
ЗАТВЕРДІННЯ СПЛАВІВ

УДК 669.715:669.788

Ф. М. Котлярський, д-р техн. наук, ст. наук. співр.

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ІСНУЮЧІ УЯВЛЕННЯ ПРО ВПЛИВ ВОДНЮ НА ВЛАСТИВОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ. Повідомлення 1

У поданому літературному огляді в хронологічному порядку описано розвиток подвійного впливу водню на формування та якість виливків з алюмінієвих сплавів і, відповідно, неоднозначне відношення до нього з боку вчених і практиків ливарників. До середини минулого століття існувала однастайна думка, що водень дуже шкідлива домішка, причина різних видів браку, зниження виходу придатного та погіршення економічних показників виробництва, тому необхідно максимально зменшувати його вміст у зливках і фасонних виливках. Однак дослідженнями, виконаними в наступні роки, доказано, що використання розчиненого в алюмінієвих сплавах водню в якості легуючого або модифікуючого елемента дозволяє значно зміцнити низку сплавів у деформованому стані при збереженні задовільної пластичності, вперше забезпечити можливість холодної пластичної деформації заевтектичних силумінів. Особливо важливу роль відіграє водень у формуванні складних фасонних виливків з металоємними вузлами, живлення яких з метою усунення концентрованих раковин та утяжин вимагає збільшення кількості надливів, технологічних напусків та схилів з великими непродуктивними затратами рідкого металу, що економічно не вигідно. В той же час, підвищення вмісту водню в розплаві дозволяє замінити браконосні усадочні дефекти допустимою розсередженою газовою мікропористістю, зберігаючи конфігурацію виливка близькою до рисунка деталі і покращуючи герметичність металоємних вузлів. Крім того, загальноновизнаний позитивний вплив водневої пористості на підвищення тріщиностійкості та зниження гарячеламкості. При цьому механічні властивості залишаються на рівні експлуатаційних вимог. У практичному плані заслуговує уваги водневе рафінування алюмінієвих сплавів, як найдешевший екологічно чистий метод рафінування, який на відміну від інших методів забезпечує вибіркоче видалення найбільш крупної фракції твердих включень, залишаючи дрібні для виконання ролі зародків кристалів. При цьому методі плавка попередньо наводнених шихтових матеріалів перетворюється з традиційно забруднюючої розплав у рафінуючу. В огляд включено останні розробки ФТІМС НАН України, в яких вперше дана відповідь на питання: якщо в одних організаціях (ВІЛС, МАТІ) барботажна обробка розплаву водяною парою використовується для забруднення (в дослідних цілях) включеннями Al_2O_3 , а в інших (ФТІМС НАН України) за допомогою тієї ж операції видаляють вибірково найбільш крупну фракцію тих же включень, то що ж відбувається в дійсності?; розкрито механізм заміни газової пористості усадочною раковиною при автоклавному литті і литті під низьким тиском; вивчено властивості пористого металу, що важливо для оцінки експлуатаційного стану металоємних вузлів виливків з пористою будовою; випадки локального порушення герметичності в зоні газової пористості; воднева пористість – індикатор вмісту в розплаві включень Al_2O_3 з можливістю використання результатів аналізу по ходу плавки; водень як складова частина структури рідкого стану; суміщення наводнення з іншими видами обробки розплаву.

Ключові слова: алюмінієві сплави, лиття, водень, подвійний вплив, модифікатор, рафінування, економіка.

Якщо до середини минулого століття неподільно панувала концепція шкідливості водню, то в подальший час стали відмічати і позитивні сторони [1, 2]. Думки фахівців розділилися.

У монографії [3] зроблено спробу об'єктивного відображення тих і інших сторін. У розділі негативного впливу розглянуто окремо бінарні силуміни з низьким ступенем евтектичності (до 8 % Si) [4–17], бінарні силуміни з високим ступенем евтектичності (вище 8 % Si) [7, 10, 15, 18–22], заевтектичні силуміни [23, 24], силуміни, леговані іншими металами [11, 12, 18, 20, 25–30], інші сплави (Al–Cu, Al–Mg, Al–Zn) [9, 10, 25–27, 31–43], технічний алюміній [32, 44, 45].

Аналіз інформації з опрацьованих джерел показав, що водень, створюючи газову пористість в алюмінієвих сплавах, у багатьох випадках погіршує їх якість і в першу чергу істотно знижує міцність і пластичність. До числа інших властивостей, чутливі до негативного впливу газової пористості, слід віднести: текучість, витривалість, втому, крихкість, корозію, гідроцильність, ударну в'язкість, ліквідацію та ін. В результаті це призводить до невідповідності вимогам ГОСТу і браку виливків. У кількісному плані при реально одержуваних значеннях газової пористості у виливках величина падіння міцності і пластичності може досягати відповідно: AlSi7 – 35 і 75 %; AlSi9 і AlSi12 – 25 і 50 %; Al–Si–Cu – 30 і 50 %; Al–Cu – 24 і 33 %; Al–Mg – 30 і 40 %; Al–Zn – 25 і 100 %.

Механізм негативного впливу водню на властивості виливків, на думку авторів [46], полягає в тому, що з підвищенням концентрації водню товщина кордонів зерен збільшується, що супроводжується утворенням пов'язаних між собою пор з розвинутою поверхнею.

