

Попередній рівень.

Цей винахід стосується, взагалі, деталей, виготовлених з матеріалу суперсплаву, і стосується, зокрема, деталей, виготовлених з суперсплавів на основі нікелю, та способів термообробки таких сплавів. Такі сплави звичайно мають високі температури плавлення, більш ніж 1260-1371°C (2300-2500°F). Суперсплави на основі нікелю застосовують у випадках, де необхідними є високі співвідношення міцності та ваги, висока стійкість до корозії та у випадках, коли їх застосовують при відносно високих температурах, наприклад, до або більш ніж приблизно 1093°C (2000°F).

У газотурбінних двигунах, наприклад, такі суперсплави звичайно застосовують у турбінній секції та іноді на останніх ступенях компресорної секції двигуна, до яких належать, але не обмежуються тільки ними, профілі, такі як лопатки та лопатки напрямівного апарата, а також нерухомі деталі та конструктивні елементи, такі як проміжні та компресорні корпуси, компресорні диски, турбінні корпуси та диски турбіни. Звичайним суперсплавом на основі нікелю, який застосовують у газотурбінних двигунах, є Inconel 718 (IN 718), який взагалі має склад, у вагових відсотках: приблизно 0,01-0,05 вуглецю (C), 13-25 хрому (Cr), 2,5-3,5 молібдену (Mo), 5,0-5,75 (колумбію (Cb) [також називають ніобієм (Nb)]+тантал (TA)), 0,7-1,2 титану (Ti), 0,3-0,9 алюмінію (Al), до приблизно 21 заліза (Fe), решта - практично Ni.

При виробництві газотурбінних двигунів застосовують кування для виготовлення деталей, що мають складні тривимірні форми, таких як лопатки та лопатки напрямівного апарата. Суперсплави на основі нікелю традиційно обробляли шляхом точного кування для того, щоб виробити деталі, що мають малий середній розмір зерен та збалансовані високу міцність, низьку вагу та належний опір багатоцикловій утомленості. Якщо ці деталі вироблено належним чином, вони демонструють збалансоване співвідношення високої міцності, тривалої міцності та низької ваги.

Стисло кажучи, для того, щоб прокувати деталь, таку як лопатка або лопатка напрямівного апарата, перше отримують зливку матеріалу, що має склад, що відповідає бажаному складові вже виготовленої деталі. Зливку перетворюють у заготовку належної форми, звичайно циліндричну для лопаток та лопаток напрямівного апарата, а потім він зазнає термомеханічної обробки, такої як нагрівання та штампування декілька разів з використанням штампів та/або молотів, які потім можна нагрівати і форму яких можна змінювати, поступово наближаючи її до бажаної форми для того, щоб матеріал пластично деформувався і плавно прийняв бажану форму деталі. Кожна деталь звичайно зазнає термообробки для того, щоб отримати необхідні властивості, наприклад, загартування/зміцнення, зниження напруження, стійкість до виникнення тріщин та специфічний рівень опору до багатоциклової утомленості, а потім вона також зазнає кінцевої обробки, наприклад, шляхом механічної обробки, хімічної обробки та/або доведенням у середовищах, що є необхідним для надання деталі точної форми, розмірів або властивостей.

Виробництво деталей шляхом кування потребує багато коштів та часу і тому його застосовують лише для деталей, які потребують певного балансу властивостей, наприклад, високої міцності, тривалої міцності та низької ваги, як при кімнатній температурі, так і при підвищених температурах. Щодо отримання матеріалу для кування, то певні матеріали потребують багато часу на виробничий цикл, який іноді триває декілька місяців. Кування звичайно включає ряд операцій, кожна з яких потребує окремих штампів та супровідного обладнання. Операції доведення після кування, наприклад, механічна обробка хвостовика лопатки та доведення поверхні до відповідної якості, потребують значної частини усіх коштів на виробництво кованих деталей, та після цих операцій відбраковується значна частина деталей.

Під час кування деталей більша частина початкового матеріалу (до приблизно 85%) видаляється і не утворює частину виготовленої деталі, тобто складає відходи виробництва. Складність форми деталі, яку виробляють, лише потребує додаткових зусиль та вартості, необхідних для виготовлення деталі, що є найбільш характерним для деталей газотурбінних двигунів, які мають особливо складні форми. Суперсплави на основі нікелю, такі як IN 718, також демонструють значну пружну післядію, наприклад, якщо матеріал є пружним, і пружну післядію слід враховувати під час кування, тобто деталі слід звичайно "надмірно кувати". Як зазначалось вище, зроблені деталі все ще можуть потребувати додаткової обробки після кування. Крім того, якщо використовують комп'ютерні програми для забезпечення розрахованої динаміки потоку для того, щоб проаналізувати і отримати форми профілів з більш ефективними аеродинамічними властивостями, то такі профілі та деталі мають навіть ще більш складні тривимірні форми. Отже, відповідно, більш складно або неможливо викувати суперсплави точно у ці розвинуті, складніші форми, наприклад, частково внаслідок трохи пружної природи, яку багато матеріалів демонструють під час кування, що, у свою чергу, потребує додаткових коштів на виробництво деталей або надає деталям такої вартості, що, з точки зору економічності, неможливо застосовувати певні досягнення у технології двигунів або застосування певних сплавів для деяких деталей є зовсім нездійсненним. Ковані деталі також часто демонструють значну кількість дефектів, до яких належать вкrapлення та карбіди, які значно відрізняються від деталі до деталі. Деталю з більш високим вмістом ніобію, наприклад, IN 718, також притаманна природна ліквіація, а також утворення фаз, таких як фази Лавеса, та інших топологічно близьких за упаковкою фаз. Присутність та кількість цих дефектів шкідливо впливає на механічні властивості, особливо при підвищених температурах. Кількість цих дефектів звичайно залежить від складу матеріалу та тривалості часу, коли деталь зазнає впливу підвищеної температури, наприклад під час кування. Отже, деталі піддають термообробці для зниження або усування дефектів, наприклад, термообробці для гомогенізації, яка стає окремим етапом, що є додатковим до будь-яких інших етапів обробки, що виконують при виготовленні деталей. Термообробка звичайно включає дію на деталь відносно високої температури, наприклад, приблизно 1093°C (2000°F) протягом декількох годин. Ця температура є достатньо високою для того, щоб зменшити ліквіацію, проте не такою високою або тривалою, щоб виникало значне зростання зерен.

Лиття широко застосовували для виробництва деталей з відносно майже закінченою формою.

Для виробництва таких деталей можна застосовувати точне лиття за виплавленими моделями, при якому розплавлений метал впливається у керамічну оболонку, що має порожнину у формі деталі, яку слід

вилити. Проте, внаслідок точного лиття за виплавленими моделями отримують деталі, що мають надзвичайно великі зерна (відносно малого середнього розміру зерен, що можна отримати внаслідок кування), а у деяких випадках уся деталь складається з єдиного кристалу. Крім того, швидкість твердіння може стати причиною присутності природної ліквідації у неприйнятній кількості, що стає причиною великого розкиду у результатах тесту (вони є різними для різних деталей), або може стати причиною присутності крихких фаз, які також спричиняють погіршення властивостей. Крім того, через те, що для кожної деталі виробляється окрема модель, цей спосіб потребує великих коштів. Від деталі до деталі важко досягти відтворюваності дуже точних розмірів. Крім того, через те, що розплавлений метал плавиться, вливається та/або твердіє у повітрі або у присутності іншого газу, отримують деталі, що мають небажані властивості, такі як вкраплення та пористість, особливо для матеріалів, що містять хімічно активні елементи. Пористість слід знищити, наприклад, шляхом нагрівання деталі та дії тиску на деталь. Деталі з IN 718 при гарячому ізостатичному пресуванні звичайно піддають дії температури між 982-1024°C (1800-1875°F) при тиску між 105-154МПа (15-22ksi (тисяч фунтів-сили на квадратний дюйм)) протягом декількох годин. Відколювання часток від керамічної оболонки також стає причиною присутності вкраплень та домішок у литих деталях.

Лиття в кокіл, при якому розплавлений матеріал виливається у багатосекційну ливарну форму, яку можна застосовувати повторно, і тече у ливарну форму тільки під впливом сили тяжіння, також застосовували для виливання деталей взагалі. Дивись, наприклад, патент США № 5,505,246, автор Colvin. Проте, лиття в кокіл має деякі недоліки. Для тонкого литва, такого як профілі, дії сили тяжіння може бути недостатньо для просування матеріалу у більш тонкі секції, особливо там, де застосовуються матеріали з високими температурами плавлення та низькі перегіви, внаслідок чого ливарна форма повністю не заповнюється, через що деталі відбраковуються. Припустиме відхилення розмірів повинно бути відносно великим, і воно потребує відповідно більш значної обробки після виливання, і важко досягти повторюваності. Внаслідок лиття в кокіл остаточна поверхня деталі не є досконалою, що також потребує більше додаткової обробки після виливання.

Виливання під тиском, при якому розплавлений матеріал нагнічується під тиском у форму багаторазового застосування, успішно застосовували у минулому для створення таких деталей з матеріалів, що мають відносно низькі температури плавлення ( $T_m$ ), наприклад,  $T_m$  нижче приблизно 1093°C (2000°F).

Один тип ливарної машини для виливання під тиском описано у патенті США № 3,791,440 (автор Cross). У цьому патентові машина включає нерухомий елемент 11 форми та рухомий елемент 12 форми. Кажучи стисло, розплавлений метал вливається крізь впускний жолоб 22 та вертикальний ливниковий канал 21 і тече у нагнітальний циліндр 30, що сполучається з порожниною 15 форми. Достатня кількість розплавленого матеріалу вливається так, щоб заповнити нагнітальний циліндр 30 та частину вертикального ливникового каналу 21, і таким чином витискає повітря з нагнітального циліндра. Дивися, наприклад, колонку 6 рядки 7-17. Нагнітальний плунжер 38 примушує матеріал рухатися з нагнітального циліндра 30 у порожнину 15 форми. Циліндр, що блокує вертикальний ливниковий канал, та пов'язаний з ним плунжер 35 можуть ущільнити вертикальний ливниковий канал 21, наприклад, під час нагнітання. Нагнітальний циліндр 30 оточується однією з плит форми, що дозволяє запобігти деформації циліндра, коли розплавлений матеріал з високою температурою плавлення вливається у нагнітальний циліндр. У машині, запропонованій Cross'ом, вакуумне середовище не застосовують, проте здійснюють повне заповнення циліндра для того, щоб запобігти нагнітання повітря у форму.

