час їх виготовлення рідкою штамповкою вони переходять у квазістабільний стан, тобто можуть твердіти без утворення кристалічної, а з утворенням натомість аморфної структури. Це відкриває можливості для дослідження процесів виготовлення аморфізованих деталей із металевих сплавів.

4. За рахунок високого тиску та щільного прилягання деталі до форми без утворення зазорів, характерних для всіх ливарних технологій, забезпечується подрібнення зернової структури, відсутність усадкових та газових дефектів, висока точність заготовок та якість поверхонь. В результаті механічні властивості штампово-литих деталей знаходяться на рівні з ковками, але вихід придатного підвищується до 90...97 %.

5. Для виготовлення деталей методом рідкої штамповки, враховуючи особливості кристалізації, придатні практично всі сплави, які застосовуються у ливарних технологіях та технологічних процесах пластичної деформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кочешков А.С., Лютий Р.В. Спеціальні способи лиття та їх місце серед ливарних технологій. *Матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні»*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2024. С. 238–241.
2. Лютий Р.В., Ямшинський М.М., Кочешков А.С. Теоретичні основи ливарних процесів: Підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2024. 330 с.
3. Федоров Г.Є., Ямшинський М.М., Фесенко А.М., Фесенко М.А. Контроль якості продукції в машинобудуванні: Навчальний посібник. Краматорськ: ДДМА. 2008. 322 с.
4. Богуслаєв В.О., Реп'ях С.І., Могилаєнко В.Г. Ливарні властивості металів і сплавів для прецизійного лиття: Підручник. Запоріжжя: Вид-во АТ «Мотор Січ». 2016. 474 с.
5. Верховлюк А.М. Взаємодія рідких та твердих фаз в металургійних процесах. Київ: Наукова думка. 2014. 168 с.
6. Kaliuzhnyi P. [Influence of Sand Fluidization on Structure and Properties of Aluminum Lost Foam Casting](#). *Archives of Foundry Engineering*. 2020. 6. P. 122–126.
7. Завадюк С.В., Лобода П.І., Соловійова Т.О., Троснікова І.Ю., Карасєвська О.П. Оптимізація параметрів спікання матеріалу, виготовленого за технологією інжекційного лиття порошку. *Порошкова металургія*. 2020. 01/02. С. 32–41.
8. Гнатюш В. А. Метали: подорож у часі. Київ. 2019. 161 с.
9. Valencia J. J., Quedstedt P.N. Thermophysical Properties. *ASM Handbook*. 2008. Volume 15: Casting, p.p. 468 – 481. <https://DOI:10.1361/asmhba0005240>
10. Агравал П.Г., Турчанін М.А. Результати прогнозування концентраційних областей утворення аморфних сплавів загартуванням з розплавів подвійних систем (Fe, Co, Ni, Cu)–(Ti, Zr, Hf). *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2019. №1. С. 202–207.
11. Лютий Р.В., Гурія І.М. Формувальні матеріали: Підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2020. 257 с.

REFERENCES

1. Kocheshkov A.S., Liutyi R.V. Special methods of casting and their place among liqueur technologies. *Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference "New materials and technologies in mechanical engineering"*. Kyiv: KPI im. Igor Sikorsky. 2024. pp. 238–241. (in Ukrainian).
2. Liutyi R.V., Yamshinsky M.M., Kocheshkov A.S. Theoretical foundations of liqueur processes: Teaching manual. Kyiv: KPI im. Igor Sikorsky. 2024. 330 p. (in Ukrainian).
3. Fedorov G.E., Yamshinsky M.M., Fesenko A.M., Fesenko M.A. Control of product quality in machinery: Teaching manual. Kramatorsk: DSEA. 2008. 322 p. (in Ukrainian).
4. Boguslaev V.O., Rep'yakh S.I., Mogilatenko V.G. Livar power of metals and alloys for precision casting: Teaching manual. Zaporizhzhya: Branch of AT "Motor Sich". 2016. 474 p. (in Ukrainian).
5. Verkhovlyuk A.M. Interactions of rare and solid phases in metallurgical processes. Kiev: Naukova Dumka. 2014. 168 p. (in Ukrainian).
6. Kaliuzhnyi P. [Influence of Sand Fluidization on Structure and Properties of Aluminum Lost Foam Casting](#). *Archives of Foundry Engineering*. 2020. 6. P. 122–126.
7. Zavadyuk S.V., Loboda P.I., Solovyova T.O., Trosnikova I.Yu., Karasevska O.P. Optimization of parameters for sintering material prepared using injection molding technology. *Powder metallurgy*. 2020. 01/02. pp. 32–41. (in Ukrainian).
8. Gnatush V. A. Metals: more expensive at the hour. Kyiv. 2019. 161 p. (in Ukrainian).
9. Valencia J. J., Quedstedt P.N. Thermophysical Properties. *ASM Handbook*. 2008. Volume 15: Casting, p.p. 468 – 481. <https://DOI:10.1361/asmhba0005240>
10. Agrawal P.G., Turchanin M.A. Results of forecasting the concentration areas of the hardening of amorphous alloys from melts of subsurface systems (Fe, Co, Ni, Cu)–(Ti, Zr, Hf). *Herald of the Donbass State Engineering Academy*. 2019. No. 1. pp. 202–207. (in Ukrainian).
11. Liutyi R.V., Guriya I.M. Formal materials: Teaching manual. Kiev: KPI im. Igor Sikorsky. 2020. 257 p. (in Ukrainian).