Пористість - безпосередня причина утворення розшарувань в деформованих напівфабрикатах [4]. Максимальний розвиток розшарувань спостерігається зазвичай в об'ємах металу з підвищеною мікропористістю. Тому, сприяючи розвитку мікропористості, водень знижує герметичність деформованих напівфабрикатів.

Що стосується заевтектичних силумінів, то за виявленими джерелами встановлено, що присутність в розплаві (Al–Si₂₄) розчиненого водню є основною причиною огрубіння модифікованої структури [23], а в інших вказується, що газоподібний водень, який виділяється на кристалах кремнію, призводить до їх спливання, посилюючи, таким чином, ліквідаційні процеси [24].

Слід також зазначити, що достовірність наведених у низці робіт даних по величині пористості, її приналежності до газової та впливу на властивості сплавів викликає сумнів, оскільки в умовах недостатнього живлення (а такі виливки використовувалися) могла накластися усадочна складова, а при зростанні пористості за рахунок зниження інтенсивності твердіння виливка або його частини (такі приклади теж були) зміна властивостей металу визначалась не тільки пористістю, але і структурним фактором.

Переходячи до позитивного впливу, слід розрізнити два види корисного впливу водню на якість алюмінієвих сплавів в залежності від форми перебування водню в сплаві: розчин або газова фаза.

Вплив розчиненого водню. У цьому випадку водень використовують як легуючий або модифікуючий елемент і не акцентують увагу на пористості (Афанасьєв В. К. зі співавторами). Більш того, в деяких роботах відсутність пористості є умовою досягнення необхідного ефекту [34, 47]. Так введення в розроблений авторами сплав (Al+(0,5–2,5)% Si+(0,1–3)% Mg+(0,1–0,7)% Be+(0,1–2)% Cu+(0,0008–0,00231)% H) водню у вигляді гідриду алюмінію в заданих межах (9–26 см³/100 г) сприяє підвищенню міцності сплаву в деформованому стані на 15–40 %. А зміцнення після гарячої прокатки сплаву АМг2 за рахунок легування воднем спільно з кальцієм і лантаном становить в середньому 40–65 %. У цих же роботах підтверджена можливість підвищення міцності сплаву Д16 в деформованому і термічно обробленому стані на 20–30 % за рахунок введення водню спільно з ванадієм і церієм. Причому всі зміцнені таким чином сплави зберігали задовільну пластичність. При вмісті водню більше зазначеного пластичність різко падає в результаті появи пористості.

У більш ранніх роботах [48–52] для забезпечення в сплавах необхідного вмісту

Затвердіння сплавів

водню використовували наводнені шихтові матеріали. Зокрема, для сплавів Al–11%Mg і Al27–1 характерно підвищення пластичності і міцності, якщо вони готуються на наводненому магнії [48]. Для сплаву Al–4,5% Cu ефект від наводненої лігатури дещо слабше.

В роботі [49] досліджували сплави Al–5%Cu; Al–7%Cu; Al–3%Fe; Al–2,4%Fe. Пластична деформація шихтових матеріалів в твердорідкому стані дозволяє підвищити міцність виливків зі сплавів Al–Cu на 45–55 % (відливали плити в алюмінієвий кокіль). Попереднє наводнення шихти перед деформацією шляхом обробки розплаву паром протягом 5–25 хв додатково підвищує σ_v на 20–30 % і δ на 15–45 %.

Використання наводненої лігатури Al+3,2%Ti для приготування сплаву АМг10 підвищило σ_v від 365 до 480 МПа і δ від 26 до 33,5 % [50]. При оптимальному наводненні шихтових матеріалів розчинений водень змінює кількість, форму і характер розподілу проміжних вторинних фаз (Mg_3Al_2 , $CuAl_2$ та ін.) і зменшує величину α -зерен сплавів. Це призводить до різкого підвищення пластичних властивостей. У силумінах диспергується кремніста фаза.

У роботах [51, 52] показано, що застосування різних способів приготування шихти, обробки розплаву і кристалізації, що збільшують вміст водню, дозволяє зменшити кількість і розміри виділень кремністої фази. Це забезпечує можливість холодної пластичної деформації заевтектичних силумінів з великим ступенем нагартівки. Наведено дані, згідно з якими в сплавах алюмінію з 15–20% Si введення водню дозволяє отримати якісну деформовану заготовку з найбільш низькими значеннями коефіцієнта лінійного розширення (КЛР) в порівнянні з усіма литими сплавами Al–Si при температурах випробувань до 200 °С. Більш того, водень діє ефективніше, ніж добавки магнію та міді. Механічні властивості зберігаються.

Наводнення заевтектичних силумінів здійснювали і в роботах [53, 54], причому в роботі [54] це робили шляхом введення в розплав різної кількості шлаку силумінового виробництва, а в роботі [53] – шляхом обробки розплаву з 15–20 % Si водяною паром. У першому випадку міцність підвищилася на 30 %, пластичність на 60 %, а в другому ці ж показники збільшилися відповідно на 10–20 МПа і в 1,5–2 рази.

При литті під тиском евтектичного силуміну обробка розплаву водяною паром також знижує КЛР і сприяє модифікації його мікроструктури, з чим пов'язано підвищення міцності на 2,5–3 кгс/мм² [53].

Судячи з описаних методів наводнення сплавів, не можна виключати утворення в литому металі газової пористості, однак її вплив на механічні властивості в наведених роботах невідомий.

Цілеспрямоване легування Al–Ni–сплавів сприяє підвищенню їх жароміцності після пластичної деформації [55].