Такі машини дорого коштують, крім того, таку машину не можна легко створити, і, отже, її підновлення та ремонт, за необхідністю, потребують багато коштів. Наприклад, у найкращому випадку, буде важко та дорого приєднати вакуумну систему до машини, тому що рукав оточується плитою, що ускладнює доступ до нього. Крім того, у найкращому випадку, буде важко перемішувати розплавлений матеріал з пристроєм, де матеріал плавиться, до впускного жолоба 22 в умовах вакууму. Також буде важко регулювати температуру форми, що зумовлюється не лише фізичним розміром вузла, який складається з плити та оточеної нею форми, але також тепловою масою такого вузла. Також буде важко здійснити такий вузол у конфігурації машини, що має вакуумне оточення.

Інший тип ливарної машини для виливання під тиском - це тип машини з "холодною камерою". Як описано, наприклад, у патентах США №№ 2,932,865, 3,106,002, 3,532,561 та 3,646,990, звичайна ливарна машина з "холодною камерою" для лиття під тиском включає завантажувальний рукав, що кріпиться до однієї (звичайно нерухомої) плити багатосекційної форми, наприклад, до двосекційної форми, що включає нерухому та рухому плити, що взаємодіють і визначають порожнину форми. Завантажувальний рукав можна влаштувати горизонтально, вертикально або з нахилом між горизонталлю та вертикаллю. Завантажувальний рукав сполучається з ливником форми і включає отвір зверху рукава, крізь який вливається розплавлений метал. Плунжер розташовано так, щоб він рухався у рукаві і примушував розплавлений метал, який знаходиться у рукаві, рухатися у форму. У машині "холодного типу" завантажувальний рукав влаштовують горизонтально та його не нагрівають. Виливання звичайно здійснюється в атмосферних умовах, тобто, обладнання не розташовують у хімічно інертному середовищі, такому як вакуумна камера.

Недоліки таких машин обговорюються у патенті США № 3,646,990, особливо у зв'язку з неможливістю застосування таких машин для лиття матеріалів з більш високими температурами плавлення ( $T_m$  більш приблизно 1093°C (2000°F)), таких як суперсплави на основі нікелю, кобальту та заліза. У звичайних машинах з холодною камерою у завантажувальному рукаві повітря не відкачується, і плунжер нагнічує у форму також і повітря, внаслідок чого деталі, вилиті під тиском, мають небажану та недопустиму пористість. Отже, для того, щоб запобігти нагнітання пазирчиків повітря разом з розплавленим матеріалом, завантажувальний рукав слід наповнити максимально можливо або нахилити його так, щоб повітря, деяка кількість якого є у розплавленому матеріалі, виходило з форми до нагнітання.

Крім того, оскільки завантажувальний рукав не нагрівається, то поверхнева плівка або "оболонка"

розплавленого металу тужавіє на внутрішній поверхні завантажувального рукава, і для того, щоб плунжер зміг би рухатися крізь рукав для нагнітання розплавленого металу у форму, плунжер повинен зіскоблювати плівку з рукава та "руйнувати оболонку". Проте, якщо оболонка утворює структурно міцний елемент, наприклад, у формі циліндра, який підтримується рукавом, плунжер та/або пов'язаний конструктивний елемент для рухання плунжера може пошкодитися або зруйнуватися. Якщо рукав деформується під впливом температур та не співпадає з формою плунжера або якщо плунжер деформується та не співпадає з формою рукава, то метал може просочуватися між плунжером та рукавом ("зворотний удар") та/або деяка кількість захопленого газу може проходити між плунжером та рукавом, при цьому усе це шкідливо впливає на якість отриманих деталей. Дивись також патент США № 3,533,464, автори Parlanti та інші.

Незважаючи на значні зусилля, звичайні ливарні машини з "холодною камерою" для лиття під тиском не знайшли успішного застосування для виробництва деталей, що складаються з тугоплавких матеріалів, таких як суперсплави на основі нікелю. Останні спроби щодо лиття під тиском тугоплавких матеріалів, таких як суперсплави, призвели до руйнування ливарних машин для лиття під тиском, а також до того, що деталі мали низьку якість, а саме: вони мали домішки, надмірну пористість та ліквіацію та відносно низьку міцність, та погані характеристики багатоциклової та низькоциклової утомленості.

Загальною метою цього винаходу є створення деталей, відлитих під тиском, які складаються з тугоплавких матеріалів, таких як суперсплави на основі нікелю.

Іншою метою цього винаходу є створення деталей з суперсплаву, відлитих під тиском, з властивостями, що є аналогічними до відповідних деталей, отриманих шляхом кування.

Більш специфічною метою цього винаходу є створення деталей з суперсплавів, що мають міцність, тривалу міцність та опір до утомленості, що є аналогічними до відповідних характеристик деталей з суперсплавів, отриманих шляхом кування.

Ще однією метою цього винаходу є створення таких деталей, що мають складні тривимірні форми, які важко і навіть неможливо кувати.

Іншою загальною метою цього винаходу є зниження або знищення будь-якої природної ліквіації у деталях з суперсплавів, відлитих під тиском.

Більш специфічною метою цього винаходу є термообробка для зниження або знищення природної ліквіації та топологічно близьких за упаковкою фаз у деталях з IN 718, відлитих під тиском.

Іншою метою цього винаходу є термообробка, яка може також включати відповідні параметри гарячого ізостатичного пресування для зниження або знищення будь-якої остаточної пористості.

На підставі наступного опису та ілюстративного матеріалу фахівці у галузі зрозуміють додаткові цілі цього винаходу.

Суть винаходу

Згідно з одним аспектом цього винаходу пропонується деталь, відлита під тиском, що складається з суперсплаву на основі нікелю, такого як IN 718. Такі деталі переважно, принаймні, відповідають вимогам міцності, тривалої міцності та низьких швидкостей розтріскування відповідних кованих деталей, наприклад, згідно з AMS 5663 або AMS 5383. До таких деталей, наприклад, належать лопатка та лопатка напрямного апарата газотурбінного двигуна. Мікроструктура кожної деталі є подібною до мікроструктури кованого матеріалу і характеризується більш однорідними зернами і тим, що середній розмір дрібних зерен для литої деталі становить, наприклад, менш ніж приблизно ASTM 3 (ASTM - це Американське товариство з випробувань матеріалів), переважно ASTM 5 або менше. Мікроструктура переважно далі характеризується відсутністю ліній ковзання. У випадку з обертовими деталями, такими як лопатки газотурбінних двигунів, переважно, щоб середній розмір зерен був меншим ніж, наприклад, переважно ASTM 5 або менше, більш переважно ASTM 6 або менше.

Згідно з іншим аспектом винаходу, заявлено спосіб термообробки відливої під тиском деталі з суперсплаву, що має пористість та природну ліквіацію, як литво. Спосіб включає нагрівання деталі до температури приблизно 982-1121°C (1800-2050°F), переважно між 982-1023°C (1800-1875°F) протягом приблизно 1-24 годин, завдяки чому зменшується ліквіація. Більш переважно, деталь піддають дії тиску між приблизно 105-154МПа (15-25ksi) під час етапу нагрівання, внаслідок чого одночасно значно зменшується пористість.

Деталі мають як границю плинності, так і границю міцності на розрив як при кімнатній, так і при підвищених температурах, що є аналогічними до відповідних характеристик кованих деталей, що складаються з такого ж матеріалу, і також мають подібні характеристики багатоциклової та низькоциклової утомленості.

Перевага цього винаходу полягає в тому, що виливання під тиском є значно менш тривалим для виробництва деталі від зливка до виготовленої деталі тому, що уникає необхідності виготовлення спеціально пригнаних заготовок матеріалу або приготування керамічної оболонки для точного лиття за виплавленими моделями, та тому, що виливання виконується за єдиний етап на відміну від багатоетапних операцій кування або приготування оболонок. Крім того, виливання під тиском дозволяє виробляти багато деталей за єдиний етап виливання. Виливання під тиском, крім того, дозволяє виробляти деталі, що мають складніші тривимірні форми, що, у свою чергу, дозволяє отримати профілі та інші деталі з досконалішими аеродинамічними властивостями на відміну від кування. Цей винахід дозволить виробляти деталі, що застосовують матеріали та мають форми, які важко або неможливо викувати. Крім того, відлиті під тиском деталі мають більш значну відтворюваність порівняно з кованими деталями або деталями, які отримали шляхом точного лиття за виплавленими моделями, та їх можна виготовити ближче до їхньої остаточної форми з належною остаточною поверхнею, що мінімізує операції остаточного доведення. Усе це також знижує вартість виробництва таких деталей. Додаткові переваги будуть зрозумілими завдяки наступному ілюстративному матеріалові та докладному опису.

Стислий опис ілюстративного матеріалу

Фіг.1 - ілюструє відлиту під тиском деталь, що складається з IN 718 згідно з цим винаходом.

Фіг.2 - мікрофотографія, що ілюструє мікроструктуру випробного стрижня, що складається з IN 718, відлитого під тиском, згідно з цим винаходом.

Фіг.3 - мікрофотографія, що ілюструє мікроструктуру профілю, що складається з IN 718, відлитого під тиском згідно з цим винаходом.

Фіг.4 - мікрофотографія профілю Фіг.3 після гарячого ізостатичного пресування профілю.