Liutyi R., Feorov M., Dyachenko Yu., Kocheshkov A. Stamping of rare metal as a method for producing precision parts

Modern technological processes for manufacturing metal parts include plastic deformation of workpieces in a hot or cold state, casting of metals and alloys, powder metallurgy, etc. These methods have their own advantages, disadvantages, and limitations depending on the type of alloy and technological conditions of production. Plastic deformation of metals allows you to change the shape and dimensions of parts without destruction, improve mechanical properties (stability, strength), reduce surface roughness and increase the durability of products, which makes this technological process indispensable in mechanical engineering and metalworking. However, a significant disadvantage of metal processing by pressure is low yield, which is due to the need to assign increased allowances for mechanical processing and, accordingly, the subsequent removal of a large amount of metal on metal-cutting machines. For example, the utilization rate of non-ferrous metal in stamping production is 30% or even less. Stamping of parts from liquid metal, being a progressive technological process of their manufacture, in some cases successfully solves the problem of improving the quality of products, allows to get rid of a number of shortcomings inherent in other methods of manufacturing parts of complex configuration. Compared to injection molding, the advantage of stamping from liquid metal is that this method allows to obtain parts of complex profile almost without pores and sinks. This progressive technological process combines the advantages of both foundry production (use of liquid metal and filling it with the required form) and stamping (use of high pressure and special stamping equipment). Stamping from liquid metal allows to obtain dense metal products of complex configuration with reduced allowances for mechanical processing, with a yield of suitable metal up to 95%, with high physical and mechanical and operational properties. The accuracy of the blanks corresponds to 11-12 qualities, and the surface roughness R_a is 2.5...5 microns. In some cases, parts obtained by stamping from liquid metal are used in machines and devices without further processing. This technology can potentially combine the advantages of casting and stamping production, avoiding some disadvantages. The work performed is characterized by a theoretical orientation. The main goal is to study the conditions of crystallization of metals and alloys under the action of high and ultra-high pressure forces and the features of the formation of grain structure and mechanical properties. The results obtained: establishing the features of the structure formation of stamped-cast parts, as well as determining the influence of pressure on the parameters of crystallization of metals and alloys; determining the optimal size and mass groups of parts for their manufacture by the method of stamping liquid metal, as well as establishing the most suitable casting alloys for the industrial production of stamped-cast parts.

Keywords: liquid metal stamping, casting alloys, precision metal products, structure formation of stamped-cast parts, crystallization parameters of metals and alloys, crystallization kinetics, optimal pressing pressure, aluminum-silicon alloy, metal utilization factor.

Лютій Ростислав Володимирович – д-р техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»

Liutyi Rostislav – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor NTUU «KPI»

E-mail: rv12005@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6655-6499>

Федоров Микола Миколайович – канд. техн. наук, доц. ДДМА

Fedorov Mykola – Candidate of Technical Science, Associate Professor DSEA

E-mail: nikolay.fedorov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2149-5861>

Дьяченко Юрій Григорович – канд. техн. наук, доц. ДДМА

Dyachenko Yuri – Candidate of Technical Science, Associate Professor DSEA

E-mail: dyachenko.yurij.1978@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0711-8354>

Кочешков Анатолій Сергійович – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»

Kocheshkov Anatoly – Candidate of Technical Science, Associate Professor NTUU «KPI»

E-mail: asko@iff.kpi.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6923-1403>

НТУУ «КПІ» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ.

NTUU «KPI» – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv.

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ – Тернопіль.

DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk – Ternopol.

Стаття надійшла до редакції 12.09.25 р.