Таким чином, використання розчиненого в алюмінієвих сплавах водню в якості легуючого або модифікуючого елемента (частіше спільно з іншими елементами) дозволяє значно (на 15–65%) зміцнити ряд сплавів (АМг2, Д16 та ін.) в деформованому стані при збереженні задовільної пластичності, або підвищити те й інше (сплав АМг10) за рахунок зміни кількості, форми і характеру розподілу проміжних фаз і зменшення α -зерен сплавів. Диспергування кремністої фази заевтектичних силумінів забезпечує підвищення міцності (до 30 %), пластичності (до 60 %) і можливість їх холодної пластичної деформації.

Вплив водневої пористості на механічні властивості. У розділі «негативного впливу» було показано, що пористість суттєво знижує і міцність, і пластичність. Однак, по-перше, так буває не завжди, а по-друге, відсутність або незначність негативного впливу водневої пористості на механічні властивості алюмінієвих сплавів можна розглядати як позитивний фактор, оскільки в таких випадках виявляється можливим використовувати водневу пористість для вирішення інших питань: усунення утяжин, розсередження внутрішніх концентрованих усадочних дефектів, підвищення герметичності, скорочення витрат рідкого металу на надлив.

Ще в 1964 р. М. Б. Альтман заявив, що збільшення пористості сплаву АЛ4 з одного

до трьох балів незначно вплинуло на зменшення міцності і пластичності [56], а в 1973 р в роботі [57] було встановлено, що зниження густини сплаву Д1 на 2,5 % внаслідок газонасичення при контакті з водою під час заливки не позначилося на пластичності.

Можна також послатися на деякі результати термочасової обробки алюмінієвих сплавів. В роботі [58] при 1033–1043 К розплав АЛ34 (6,5–8,5 % Si) обробляли 1,0–1,2 % фторцирконату калію, потім рафінували 0,3 % титанової стружки і перегрівали до 1073, 1123 і 1223 К. Від перегрітого розплаву відбирали половину об'єму, охолоджували його до 913 К, вливали в нього перегрітий розплав, що залишився, доводили температуру суміші до 973 К і заливали в кокіль зразки діаметром 12 мм для випробування на механічні властивості. Встановлено, що ці властивості безперервно зростають з підвищенням температури перегріву, і для сплаву, перегрітого до 1223 К, приріст міцності порівняно з технологією плавки без перегріву склав 5,8 %, а приріст відносного подовження – 37,5 %. Механічні властивості підвищуються, незважаючи на збільшення з перегрівом газомістості і пористості, що змінилася від нульової до 2–3 балів.

В роботі [50] у рідкі сплави систем Al–Si і Al–Cu при 720–730 °C вводили 10 % гранул наводненого алюмінію (при 900 °C насичували воднем, а потім кристалізували у воді, що обертається) і без рафінування розливали при 700 °C у плоский кокіль. Для сплаву з 9 % Si σ_B і δ збільшилися, відповідно, в 1,18 і 2,05 рази. Позитивний ефект зафіксований на всіх досліджених доевтектичних сплавах. Величина пористості не вказана.

З цих робіт [50, 58] незрозуміло, яку роль в підвищенні механічних властивостей грає газова пористість, тим більше, що автори мали на меті досягнення позитивного ефекту за рахунок структурних перетворень.

Приблизно така ж картина двофакторного впливу мала місце в роботі [59] по кокільному литтю алюмінієвих сплавів і роботі [53] по литтю під тиском заевтектичних силумінів. У першому випадку підвищення σ_B від 14 до 22 кгс/мм² сталося після збільшення температури заливки сплаву від 640 до 710 °C, а в другому – обробка розплаву з 20–25 % Si водяною парою забезпечила зростання міцності на 10–20 МПа і відносного подовження в 1,5–2 рази. Але в обох випадках мова йде про умови недостатнього живлення вилівка, де роль водневої пористості зводиться не до прямого впливу на властивості сплавів, а до заміни більш шкідливих усадочних дефектів в виливках.

Про незвичність сприйняття позитивного впливу газової пористості на механічні властивості алюмінієвих сплавів говорить і той факт, що навіть в недавніх роботах такого роду результати викликають здивування у самих авторів. Так, в роботі [60], коли наводнені зразки отримали одночасне збільшення міцності і пластичності (без термочасової обробки), автори априорі визнали такий результат неймовірним і знайшли пояснення, що виключає отриманий «феномен». В іншій роботі [61] найцікавішим (на рівні сенсації) названо встановлений факт, що при невеликому розмірі пор (до 50 мкм) спостерігається зміцнення матеріалу порівняно з монолітом, що має той же хімічний склад.

Ще менше робіт з даного питання опубліковано вченими-ливарниками далекого зарубіжжя. Уже в середині минулого століття англієць Мерфі А. Дж. повідомив [40], що стосовно алюмінієвих сплавів зміна пористості в межах 0,8–2,9 % майже не вплинула на їх втомну міцність, межа міцності зменшилася всього лише на 1,6 %, а подовження знизилося на 15 %. Більше конкретної інформації міститься в роботі німецьких дослідників [62], присвяченій безпосередньо впливу пористості на механічні властивості виливків з алюмінієвих сплавів товщиною 20 мм. Отримані результати наведено в табл. 1, з якої видно, що в цілому для досліджених сплавів газова пористість призводить до деякого зниження міцності, проте відносне подовження в більшості випадків збільшується.