Фіг.5 - мікрофотографія, що ілюструє мікроструктуру профілю, що складається з кованого IN 718.

Фіг.6 та 7 ілюструють властивості деталі, відливої під тиском з IN 718 згідно з цим винаходом, та відповідних кованих деталей.

Фіг.8 та 9 - це схематичне зображення ливарної машини для виливання під тиском, яку застосовують для виробництва деталей, що складаються з IN 718.

Фіг.10 - це схема виробничого процесу, що демонструє спосіб виливання IN 718 під тиском згідно з цим винаходом.

Фіг.11 - це графік, що ілюструє залежність середнього розміру зерен та відсоткове співвідношення ліквації у відлитій під тиском деталі з IN 718 від температури термообробки згідно з цим винаходом.

Фіг.12 - мікрофотографія, що ілюструє мікроструктуру, що містить природну ліквацію у відлитій під тиском деталі з IN 718.

Фіг.13 - мікрофотографія, що демонструє знижену ліквацію після гарячого ізотермічного пресування і термообробки згідно з цим винаходом.

Докладний опис переважних варіантів здійснення винаходу.

Звернемося зараз до Фіг.1. Відлиту під тиском деталь з суперсплаву на основі нікелю згідно з цим винаходом позначено взагалі позначкою 10. У зображеному варіанті здійснення деталь включає лопатку 10, що складається з IN 718 та яку застосовують у газотурбінному двигуні. Деталь включає профіль 12, основу 14 та хвостовик 16. Цей винахід знаходить широке застосування у багатьох випадках і він не обмежується будь-якою певною деталлю або застосуванням у газотурбінних двигунах. Переважно, відлиті під тиском деталі для застосування у газотурбінному двигуні (на відміну від відлитих під тиском деталей для інших випадків застосування) мають міцність, низьку швидкість розтріскування та високу границю тривалої міцності, як встановлено у AMS 5663 (AMS - це Специфікації аерокосмічних матеріалів) [Rev. J, publ. Sep. 1997] (для відповідних кованих деталей) або AMS 5383 [Rev. J, publ. Apr. 1993] (для відповідних деталей, отриманих шляхом точного лиття за виплавленими моделями - для застосування більш низької міцності відносно AMS 5663). Специфікації аерокосмічних матеріалів опубліковано SAE (Товариство Автомобільних інженерів) Int'l of Warrendale, PA, і включено в цей опис шляхом посилання.

Як зазначалося вище, звичайним суперсплавом на основі нікелю, який застосовують у газотурбінних двигунах, є Inconel 718 (IN 718), який номінально містить, у вагових відсотках, приблизно 19 Cr, 3,1 Mo, приблизно 5,3 (Nb + Ta), 0,9 Ti, 0,6 Al, 19 Fe та основу. Взагалі IN 718 містить, у вагових відсотках, приблизно 0,01-0,05 вуглецю (C), до приблизно 0,4 марганцю (Mn), до приблизно 0,2 кремнію (Si), 13-25 хрому (Cr), до приблизно 1,5 кобальту (Co), 2,5-3,5 молібдену (Mo), 5,0-5,75 (Колумбію (Nb) + танталу (Ta)), 0,7-1,2 титану (Ti), 0,3-0,9 алюмінію (Al), до приблизно 21 заліза (Fe), решта - практично нікель. Ще більш переважно IN 718 має склад: приблизно 0,02-0,04 C, до приблизно 0,35 Mn, до приблизно 0,15 Si, 17-21 Cr, до приблизно 1 Co, 2,8-3,3 (Mo + W + Re), 5,15-5,5 (Nb + Ta), 0,75-1,15 (Ti + V + Hf), 0,4-0,7 Al, до приблизно 19 Fe, решта - практично Ni та сліди інших елементів.

У IN 718 можна зробити модифікації складу, наприклад, шляхом підвищення вмісту Nb у матеріалі, який слід вилити, а також за рахунок підвищення вмісту інших зміцнювальних елементів, для поліпшення міцності та інших характеристик.

Ми виготовили відлиті під тиском деталі, що складаються з суперсплавів на основі нікелю, шляхом застосування ливарної машини для виливання під тиском, зображеної та описаної, наприклад, у патентах США № 3,791,440 та 3,810,505, автором обох є Cross. Ми також отримали такі деталі шляхом виливання у ливарних машинах з "холодною камерою" для лиття під тиском, які звичайно мають завантажувальний рукав, який не нагрівається, та які було описано вище та у патенті США № 3,791,440. Ми послідовно застосовували та віддаємо перевагу застосуванню машин з "холодною камерою" у зв'язку з цим винаходом, принаймні тому, що такі машини мають меншу вартість, їх легше зробити, їх можна підновляти, за необхідністю, для застосування для виливання під тиском таких тугоплавких матеріалів, та їх ремонт, за необхідністю, не потребує багато коштів.

Кажучи стисло, згідно з цим винаходом, принаймні, єдине завантаження матеріалу розплавляють так, щоб мінімізувати забруднення, яке пов'язано або з плавильним пристроєм або з реакцією одного або більше елементів матеріалу. Отже, сплав нагрівається та розплавлюється у хімічно неактивному, наприклад, інертному або, переважно, у вакуумному середовищі, переважно при цьому підтримується тиск менш ніж 100мкм, переважно менш ніж 50мкм. Сплав також нагрівається до регульованого, обмеженого перегріву, наприклад, звичайно на 38-93°C (100-200°F) вище температури плавлення сплаву і, переважно, на 10-38°C (50-100°F) вище, при цьому, переважно, застосовувати незабруднювальний плавильний пристрій. Ми віддаємо перевагу застосуванню плавильної системи без кераміки, такої як пристрій для індукційного плавлення з гарнісажем. Матеріал слід перегріти в достатній мірі для того, щоб він залишився розплавленим доки він не буде нагнічений у форму, проте недостатньо для того, щоб запобігти швидкому твердінню розплавленого матеріалу після нагнітання. Розплавлений сплав потім переміщують у горизонтальний завантажувальний рукав машини, який переважно знаходиться у вакуумному середовищі, та розплавлений матеріал нагнічують під тиском у ливарну форму, яку можна застосовувати повторно. Процес вливання та нагнітання розплавленого матеріалу не повинен тривати більш, ніж декілька секунд, при цьому нагнітання слід виконувати протягом переважно менше 1 або 2 секунд у ливарній машині для лиття під тиском, що має завантажувальний рукав, який не нагрівається.

Слід зазначити, що деталі після виливання можна піддати термомеханічній обробці, якщо це необхідно. Інакше кажучи, деталі можна кувати після виливання під тиском, наприклад, вилиті під тиском

деталі можуть служити як попередні форми для застосування в операції кування. Ми віддаємо перевагу тому, щоб деталі, які відлиті під тиском, мали максимально точну форму так, щоб звести до мінімуму обробку деталей після виливання, що знижує їх вартість.

Згідно з цим винаходом деталі, які виготовляються згідно з цим винаходом, мають мікроструктуру з дрібними зернами з постійним середнім розміром, особливо для відлитих деталей, і лінії ковзання є відсутніми. Дивися Фіг.2 та 3, які ілюструють мікроструктуру відлитих під тиском випробного стрижня та профілю з IN 718, відповідно, та Фіг.5, що ілюструє мікроструктуру звичайного кованого профілю з IN 718. На Фіг.2 середній розмір зерен відповідає приблизно ASTM 6. На Фіг.5 середній розмір зерен відповідає приблизно ASTM 10.

Деталі характеризуються невеликим середнім розміром зерен, наприклад, для необертових деталей газотурбінного двигуна, таких як кожухи та ущільнення, середній розмір зерен відповідає ASTM 3 або менше, переважно ASTM 5 або менше. Щодо обертових деталей, таких як лопатки газотурбінного двигуна, переважний середній розмір зерен є меншим, наприклад, переважно ASTM 5 або менше, більш переважно ASTM 6 або менше. Переважний середній розмір зерен та максимально припустимий розмір зерен будуть зумовлюватися застосуванням деталі, наприклад, слід враховувати, чи буде деталь застосовуватися у газотурбінному двигуні, а не десь ще, чи вона є обертовою або необертовою, чи вона буде функціонувати у середовищах з низькою температурою або з високою температурою. Такі деталі за своїми властивостями є аналогічними, переважно, принаймні, еквівалентними до відповідних деталей, що складаються з кованого матеріалу.

Внаслідок обстеження відлитих під тиском деталей, таких що складаються з IN 718, несподівано виявили присутність, принаймні, деяких фаз Лавеса та інших топологічно близьких за упаковкою фаз, а також природну ліквідацію. Наявність таких дефектів є дивною, за умови відносно високої швидкості (порівняно з точним литтям за виплавленими моделями), при якій розплавлений матеріал охолоджується після нагнітання у ливарну форму. Як обговорювалося раніше, присутність цих дефектів шкідливо впливає на механічні властивості деталей. Залежно від призначення деталей, ці дефекти слід зменшити або уникнути їх. Приклади термообробки для зменшення або знищення цих дефектів обговорюються стосовно Фіг.12-14.

Як зазначалося вище, цей винахід дозволяє отримати відлиті під тиском деталі, які мають не лише належну міцність, але й інші властивості, що є аналогічними або кращими, ніж властивості відповідних кованих деталей, наприклад, низьку швидкість розтріскування та високу границю тривалої міцності. Зразки відлитого під тиском IN 718 згідно з цим винаходом випробували для визначення границі плинності та границі міцності на розрив, а також пластичності та ударної в'язкості. Щодо міцності на розрив, то зразки відлитих під тиском деталей з IN 718 випробували як при кімнатній температурі (приблизно 70°F), так і при підвищених температурах, наприклад, приблизно 650°C (1200°F), які підтримували протягом деякого періоду часу до випробування. Зразки піддавали розтягуванню зі швидкістю деформації між 0,076-0,178мм/мм/хвилину або 0,003-0,007 дюймів/дюймів/хвилину через границю плинності, а потім швидкість підвищували для здійснення розриву приблизно через 1 хвилину. Як зображено на Фіг.6 та 7, відлиті під тиском деталі при кімнатній температурі та при підвищених температурах є аналогічними стосовно умовної границі плинності (0,2%), границі міцності на розрив, відносного подовження при розриві та ударної в'язкості.