Група югославських фахівців [63] литтям за газифікованими моделями (ЛГМ) отримували з силуміну (9,7 % Si; 0,23 % Mg; 0,29 % Mn; 0,13 % Fe, 0,03 % Zn, 0,02 % Ti) виливки у вигляді плит 200x50x20 мм. У блоці з чотирьох плит ливникова система складалася зі стояка діаметром 25 мм і живильників розміром 50x20x20 мм. Розплав дегазували і модифікували солями – хлоридом і фторидом натрію. Для оцінки пористості використовували метод вимірювання поверхні пор по периметру. Дослідні

Таблиця 1

Вплив пористості на механічні властивості виливків з алюмінієвих сплавів товщиною 20 мм

Сплав	Пористість, %	σ_B , МПа	δ , %
AlSi7Mg0,6Na	0	288	1,4
	3,7	280	1,3
	8,6	270	1,6
AlCu4TiNa	0	306	3,1
	1,4	287	3,3
AlSi11MgSr	0	131	2,4
	3,0	130	3,2
AlSi11Mg	0	141	3,1
	3,4	144	3,0
AlSi11Sr	0	150	14,1
	3,4	137	12,5

виливки порівнювали з аналогічними виливками, отриманими литтям у звичайні піщані форми (ЛПФ). Отримані дані наведено в табл. 2. Видно чітка закономірність – з підвищенням пористості підвищуються і механічні властивості.

У ФТІМС НАН України дослідження впливу водню на формування і властивості силумінових виливків ведуться, починаючи з опублікованої в 1983 р.

роботи [64], в якій природа газової та усадочної пористості вперше розглянута з позиції напруженого стану розплаву у виливку, що твердне, що дозволило розкрити істотні переваги газонасичених сплавів при отриманні виливків в умовах недостатнього живлення. Якщо при зниженні тиску через усадку газ не встигає або не може виділитися з розплаву, що

характерно для рафінованих сплавів, в замкнутому просторі виникають розтягуючі зусилля (негативний тиск), під дією яких спочатку утворюються зовнішні утяжини, а потім відбувається розрив рідини на найбільшому і найменш змочуваному включенні з подальшим утворенням внутрішніх концентрованих раковин, сполучених тріщин і рихлот. При виділенні газів можливо лише зниження тиску, яке залишається позитивним аж до закінчення затвердіння виливка. У цих умовах замість перерахованих браконосних усадочних дефектів відбувається утворення допустимої розсередженої по непросочуваному вузлу газової пористості, що підтверджено результатами експериментальних досліджень впливу різних режимів температурно-часового наводнення розплаву в атмосфері водяної пари на формування, механічні властивості і структуру виливків в залежності від дефіциту живлення [65]. В якості дослідного виливка використовували перевернутий усічений конус висотою 168 і діаметром основ 67 і 50 мм. Живлення здійснювалося верхнім утепленням надливом (діаметр 70, висота 60 мм) через живильники, приведена товщина яких становила 4,5; 7,6; 12 і 17 мм.

Головною перевагою термочасової обробки виявилось підтримання міцності сплавів приблизно на одному рівні незалежно від умов живлення (120 МПа для сплаву Al+6%Si і 165 МПа для сплаву Al+12%Si, що близько до гостівських значень), тоді як у необроблених сплавів цей показник з погіршенням живлення різко знижується (відповідно, до 90 і 150 МПа).

Таблиця 2

Вплив ЛГМ на властивості силумінових виливків

Метод лиття	Пористість, %	σ_B , МПа	δ , %
ЛПФ	2,35	110	1,5
ЛГМ	4,0	122	3,3
ЛГМ	4,8	127	3,7
ЛГМ	5,7	125	4,2

Затвердіння сплавів

Таким чином, представляється можливим за рахунок деякого зниження завищених механічних властивостей на ділянці виливка з нормальним живленням при твердінні підвищити недостатні властивості на металомістких недоживлених ділянках.

Аналогічні виливки зі сплаву Al+12%Si з максимальними перетинами живильників, що забезпечують нормальне живлення при твердінні, отримували [14] в тих же умовах, але в автоклаві з надлишковим тиском 0,5 МПа. Експериментальні дані (усереднені по шести зразках) наведено в табл. 3. Як видно, при максимальній водневої пористості 0,62 % (другий режим ТВО) міцність збільшилася на 4 % і пластичність на 24 %. При третьому режимі ТВО σ_B дещо знизилася (на 2 %), а δ також збільшилася (на 7,4 %).

В роботі [20] при отриманні зі сплавів СИЛ-0 і АК5М2 циліндричних виливків діаметром 50 мм і висотою 200 мм у кокілях з різною товщиною стінки (від 2 до 16 мм) наводнення розплавів вологим азбестом при температурі 750 °С практично не вплинуло на пластичність при всіх інтенсивностях твердіння, а також на міцність при повільному і швидкому твердінні. Це незважаючи на відносну пористість до 6 %.

У пошуковій науково-дослідній роботі [15] наведено дані, згідно з якими при литті в кокіль циліндричних виливків зі сплаву СИЛ-0 наводнення розплаву підвищило і міцність на розрив (більше 10 %) і відносно подовження (більше 30 %).