Більш специфічно необхідно, щоб у випадку з лопатками та лопатками напрямівного апарата, наприклад, обертовими деталями, відлиті під тиском деталі мали, принаймні, міцність та ударну в'язкість еквівалентні до тих, які демонструють відповідні ковані деталі. Лопатки, лопатки напрямівного апарата та обертові деталі, що складаються з IN 718, повинні мати умовну границю плинності при кімнатній температурі, принаймні, 1ГПа (140ksi) та переважно, принаймні, 1,05ГПа (150ksi) і найбільш переважно, принаймні, 1,12ГПа (160ksi), та границю плинності при 650°C (1200°F), принаймні, 805МПа (115ksi), та переважно 875МПа (125ksi), та найбільш переважно, принаймні, 945МПа (135ksi). Такі деталі мають границю міцності на розрив при кімнатній температурі, принаймні, 1,23ГПа (175ksi), переважно, принаймні, 1,3ГПа (185ksi) та найбільш переважно, принаймні, 1,37ГПа (195ksi), та границю міцності на розрив при 650°C (1200°F), принаймні, 1ГПа (140ksi), та переважно 1,05ГПа (150ksi), та найбільш переважно, принаймні, 1,12ГПа (160ksi).

Крім того, здійснили випробування на тривалу міцність стандартного набору гладких зразків та зразків з надрізом (що містять матеріал, отриманий згідно з цим винаходом), наприклад, які відповідають ASTM E292. Зразки підтримували при температурі приблизно 650°C (1200°F) та їх піддали тривалому навантаженню після генерування початкового аксіального напруження між приблизно 735-770МПа (105-110ksi). У випадку з матеріалом для лопаток та лопаток напрямівного апарата зразки розривалися лише через, принаймні, 23 години. Ці значення є аналогічними до значень, які були знайдені у AMS 5663, зазначеному вище.

Також здійснили випробування на тривалу міцність при приблизно 704°C (1300°F) подібного стандартного набору гладких зразків та зразків з надрізом (що містять матеріал, отриманий згідно з цим винаходом), наприклад, які відповідають ASTM E292. Зразки піддали тривалому навантаженню після генерування початкового аксіального напруження між приблизно 420-455МПа (60-65ksi). У випадку з матеріалом для лопаток та лопаток напрямівного апарата зразки розривалися лише через, принаймні, 40 годин.

Також визначили властивості повзучості при приблизно 650°C (1200°F). Зразки підтримували при температурі приблизно 650°C (1200°F) та навантажували для отримання аксіального напруження, принаймні, приблизно 560МПа (80ksi). Визначили, що час до 0,1% пластичної деформації у випадку з матеріалом для лопаток та лопаток напрямівного апарата, перебільшує приблизно 15 годин. І знов, специфічні необхідні значення будуть різними залежно від певного призначення, для якого виготовляються деталі.

Для необертових деталей, таких як кожухи, фланці та ущільнення, наприклад, кільця, вищезазначені

значення перебільшують необхідні значення. Більш специфічно, необертові деталі, такі як кільця та ущільнення, що складаються з IN 718 повинні мати умовну границю плинності при кімнатній температурі, що становить, принаймні, 910МПа (30ksi), і переважно, принаймні, 1ГПа (140ksi), і найбільш переважно, принаймні, 1,05ГПа (150ksi), та границю плинності при 650°C (1200°F), що становить, принаймні, 735МПа (105ksi), та переважно, принаймні, 805МПа (115ksi), та найбільш переважно, принаймні, 875МПа (125ksi). Такі деталі мають границю міцності на розрив, що при кімнатній температурі становить, принаймні, 1,16ГПа (165ksi), та переважно, принаймні, 1,23ГПа (175ksi), та найбільш переважно, принаймні, 1,3ГПа (185ksi), та границю міцності на розрив при 650°C (1200°F), що становить, принаймні, 875МПа (125ksi), і переважно, принаймні, 945МПа (135ksi), та найбільш переважно, принаймні, 1,02ГПа (145ksi).

Крім того, здійснили випробування на тривалу міцність стандартного набору гладких зразків та зразків з надрізом (що містять матеріал, отриманий згідно з цим винаходом), наприклад, які відповідають ASTM E292. Зразки підтримували при температурі приблизно 650°C (1200°F) та їх піддали тривалому навантаженню після генерування початкового аксіального напруження між приблизно 735-770МПа (105-110ksi). У випадку з матеріалом для лопаток та лопаток напрямівного апарата зразки розривалися лише через, принаймні, 23 години, та відносно подовження становило, принаймні, приблизно 6%.

Також здійснили випробування на тривалу міцність при приблизно 704°C (1300°F) подібного стандартного набору гладких зразків та зразків з надрізом (що містять матеріал, отриманий згідно з цим винаходом), наприклад, які відповідають ASTM E292. Зразки піддали тривалому навантаженню після генерування початкового аксіального напруження між приблизно 420-455МПа (60-65ksi). У випадку з матеріалом для лопаток та лопаток напрямівного апарата зразки розривалися лише через, принаймні, 85 годин.

Також визначили властивості повзучості при приблизно 650°C (1200°F). Зразки підтримували при температурі приблизно 650°C (1200°F) та навантажили для отримання аксіального напруження, принаймні, приблизно 560МПа (80ksi). Визначили, що час до 0,1% пластичної деформації у випадку з матеріалом для лопаток та лопаток напрямівного апарата, перебільшує приблизно 15 годин. І знов, специфічні необхідні значення будуть різними залежно від певного призначення, для якого виготовляються деталі.

AMS 5663 передбачає наступні властивості:

Властивість	Кімнатна температура	1200°F (650°C) +/-10
Міцність на розрив, мінімум	1,26ГПа (180ksi)	1ГПа (140ksi)
Границя плинності,		
0,2% деформація, мінімум	1,05ГПа (150ksi)	875МПа (125ksi)
Відносне подовження у 4D, мінімум	10%	10%
Зменшення площі, мінімум	12%	12%

AMS 5383 передбачає наступні властивості:

Властивість	Кімнатна температура
Міцність на розрив, мінімум	840МПа (120ksi)
Границя плинності,	
0,2% деформація, мінімум	735МПа (105ksi)
Відносне подовження у 4D, мінімум	3%
Зменшення площі, мінімум	8%

Як зазначено у AMS 5663, властивості для кованого матеріалу відрізняються залежно від того, чи зразки випробують у подовжньому або поперечному напрямку, наприклад, властивості не є ізотропними, і нижні значення отримують під час поперечного випробування.

Крім того, здійснили випробування на тривалу міцність стандартного набору гладких зразків та зразків з надрізом (що містять матеріал, отриманий згідно з цим винаходом), наприклад, які відповідають ASTM E292. Зразки підтримували при температурі приблизно 650°C (1200°F) та їх піддали тривалому навантаженню після генерування початкового аксіального напруження між приблизно 735-770МПа (105-110ksi). Зразки розривалися через, принаймні, 23 години. Ці значення співпадають з вимогами AMS 5663.

Для деталей з більш низькою міцністю, а саме тих, що відповідають вимогам AMS 5383, здійснили випробування на тривалу міцність стандартного набору гладких зразків та зразків з надрізом. Зразки підтримували при температурі 704°C (1300°F) та їх піддали тривалому навантаженню після генерування початкового аксіального напруження приблизно 462МПа (65ksi). Зразки повинні розриватися лише через, принаймні, 23 години.

Звернемося зараз до Фіг.8, 9 та 10. Такі суперсплави на основі нікелю, як IN 718, слід переважно розплавляти та здійснювати лиття у хімічно неактивному середовищі, наприклад, у присутності інертного газу, або переважно у вакуумному середовищі. Переважний спосіб лиття деталей під тиском описано у заявці "Спосіб виготовлення відлитої під тиском деталей з тугоплавких або реактивних матеріалів" та у заявці "Пристрій для лиття під тиском тугоплавких матеріалів", що знаходяться на розгляді і які подані тієї ж самої дати, як і ця заявка, і які цілковито включено в цей опис шляхом посилання. Переважно підготовлюють єдине завантаження або невелику порцію (менш ніж приблизно 4,5кг (10 фунтів)) матеріалу (Фіг.10, етап 44). Завантаження розплавляють, так щоб забезпечити швидке плавлення без забруднення матеріалу. Розплавлений матеріал потім вливають у горизонтальний завантажувальний рукав ливарної машини для лиття під тиском з холодною камерою, з якого також переважно слід відкачати повітря, так щоб частково заповнити рукав. Розплавлений матеріал потім нагнічують у форму, яку переважно не нагрівають, де він твердне, утворюючи необхідну деталь.

Спочатку матеріал, який слід відлити під тиском, розплавляють (Фіг.10, етап 4 6) у пристрої 18, який зображено на Фіг.8 та 9. Якщо слід лити реакційно здатні матеріали, такі як суперсплави, що містять хімічно активні елементи, важливо розплавляти матеріали у хімічно неактивному середовищі для того, щоб

запобігти будь-якій реакції, забруднення або іншого стану, який може шкідливо впливати на якість отриманих деталей. Оскільки у місці плавлення розплавленим матеріалом може захоплюватися деяка кількість газів та спричиняти надмірну пористість у відлитих під тиском деталях, ми віддаємо перевагу тому, щоб плавити матеріал у вакуумному середовищі, на відміну від інертного середовища, наприклад, аргону. Переважно, щоб матеріал плавився у плавильній камері 20, яка є з'єднаною з джерелом вакууму 22, так що камера знаходиться при тиску менш ніж 100мкм, і переважно менш ніж 50мкм.