Таблиця 3

Вплив режимів термочасової обробки розплаву на пористість і механічні властивості нормально живлених виливків зі сплаву Al+12%Si, отриманих при автоклавному тиску 0,5 МПа

Режим обробки розплаву	Відносна пористість, %	σ_B , МПа	δ , %
Перегрів на 80–90 °С вище температури лівідус	0	142	6,8
Часова витримка в атмосфері водяного пару при 1000 °С	0,62	148	8,4
Додаткове швидке охолодження від 1000 до 650 °С	0,53	139	7,3

Найбільш повну інформацію щодо впливу водневої пористості на механічні властивості виливків зі сплаву АК12, що одержували литтям в кокіль в умовах гарантованого живлення при твердінні, наведено в роботі [16]. У цій роботі враховані такі фактори, як товщина стінки виливка і її положення при заливці. Отримані результати підтверджують доцільність водневої обробки силумінів, близьких за складом до евтектики, у всіх випадках, у тому числі при отриманні виливків, які нормально жили при твердінні. Незважаючи на підвищення газової пористості в 10–20 разів (від 0,1–0,2 до 1,5–2 %), механічні властивості (міцність, пластичність) вертикальних стінок виливків практично не погіршуються, а в горизонтальних стінках навіть поліпшуються, в тому числі пластичність підвищується в 1,5 рази. На думку авторів, цей ефект може бути викликаний видаленням з розплаву під час водневої обробки певного типу неметалічних включень, які впливають на пластичність більш негативно, ніж зазначене збільшення пористості. Однак, звертає на себе увагу той факт, що зі збільшенням витримки після наводнення разом зі зниженням пористості зменшується і відносно подовження. Тут слід або визнати позитивну роль самої пористості, або припустити, що за час півгодинної витримки в розплав повернулися шкідливі неметалеві включення.

Підсумовуючи матеріал, можна зробити висновок, що позитивний вплив водневої пористості на міцність алюмінієвих сплавів відзначається, в основному, в трьох випадках: в умовах недостатнього живлення виливка; при термочасовій обробці;

при високому ступені евтектичності сплаву. У першому випадку має місце заміна допустимою газовою пористістю більш шкідливих усадочних дефектів, у другому випадку накладається структурний фактор, а в третьому – сприятлива форма газових пор. Крім того, у всіх випадках при наводненні розплаву відбувається видалення найбільш великої фракції твердих неметалевих включень. У такій ситуації логічним буде припущення, що позитивний ефект є наслідком не газової пористості, а зазначених факторів, причому дії цих факторів виявилось достатньо для компенсації негативного впливу пористості. Якщо до того ж врахувати, що зафіксований в рідкісних випадках приріст міцності із зростанням газової пористості зазвичай не значний, то слід визнати, що застосування водневої обробки розплаву з утворенням газової пористості у виливках з нормальним живленням при твердінні з метою підвищення міцності литого металу недоцільно. Така обробка, можливо, буде мати сенс, якщо після неї проводити дегазацію розплаву, яка переслідує зниження газової пористості в виливку.

Список літератури

1. Гольцов В. А. История, идеология и перспективы водородной обработки материалов // Водородная обработка материалов. Часть 1. – Донецк: ДГТУ, 1995. – С. 7–14.
2. Borisov G. P., Kotlyarsky F. M. Hydrogen in technologies for aluminum alloys casting // Progress in Hydrogen Treatment of Materials. – Donetsk-Coral Gables, 2001. – P. 315–325.
3. Котлярский Ф. М. Водород в алюминиевых сплавах и отливках. – К.: Освіта України, 2011. – 208 с.
4. Курдюмов А. В., Инкин С. В., Чулков В. С., Графас Н. И. Флюсовая обработка и фильтрование алюминиевых расплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 196 с.
5. Opie W. R., Grant N. J. Hydrogen solubility in aluminium and some aluminium alloys // Transactions metallurgical Sostety AJME. – 1950. – Vol. 188. – № 10. – p. 1237.
6. Чернега Д. Ф., Бялик О. М., Шабас Э. Д., Погорелый В. Т. Изменение газонасыщенности сплава АЛ9 при плавке // Литейное производство. – 1967. – № 9. – С. 14–15.
7. Альтман М. Б., Готов Е. Б., Рябинина Р. М., Смирнова Т. И. Рафинирование алюминиевых сплавов в вакууме. – М.: Металлургия, 1970. – 160 с.
8. Чернега Д. Ф., Бялик О. М. Водород в литейных алюминиевых сплавах. – К.: Техника, 1972. – 145 с.
9. Добаткин В. И., Габидуллин Р. М., Колачев Б. А., Макаров Г. С. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах. – М.: Металлургия, 1976. – 263 с.
10. Альтман М. Б., Готов Е. Б., Засыпкин В. А., Макаров Г. С. Вакуумирование алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 240 с.
11. Практика производства отливок из алюминиевых сплавов // ЭИ ТОЛП. – 1982. – № 23. – серия 3. – С. 8–13.
12. Гольцов В. А., Стромская Н. П., Жежер В. Ф., Шкроб Т. П., Простова Н. И. Разработка унифицированной шкалы газовой пористости отливок из силуминов // Литейное производство. – 1986. – № 12. – С. 9–10.
13. Получение отливок с гарантированным уровнем качества // ЭИ ТОЛП. – 1987. – № 7. – серия 3. – С. 1–3.
14. Котлярский Ф. М. Процессы образования и методы снижения физической и химической неоднородности отливок из алюминий-кремниевых сплавов: дис. ... доктора техн. наук. – К.: ИПЛ АН УССР, 1991. – 444 с.
15. Тема НИР 1.6.5.452 «Исследование влияния водородного пересыщения расплава как самостоятельного фактора управления процессами формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов». – К.: ФТИМС НАН Украины, 2000. – 43 с.
16. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П., Белик В. И., Вернидуб А. Г. Влияние водородной обработки силуминовых расплавов на механические свойства отливок // Процессы литья. – 2004. – № 2. – С. 56–61.
17. Шабас Э. Д., Чернега Д. Ф. Производство крупногабаритных отливок из сплава ВАЛ5 // Прогрессивная технология литейного производства. – Горький: ВВКИ, 1969. – С. 360–363.
18. Ефимов В. А., Борисов Г. П., Абрамова В. П., Руденко Н. Г., Степанов О. М., Котлярский Ф. М. Влияние содержания неметаллических включений и газов на механические свойства сплавов типа силумин // Новое в литье с противодавлением. – София, БАН, 1978. – С. 66–71.
19. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 214 с.
20. Котлярский Ф. М. Комплексное влияние газонасыщенности расплава и интенсивности

- затвердевания на формирование и свойства отливок из алюминиевых сплавов в условиях бесприбыльного литья // Процессы литья. – 1994. – № 2. – С. 96–106.
21. *Котлярский Ф. М.* Формирование отливок из алюминиевых сплавов. – К.: Наукова думка, 1990. – 216 с.
 22. *Ващенко К. И., Чернега Д. Ф., Бялик О. М.* Влияние водорода на технологические свойства и качество отливок из алюминий-кремниевых сплавов // Прогрессивная технология литейного производства. – Горький: ВВКИ, 1969. – С. 337–340.
 23. *Фомин Б. А., Спасский А. Г.* Влияние газов на модифицирование заэвтектических силуминов // Литейное производство. – 1961. – № 4. – С. 24.
 24. *Белов В. Д.* О комплексной обработке и формировании структуры поршневых заэвтектических силуминов // Изв. вузов. цв. мет. – 1998. – № 4. – С. 29–32.
 25. *Абрамов А. А.* Водород в литейных алюминиевых сплавах // Сб. ВОР. Серия 16. – 1984. – вып. 1.
 26. *Колачев Б. А.* Водородная хрупкость алюминиевых сплавов и методы ее предупреждения // Технология легких сплавов (ВИЛС). – 1994. – № 5–6. – С. 19–28.
 27. Влияние пористости на усталостные характеристики различных отливок / L. E. Björkerger и др. (Швеция) // Доклад на 60-м Международном Конгрессе литейщиков, Гаага. – 1993.
 28. *Абрамов А. А., Зелов В. Б.* Водород в литейных алюминиевых сплавах // Литейное производство. – 1984. – № 1. – С. 10–12.
 29. *Коротков В. Г.* Рафинирование алюминиевых сплавов высококриолитными флюсами // Прогрессивная технология литейного производства. – Горький: ВВКИ, 1969. – С. 352–355.
 30. *Рыжиков А. А., Корякин Г. И., Ярославцев О. И., Маслов П. Н.* Разработка и внедрение процесса внепечного рафинирования сплава АЛ30 жидкими флюсами // Прогрессивная технология литейного производства. – Горький: ВВКИ, 1969. – С. 332–336.
 31. *Андреев А. Д.* О повышении качества слитков алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов (ВИЛС). – 1966. – № 6. – С. 48–53.
 32. *Колачев Б. А., Габидуллин Р. М., Кравченко В. Е.* Водородная хрупкость алюминиевых сплавов // Легирование и обработка легких сплавов. – М.: Наука, 1981. – С. 126–133.
 33. *Швецов И. В., Швецова Г. Б., Елагин В. И., Колачев Б. А.* Влияние водорода на структуру и механические свойства слитков из сплава АК8 // Газы в легких металлах. Труды МАТИ. – 1970. – № 71. – С. 58–67.
 34. *Афанасьев В. К., Попова М. В., Прудников А. Н., Зезиков М. В., Горшенин А. В.* Водород-легирующий элемент алюминиевых сплавов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 36–39.
 35. *Клевцов Г. В.* Влияние способов литья на структуру и усталостную прочность алюминиевого сплава ВАЛ8 // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 1990. – № 5. – С. 96–102.
 36. *Макаров Г. С.* Рафинирование алюминиевых сплавов газами. – М.: Металлургия, 1983. – 119 с.
 37. *Липчин Т. Н.* Эффективность упрочнения сплавов при кристаллизации под давлением // Литейное производство. – 1985. – № 3. – С. 13–15.
 38. *Засыпкин В. А., Ручьева Н. В.* Внутренние дефекты в алюминиевых деформированных полуфабрикатах // Алюминиевые сплавы. Вып. 5. Конструкционные сплавы. – М.: Металлургия, 1968. – С. 5–8.
 39. Литье легких сплавов в песчаные формы и в кокиль // ЭИ ТОЛП. – 1988. – № 7. – серия 3. – С. 4–18.
 40. *Мерфи А. Дж.* Плавка и литье цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1959. – 646 с.
 41. *Афанасьев В. К.* Об особенностях изменения свойств силуминов после нагрева в интервале 200–300 °С // Закономерности формирования структуры сплавов эвтектического типа. Часть II. – Днепропетровск: ДМетИ, 1986. – С. 86–87.
 42. *Абрамов А. А.* Влияние содержания водорода в расплаве перед кристаллизацией на механические и эксплуатационные свойства высокопрочных литейных алюминиевых сплавов // Высокопрочные цветные сплавы и прогрессивные методы производства отливок. – М.: МДНТП, 1983. – С. 12.
 43. *Побежимов П. П., Нефедова Л. П., Белов Е. В.* Металлургия коррозионностойких алюминиевых сплавов и отливок. – М.: Металлургия, 1989. – 152 с.
 44. *Абрамов А. А., Зелов В. Б.* Влияние водорода на плотность и герметичность алюминиевых литейных сплавов // Современные методы обеспечения высокого качества отливок. – Л.: ЛДНТП, 1977. – С. 82.