Ми віддаємо перевагу плавленню суперсплавів на основі нікелю, таких як IN 718, шляхом індукційного переплавлення або плавлення з гарнісажем (ISR) 24, наприклад, застосовуючи тигель, що виробляє Consarc Corporation of Rancocas, NJ, який є здатним швидко та чисто плавити єдине завантаження матеріалу, який слід лити, наприклад, до приблизно 25 фунтів матеріалу. При індукційному переплавленні з гарнісажем матеріал плавиться у тиглі, що має численні металеві (звичайно мідні) пальці, які закріплені один біля одного. Тигель оточується індукційною котушкою, з'єднаною з джерелом струму 26. Пальці мають проходи для циркуляції охолоджувальної води від та до джерела води (не зображено) для запобігання розплавлення пальців. Поле, що генерується котушкою, проходить скрізь тигель та нагріває і розплавляє матеріал, що знаходиться у тиглі. Поле також служить для перемішування та збівтування розплавленого металу. Тонкий шар матеріалу застигає на стінці тигля та утворює гарнісаж, через це зменшується здатність розплавленого матеріалу призводити до корозії тиглю. Внаслідок належного вибору тигля та котушки і рівня потужності та частоти, що подається до котушки, можна примусити розплавлений матеріал виходити з тигля за допомогою ефекту левітації розплавленого матеріалу.

Оскільки деякий час буде обов'язково минати між розплавленням матеріалу та нагнітанням розплавленого матеріалу у форму, матеріал плавлять із забезпеченням обмеженого перегріву - достатньо високого для того, щоб матеріал залишався б, принаймні, практично розплавленим до його нагнітання, але достатньо низького для того, щоб виникало швидке твердіння після нагнітання, наприклад, так, щоб могли утворитися дрібні зерна. Для суперсплавів ми віддаємо перевагу обмеженню перегріву на приблизно 93°C (200°F) вище точки плавлення, переважно менш ніж 38°C (100°F), більш переважно менш ніж 10°C (50°F).

Незважаючи на те, що ми віддаємо перевагу плавленню єдиних завантажень матеріалу шляхом застосування пристрою індукційного переплавлення з гарнісажем, матеріал можна плавити іншими способами, такими як вакуумно-індукційне плавлення (VIM), плавлення за допомогою електронного променя, плавлення струмом або плазмовою дугою. Крім того, ми не виключаємо плавлення великого об'єму матеріалу, наприклад, разом декількох завантажень матеріалу у вакуумному середовищі, з наступним переміщенням єдиних завантажень розплавленого матеріалу у завантажувальний рукав для нагнітання його у форму. Проте, оскільки матеріал плавиться у вакуумі, будь-яке обладнання, яке застосовують для переміщення розплавленого матеріалу, звичайно повинно витримувати високі температури та знаходитися у вакуумній камері, та, у свою чергу, камера повинна бути відносно великою. Додаткове обладнання потребує додаткових коштів, і велика вакуумна камера відповідно потребує більше часу для відкачування повітря, що підвищує тривалість усього процесу виробництва.

Для того, щоб перемістити розплавлений матеріал з тигля до завантажувального рукава 30 машини (Фіг.10, етап 48), тигель монтують так, щоб здійснити поступальний рух (стрілка 32 на Фіг.9) і також поворотний рух (стрілка 33 на Фіг.8) навколо осі вливання (не зображено), та, у свою чергу, кріплять до двигуна (також не зображено) для обертання тигля, щоб вилити розплавлений матеріал з тигля крізь впускний отвір 35 завантажувального рукава 30 з або без ливникової лійки, або чаші, яка приєднується до рукава. Поступальне переміщення здійснюють між плавильною камерою 20, у якій плавиться матеріал, та позицією у окремій вакуумній камері 34, у якій знаходиться завантажувальний рукав. Камера 34 для лиття також забезпечується хімічно неактивним середовищем, переважно вакуумним середовищем під тиском менш ніж 100мкм, та переважно менш ніж 50мкм. Плавильна камера 20 та камера 34 для лиття відокремлюються вакуумним клапаном або іншими прийнятними засобами (не зображено) для того, щоб мінімізувати втрату вакууму у випадку, якщо одна камера стає доступною для атмосфери, наприклад, для того, щоб мати доступ до якогось вузла у певній камері.

Як зазначалося вище, розплавлений матеріал переміщують з тигля 24 у завантажувальний рукав 30 крізь впускний отвір 35. Завантажувальний рукав 30 з'єднано з багатосекційною формою 36, яку можна застосовувати повторно і яка визначає порожнину 38 форми. Достатню кількість розплавленого матеріалу вливають у завантажувальний рукав для того, щоб заповнити порожнину форми, яка може включати одну частину або більше. За один раз ми успішно відлили 12 деталей, наприклад, застосовуючи форму з 12 порожнинами.

Зображена форма 36 включає дві частини 36a та 36b, які взаємодіють і визначають порожнину 38 форми, наприклад, у формі профілю для компресора газотурбінного двигуна. Форма 36 також є з'єднаною з джерелом вакууму для того, щоб можна було відкачати повітря з форми до нагнітання розплавленого матеріалу, і вона також може оточуватися окремою вакуумною камерою. Одну з частин 36a або 36b форми зафіксовано, проте інша частина є рухомою відносно першої частини, наприклад, за допомогою гідравлічного вузла (не зображено). Форми переважно включають виштовхувачі (не зображено) для того, щоб полегшити виштовхування затвердлого матеріалу з форми.

Форма може складатися з різних матеріалів, і вона повинна мати гарну питому теплопровідність і бути відносно стійкою до ерозії та хімічної корозії, що виникають внаслідок нагнітання розплавленого матеріалу. Вичерпний перелік можливих матеріалів був би досить великим і включав би матеріали, такі як метали, різноманітна кераміка, графіт та композиційні матеріали на металевій матриці. Для матеріалів форм ми успішно застосовували інструментальну сталь, таку як H13 та V57, матеріали на основі молібдену та вольфраму, такі як TZM та Anviloу, матеріали на основі міді, такі як сплав міді та берилію "Moldmax" високої твердості, сплави на основі кобальту, такі як F75 та L605, сплави на основі нікелю, такі як IN 100 та Rene 95, суперсплави на основі заліза та м'яку вуглецеву сталь, таку як 1018. Вибір матеріалу форми є вирішальним фактором для економічного виробництва деталей і залежить від складності та кількості

деталей, які необхідно вилити, а також від поточних витрат на виробництво деталі.

Кожен матеріал для форми має властивості, які надають змогу застосовувати його у різних випадках. Для недорогих матеріалів форм переважно застосовувати м'яку вуглецеву сталь та сплави міді і берилію завдяки тому, що їх відносно зручно обробляти механічно та з них легко виготовляти форму. Тугоплавкий метал, такий як матеріали на основі вольфраму та молібдену, переважно застосовувати для більш дорогих, більш об'ємних деталей завдяки їхній гарній міцності при високих температурах. Сплави на основі кобальту та сплави на основі нікелю, та більш високо легована інструментальна сталь забезпечують компроміс між цими двома групами матеріалів. Можна застосовувати покриття та обробку поверхні для підвищення експлуатаційних властивостей пристрою та якості отриманих деталей. Форма також може приєднуватися до джерела охолоджувача, такого як вода, або до джерела тепла, такого як масло (не зображено) для надання формі необхідної температури під час роботи. Крім того, мастило для форми можна наносити на одну або більше обраних частин форми та ливарної машини для лиття під тиском. Мастило, що застосовується, повинно взагалі підвищувати якість отриманих литих деталей і більш специфічно воно повинно бути стійким до теплового руйнування, так щоб не забруднювати матеріал, що нагнічується.

Розплавлений метал потім переміщують з тигля до завантажувального рукава. Достатню кількість розплавленого металу виливають у завантажувальний рукав для того, щоб заповнити порожнину для створення тиску та пов'язані ливники, саму форму, інші порожнини. Оскільки IN 718 не створює "оболонку" так, як сплави титану, то можна заповнювати завантажувальний рукав. Проте, ми виробили високоякісне литво, коли рукав заповнювався лише менш ніж на 50%, менш ніж на приблизно 40% та менш ніж на приблизно 30%.

Нагнітальний пристрій, такий як плунжер 40, діє разом з завантажувальним рукавом 30, та гідравліка або інший придатний агрегат (не зображено) рухає плунжер у напрямку стрілки 42 для того, щоб плунжер рухався між позицією, яку зображено суцільними лініями та позицією, яку зображено пунктирними лініями, внаслідок чого він буде нагнічувати розплавлений матеріал з рукава 30 до порожнини 38 форми (Фіг.10, етап 50). У позиції, яку зображено суцільними лініями, плунжер та рукав разом визначають об'єм, який є суттєво більшим, ніж об'єм розплавленого матеріалу, який буде нагнічуватися. Переважно, щоб об'єм, принаймні, удвічі перебільшував об'єм матеріалу, який слід нагнічувати, більш переважно, принаймні, утричі. Отже, об'єм розплавленого матеріалу переміщується з тигля до рукава, якщо рукав заповнюється лише частково, деяка кількість матеріалу або плівка, що застигає на рукаві, утворює лише частковий циліндр, наприклад, відкриту дугоподібну поверхню, і він легше зіскоблюється або руйнується під час нагнітання металу і знов потрапляє до розплавленого матеріалу. Для нагнітання ми застосовували швидкість плунжера між приблизно 0,77 м/с (30ips (дюймів за секунду)) та 7,7 м/с (300ips), і зараз ми віддаємо перевагу швидкості плунжера, що становить між приблизно 1,3-4,5 м/с (50-175ips). Плунжер звичайно рухається, коли тиск становить, принаймні, 8,4 МПа (1200psi (фунтів на квадратний дюйм)), та переважно, принаймні, 10,5 МПа (1500 psi). Коли плунжер наближається до кінця його ходу, коли порожнина форми заповнена, він починає передавати тиск металу. Тиск, що передається на метал, потім збільшується, переважно до, принаймні, 3,5 МПа (500psi) та більш переважно до, принаймні, приблизно 10,5 МПа (1500psi) для того, щоб повністю заповнити порожнину ливарної форми. Тиск підвищують також для того, щоб мінімізувати пористість, і для того, щоб знизити або запобігти будь-якої усадці матеріалу під час охолодження. Через достатній період часу, який потребується для твердіння матеріалу у формі, приводять у дію виштовхувачі (не зображено) для виштовхування деталей з форми (Фіг.10, етап 52).

З рівня техніки відомо, що відлиті деталі, взагалі, та відлиті під тиском деталі, зокрема, мають тенденцію мати деяку пористість, взагалі до декількох відсотків. Відповідно, і особливо, якщо такі деталі застосовують у випадках з підвищеними вимогами, а саме у компресорних профілях для газотурбінних двигунів, існує потреба у зниженні і переважно знищенні пористості, для чого їх обробляють, якщо це потрібно (Фіг.10, етап 54). Деталі, отже, піддають гарячому ізостатичному пресуванню, як описано вище, для зниження та суттєвого знищення будь-якої пористості у відлитих деталях. Для суперсплавів на основі нікелю, таких як IN 718, ми віддаємо перевагу гарячому ізостатичному пресуванню при температурі між приблизно 982-1093°C (1800-2000°F), більш переважно між приблизно 982-1023°C (1800-1875°F) протягом мінімум приблизно 4 годин та при тиску між приблизно 105-175 МПа (15-25ksi).

За необхідністю кожну деталь потім можна піддати термообробці. Для профілів, що складаються з відлитого під тиском IN 718, термообробка включає стандартну та комерційно прийнятну обробку, таку як описано у AMS 5663.

Дійсні параметри термообробки та гарячого ізостатичного пресування можуть бути різними, залежно від необхідних властивостей деталі, її застосування та заздалегідь заданого часу циклу для процесу, проте температура, тиск та час, які застосовують під час гарячого ізостатичного пресування, повинні бути достатніми для того, щоб практично знищити усю пористість та гомогенізувати будь-яку ліквідацію литва, що залишилася, проте, вони не повинні спричиняти значне зростання зерен.

Деталі перевіряють (Фіг.10, етап 56) з застосуванням звичайних способів перевірки, наприклад, шляхом флуоресцентно-проникної дефектоскопії (FPI), радіографічної дефектоскопії, візуального контролю, та після здійснення контролю їх можна використовувати, або, за необхідністю, обробляти далі або повторно (Фіг.10, етап 58).

Звернемо увагу на термообробку. Ми визначили, що ліквідацію та топологічно близькі за упаковкою фази можна зменшити або практично знищити при практично знижених температурах, порівняно з попередніми деталями, і, отже, можна уникнути присутності природної ліквідації у межах таких параметрів, як при гарячому ізостатичному пресуванні. Термообробка включає нагрівання матеріалу до температури між приблизно 982-1121°C (1800-2050°F) протягом періоду, що становить між приблизно 1-24 години, та при тиску приблизно 105-175 МПа (15-25ksi), при цьому пористість повинна бути знищена. Обробку переважно здійснюють у інертному середовищі, такому як аргон. Дійсні параметри можуть бути різними, залежно від



бажаного застосування деталі та заздалегідь заданого часу циклу для процесу, проте температура, тиск та час повинні бути достатніми для практичного знищення усієї пористості та зниження ліквациї у відлитих деталях (зображено на Фіг.12), проте вони не повинні викликати значного зростання зерен. Фіг.13 ілюструє відлитий під тиском матеріал IN 718 після його нагрівання до температури приблизно 1010°C (1850°F) протягом 2 годин без тиску для того, щоб продемонструвати зниження ліквациї. Застосування відповідного тиску при ізостатичному нагріванні протягом цього періоду знищує існуючу пористість.

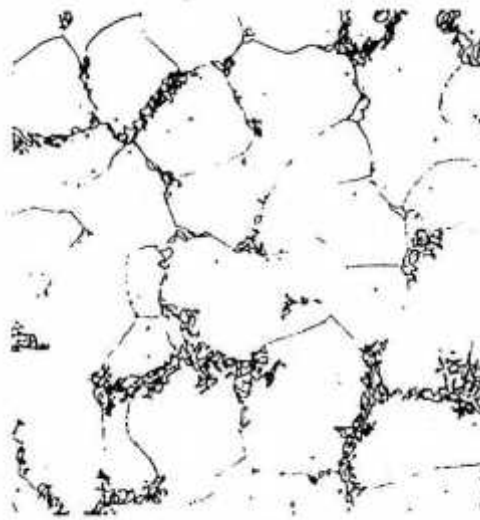
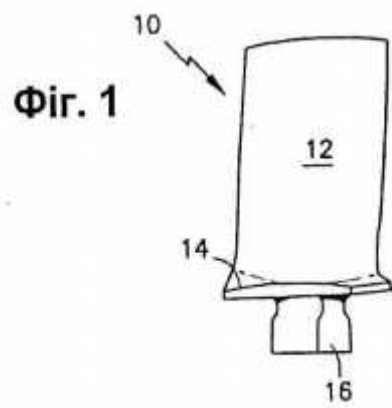
Температура та час будуть впливати на отриманий розмір зерен деталі. На прикладі та з посиланням до Фіг.11, деталь з IN 718, відлита під тиском, має середній розмір зерен, що становить приблизно ASTM 9, та відсоткове співвідношення ліквациї, що становить приблизно 30% (дивися малюнок ліворуч від кривої). Зразки нагрівали при температурах між приблизно 954-1121°C (1750-2050°F), і оброблені деталі мали знижену ліквацию та середні розміри зерен, які зростали з підвищенням температур. Зростання середнього розміру зерен підвищується з подовженням часу, особливо при підвищених температурах. Крива, зображена на Фіг.11, відповідає відлитому під тиском IN 718, проте інші матеріали можуть демонструвати подібну поведінку. Дивися, наприклад, заявку "Відлиті під тиском деталі з суперсплавів", що знаходиться на розгляді.

Внаслідок нашої роботи з суперсплавами на основі нікелю ми вважаємо, що для виробництва литва належної якості важливими є декілька умов. Плавлення, виливання та нагнітання матеріалу, особливо для реакційно здатних матеріалів, слід виконувати у хімічно неактивному середовищі, та ми віддаємо перевагу здійсненню цих операцій у вакуумному середовищі, у якому тиск підтримується переважно менш ніж 100мкм, і більш переважно менш ніж 50мкм. Перегрів повинен бути достатнім для того, щоб матеріал залишався суттєво та повністю розплавленим з часу його вливання і до часу його нагнітання, але також, щоб він міг швидко охолоджуватися та утворювати невеликі зерна після нагнітання. Внаслідок відносно низького перегріву, переміщення та нагнітання розплавленого матеріалу повинні бути достатньо швидкими для того, щоб їх здійснити до твердіння металу. Виявляється, що отримана мікроструктура, така як розмір зерен, відповідає поперечній товщині деталі, яку відливають, а також матеріалам форми, які застосовують, та перегріву, який використовують, а саме більш тонкі секції мають тенденцію включати дрібніші зерна, а більш товсті секції (особливо внутрішні частини більш товстих секцій) мають тенденцію включати крупніші зерна. Чим вище питома теплопровідність матеріалів форм, тим дрібніші зерна деталей внаслідок дії більш низьких перегрівів. Ми вважаємо, що причиною цього є відносні швидкості охолодження цих секцій. Швидкість, з якою рухається плунжер та, відповідно, швидкість, з якою матеріал нагнічується у ливарну форму, як виявляється, впливають на остаточну поверхню литої деталі, хоча й конструкція ливникової системи, а також матеріал форми у комбінації зі швидкістю нагнітання можуть приймати у цьому участь. Ретельний контроль за термообробкою після лиття є необхідним для того, щоб повністю досягти переваг, які пропонуються відносно тонкою мікроструктурою литва, відлитого під тиском.

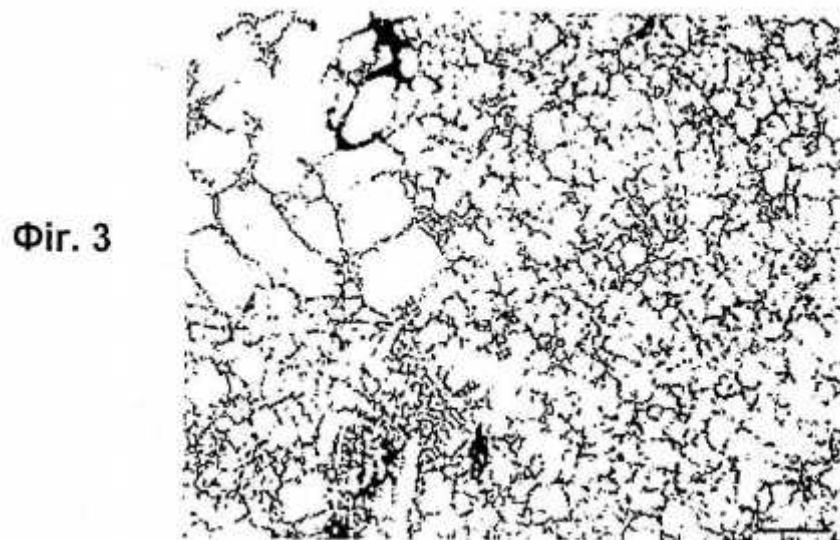
Виливання під тиском має також інші значні переваги, порівняно з куванням. Час, що є необхідним для виробництва деталі зі зливка до остаточної деталі, значно скорочується завдяки тому, що зникає необхідність у приготуванні спеціально пригнаних заготовок матеріалу, та завдяки тому, що виливання виконується за єдиний етап, на відміну від численних операцій кування. При виливанні під тиском численні деталі можна виробляти за єдине виливання. Виливання під тиском дозволяє виробляти деталі, що мають складніші тривимірні форми, що дозволяє запровадити та застосовувати нову програмну технологію конструювання та виробництва у галузях, таких як газотурбінні двигуни, і виробляти ефективніші профілі та інші деталі. Ми вважаємо, що лиття під тиском дозволить виробляти деталі, що мають складні форми, застосовуючи при цьому матеріали, які важко або неможливо кувати так, щоб вони мали ці форми. Крім того, відлиті під тиском деталі мають більшу відтворюваність, ніж деталі, отримані шляхом кування або точного лиття за виплавленими моделями, та їхня форма може бути ближчою до остаточної форми, а остаточна поверхня - мати більш високу якість, що дозволяє звести до мінімуму операції доведення після виливання, що також знижує вартість виробництва таких деталей.