45. Иванов В. П. Влияние малых добавок лития на газосодержание и механические свойства алюминия // Изв. вузов. цв. мет. – 1971. – № 3. – С. 118–121.
46. Габидуллин Р. М., Засыпкин В. А., Юшин В. Д., Титов В. Н. О распределении водорода в металле при кристаллизации // Алюминиевые сплавы. Конструкционные материалы. – М.: Металлургия, 1968. – Вып. 5. – С. 14–21.
47. Афанасьев В. К., Попова М. В. Применение водорода для получения необходимых свойств алюминиевых сплавов // Водородная обработка материалов: «ВОМ–2004». – Донецк, Дон НТУ, 2004. – С. 243–245.
48. Афанасьев В. К., Никитин В. И. Структура и свойства алюминиевых сплавов в зависимости от условий подготовки шихтовых материалов // Литейное производство. – 1976. – № 4. – С. 16–17.
49. Афанасьев В. К., Прудников А. Н. Влияние деформации в твердожидком состоянии и наводороживания шихты на свойства отливок из алюминиевых сплавов // Литейное производство. – 1988. – № 9. – С. 12–13.
50. Никитин В. И. Наследственность в литейных сплавах. – Самара, СГТУ, 1995. – 248 с.
51. Афанасьев В. К., Афанасьева И. Н., Попова М. В. Водород и свойства сплавов алюминия с кремнием. – Абакан: Хакасское кн. изд-во, 1998. – 192 с.
52. Попова М. В. Легирование силуминов водородом, фосфором и фтором для получения сплавов с малым тепловым расширением // Металлургия машиностроения. – 2002. – № 6 (9). – С. 30–32.
53. Прудников А. Н., Спрукуль Г. И., Сушкова И. А. Влияние легирования и обработки расплава на свойства отливок из эвтектических и заэвтектических силуминов // Закономерности формирования структуры сплавов эвтектического типа. – Днепропетровск: ДМЕТИ, 1986. – С. 259–260.
54. Технология приготовления заэвтектических силуминов / Федотов В. М. // Технол. сер. ресурсосберег. процессы, оборуд., матер. – 1994. – № 1–2. – С. 68–71.
55. Borbe P. C., Erdmann-Jesnitzer F., Schoebel W. Beitrag zum Wasserstoffeinfluß auf das Zeitstandsverhalten von Aluminium-Lickel-Legierungen // Aluminium (BRD). – 1983. – Vol. 59. – № 4. – pp. 271–276.
56. Альтман М. Б. Неметаллические включения в алюминиевых сплавах. – М.: Металлургия, 1964. – 127 с.
57. Крупман Л. И., Онопченко В. М., Комаров А. А., Щербаков А. И. Литье сплавов алюминия с охлаждением струи жидкой средой // Технология легких сплавов (ВИЛС). – 1973. – № 12. – С. 29–32.
58. Крушенко Г. Г., Василенко З. А. Плотность и механические свойства силуминов, термически обработанных в жидком состоянии // Расплавы. – 1988. – № 6. – С. 67–69.
59. Пластинин В. А. Получение алюминиевого литья в кокиль с применением вакуума // Прогрессивная технология литейного производства. – Горький: ВВКИ, 1969. – С. 466–469.
60. Дорофеев А. В., Килин А. Б., Тertiшников А. С. Обработка алюминиевых расплавов электротокком // Литейщик России. – 2002. – № 2. – С. 19–21.
61. Шаповалов В. И. Литые пористые сплавы: производство, структура, свойства и применение // Металл и литье Украины. – 1995. – № 2. – С. 2–10.
62. Sonsino C. M., Dietrich K. Einfluß der Porosität auf das Schwing-festigkeitsverhalten von Aluminium-Gußwerkstoffen-Teil 1 // Giesser. Forsch. – 1991. – Vol. 43. – № 3. – С. 119–130.
63. Ачимович З. С., Томович М. Н., Томович С. М., Джуричич М. Р. Качество отливок из силумина, полученных литьем по газифицируемым моделям // Литейное производство. – 1994. – № 12. – С. 18–19.
64. Котлярский Ф. М. Теоретические предпосылки формирования усадочных и газовых дефектов в непропитываемых узлах отливки // Литейное производство. – 1983. – № 7. – С. 22–24.
65. Котлярский Ф. М., Белик В. И. Качество отливки после термовременной обработки алюминиево-кремниевых расплавов // Литейное производство. – 1985. – № 6. – С. 9–11.