Термообробка згідно з цим винаходом забезпечує певні переваги. Ця термообробка знищує недоліки виливання, наприклад, пористість, ліквацию Лавеса та інші небажані топологічно близькі за упаковкою фази, проте забезпечує утворення дрібних зерен, що надає деталям відмінних механічних властивостей. Крім того, така обробка дозволяє знищити усі вищезазначені шкідливі ефекти за єдиний етап, що зберігає кошти, час та дії.

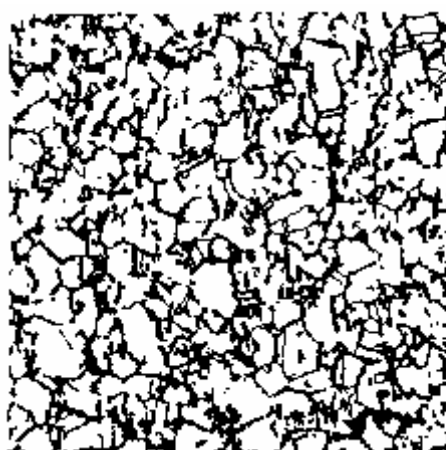
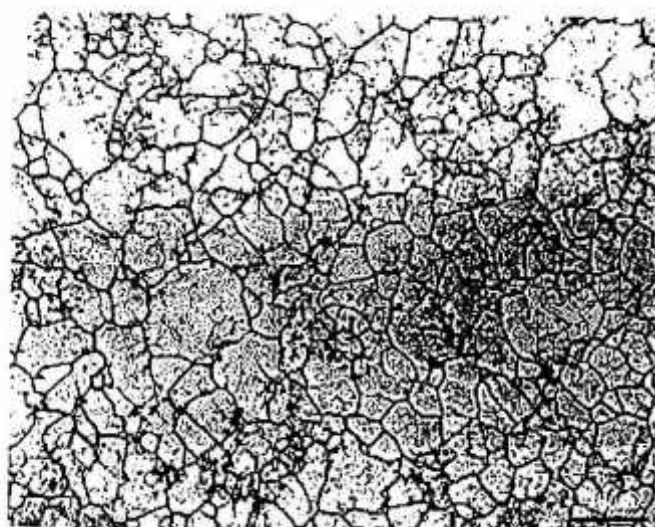
Незважаючи на те, що цей винахід було докладно описано вище, можливими є численні варіанти та заміни, що не суперечать духові винаходу або об'ємові наступних пунктів формули винаходу. Отже, слід розуміти, що винахід було описано з метою ілюстрації, а не обмеження.



**Fig. 2**

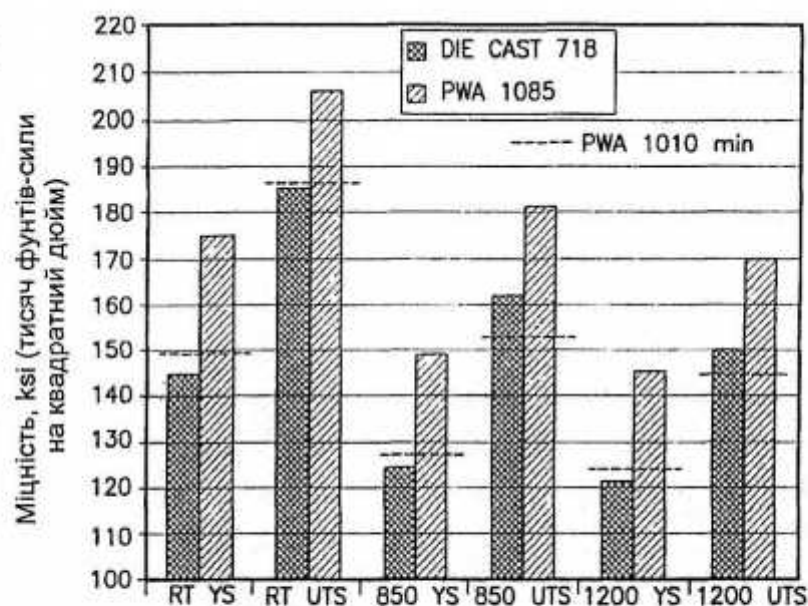


Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 6



DIE CAST 718 - відлите під тиском литво з Inconel 718

RT YS - границя плинності при кімнатній температурі;

RT UTS - границя міцності на розрив при кімнатній температурі;

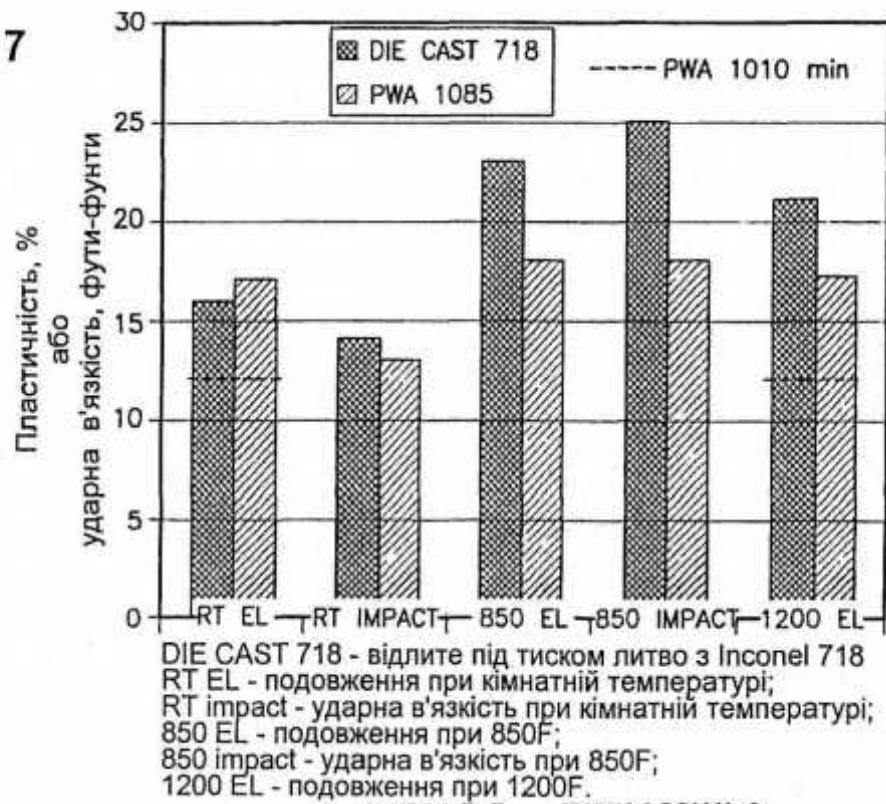
850 YS - границя плинності при 850F;

850 UTS - границя міцності на розрив при 850F;

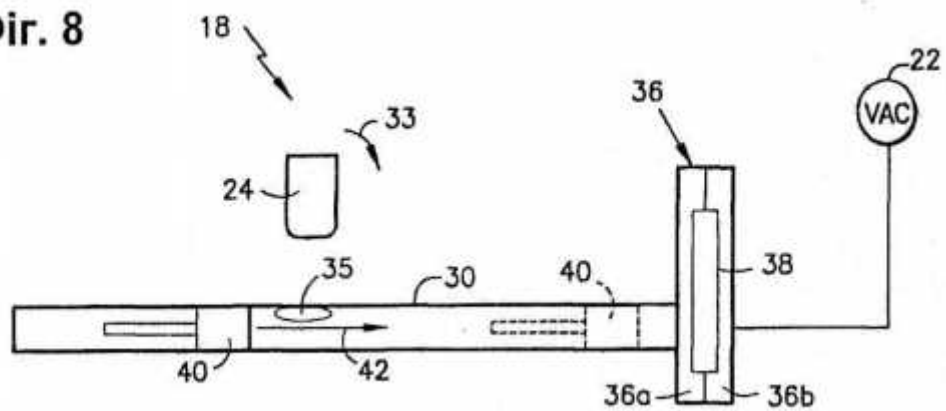
1200 YS - границя плинності при 1200F;

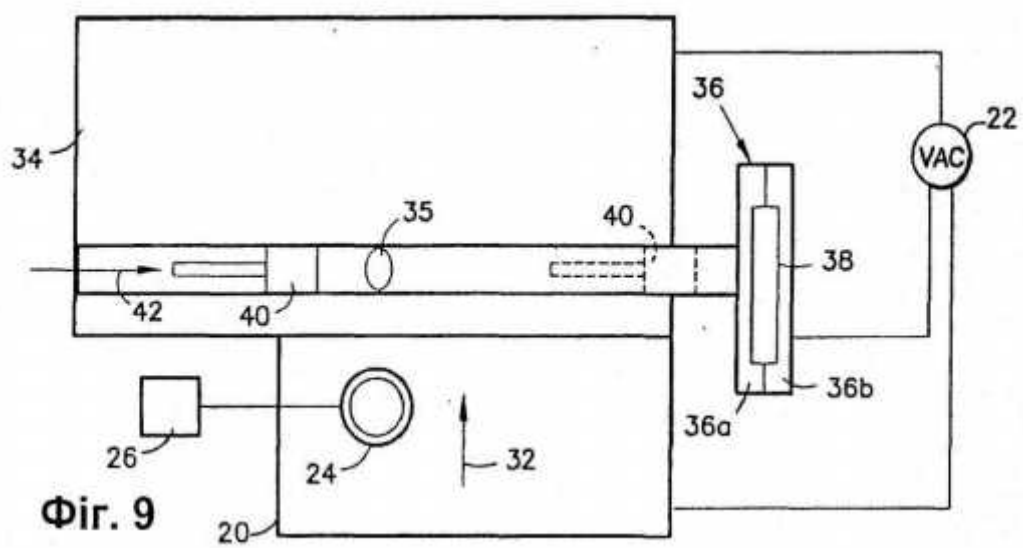
1200 UTS - границя міцності на розрив при 1200F.

Фіг. 7



Фіг. 8





**Fig. 9**

Фіг. 10

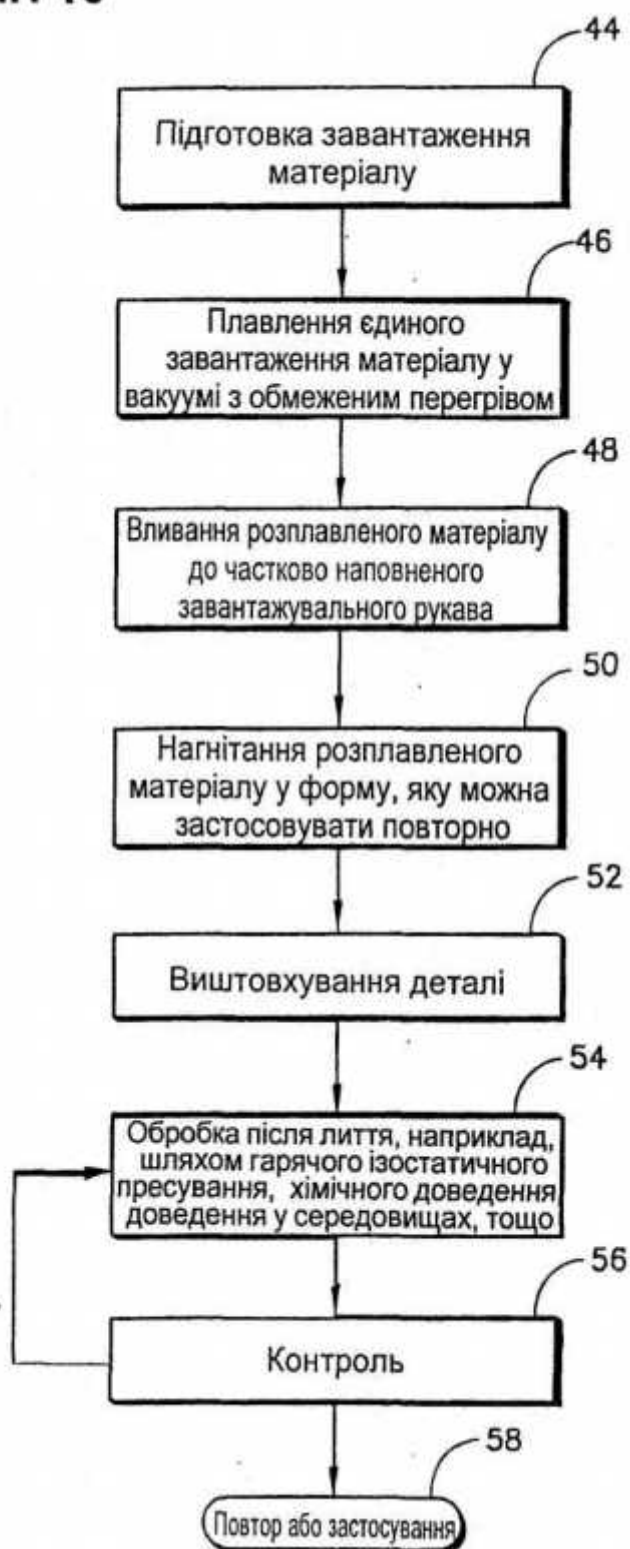


Fig. 11

Відлите під тиском литво з INCONEL 718

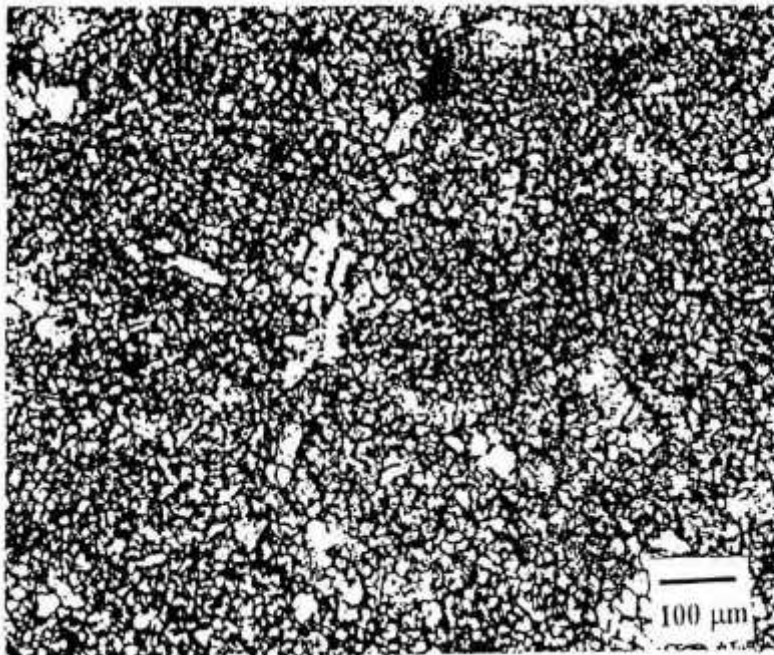
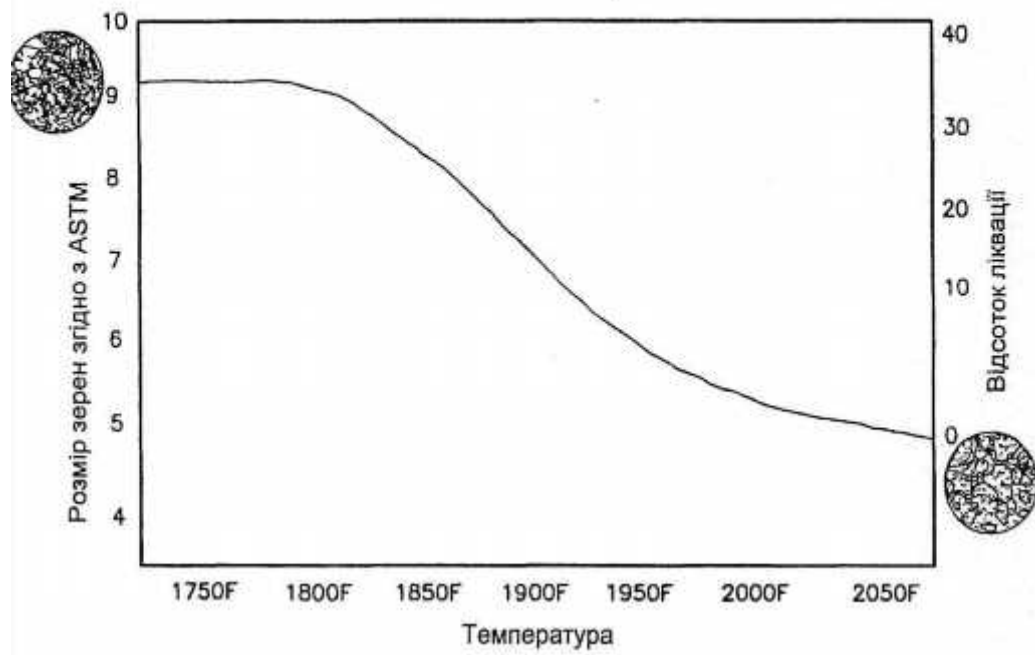
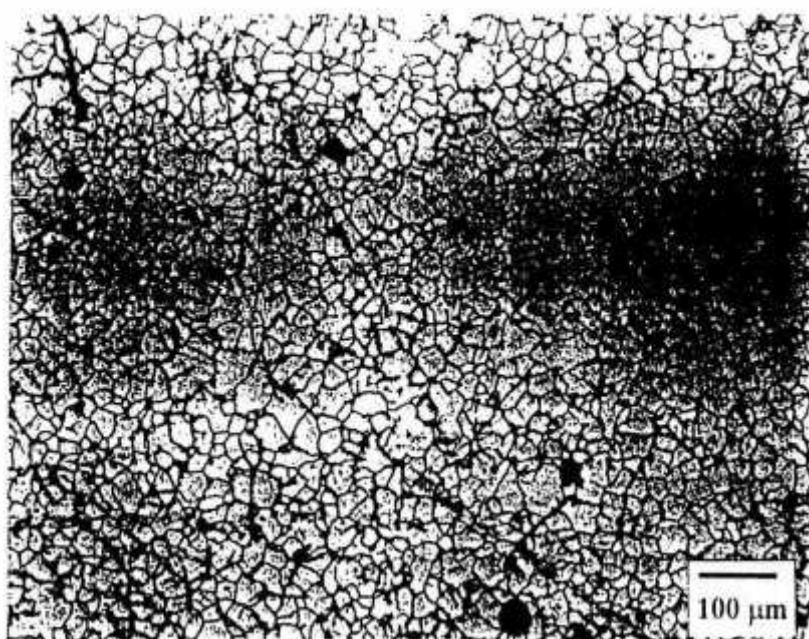


Fig. 12



**Fig. 13**