Поступила 25.09.2019

References

1. *Goltsov, V. A.* (1995) History, ideology and prospects of hydrogen processing of materials. *Vodorodnaya obrabotka materialov. Chast 1.* Donetsk: DGTU, pp. 7–14 [in Russian].
2. *Borisov, G. P., Kotlyarskiy, F. M.* (2001) Hydrogen in technologies for aluminum alloys casting. *Progress in Hydrogen Treatment of Materials.* Donetsk-Coral Gables, pp. 315–325 [in English].
3. *Kotlyarskiy, F. M.* (2011) Hydrogen in aluminum alloys and castings. K.: Osvita Ukrainy, 208 p. [in Russian].
4. *Kurdyumov, A. V., Inkin, S. V., Chulkov, V. S., Grafas, N. I.* (1980) Flux processing and filtering of aluminum melts. Moscow: Metallurgiya, 196 p. [in Russian].
5. *Opie, W. R., Grant, N. J.* (1950) Hydrogen solubility in aluminium and some aluminium alloys. *Transactions metallurgical Society AJME*, vol. 188, no. 10, p. 1237 [in English].
6. *Chernega, D. F., Byalik, O. M., Shabas, E. D., Pogorelyy, V. T.* (1967) Change in gas saturation of the AL9 alloy during melting. *Liteynoe proizvodstvo*, no. 9, pp. 14–15 [in Russian].
7. *Altman, M. B., Glotov, Ye. B., Ryabinina, R. M., Smirnova, T. I.* (1970) Vacuum refining of aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya, 160 p. [in Russian].
8. *Chernega, D. F., Byalik, O. M.* (1972) Hydrogen in cast aluminum alloys. K.: Tekhnika, 145 p. [in Russian].
9. *Dobatkin, V. I., Gabidullin, R. M., Kolachev, B. A., Makarov, G. S.* (1976) Gases and oxides in aluminum deformable alloys. Moscow: Metallurgiya, 263 p. [in Russian].
10. *Altman, M. B., Glotov, Ye. B., Zasytkin, V. A., Makarov, G. S.* (1977) Evacuation of aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya, 240 p. [in Russian].
11. Practice for the production of castings from aluminum alloys (1982) *EI TOLP*, no. 23, ser. 3, pp. 8–13 [in Russian].
12. *Goltsev, V. A., Stromskaya, N. P., Zhezher, V. F., Shkrob, T. P., Prostova, N. I.* (1986) Development of a unified scale of gas porosity of castings from silumins. *Liteynoe proizvodstvo*, no. 12, pp. 9–10 [in Russian].
13. Obtaining castings with a guaranteed level of quality (1987) *EI TOLP*, no. 7, ser. 3, pp. 1–3 [in Russian].
14. *Kotlyarskiy, F. M.* (1991) Formation processes and methods for reducing the physical and chemical heterogeneity of castings from aluminum-silicon alloys: Doctor's thesis. K.: IPL AN USSR, 444 p. [in Russian].
15. Tema NIR 1.6.5.452 (2000) Investigation of the effect of hydrogen melt supersaturation as an independent factor in controlling the processes of formation of the structure and properties of aluminum alloys. K.: PTIMA NANU, 43 p. [in Russian].
16. *Kotlyarskiy, F. M., Borisov, G. P., Belik, V. I., Vernidub, A. G.* (2004) The effect of hydrogen treatment of silumine melts on the mechanical properties of castings. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 56–61 [in Russian].
17. *Shabas, E. D., Chernega, D. F.* (1969) Production of large castings from BA15 alloy. *Progressivnaya tekhnologiya liteynogo proizvodstva*, Gorkiy: VVKI, pp. 360–363 [in Russian].
18. *Yefimov, V. A., Borisov, G. P., Abramova, V. P., Rudenko, N. G., Stepanov, O. M., Kotlyarskiy, F. M.* (1978) The effect of non-metallic inclusions and gases on the mechanical properties of silumin-type alloys. *Novoe v lite s protivodavleniem*, Sofiya, BAN, pp. 66–71 [in Russian].
19. *Gulyaev, B. B.* (1976) Theory of foundry processes. L.: Mashinostroenie, 214 p. [in Russian].
20. *Kotlyarskiy, F. M.* (1994) The complex effect of the gas saturation of the melt and the intensity of solidification on the formation and properties of castings from aluminum alloys in the conditions of non-profit casting. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 96–106 [in Russian].
21. *Kotlyarskiy, F. M.* (1990) The formation of castings from aluminum alloys. K.: Naukova dumka, 216 p. [in Russian].
22. *Vashchenko, K. I., Chernega, D. F., Byalik, O. M.* (1969) The effect of hydrogen on the technological properties and quality of castings from aluminum-silicon alloys. *Progressive foundry technology*, Gorky: VVKI, pp. 337–340 [in Russian].
23. *Fomin, B. A., Spasskiy, A. G.* (1961) The effect of gases on the modification of hypereutectic silumins. *Liteynoe proizvodstvo*, no. 4, pp. 24 [in Russian].
24. *Belov, V. D.* (1998) On the integrated processing and formation of the structure of piston hypereutectic silumins. *Izv. vuzov. tsv. met.*, no. 4, pp. 29–32 [in Russian].
25. *Abramov, A. A.* (1984) Hydrogen in cast aluminum alloys. *Sb. VOT. Seriya 16*, vyp. 1 [in Russian].
26. *Kolachev, B. A.* (1994) Hydrogen brittleness of aluminum alloys and methods for its prevention. *Tekhnologiya legkikh splavov (VILS)*, no. 5–6, pp. 19–28 [in Russian].

27. Björkerger, L. E. et al. (1993) The effect of porosity on the fatigue characteristics of various castings. Doklad na 60-m Mezhdunarodnom Kongresse lityeshchikov, Gaaga [in English].
28. Abramov, A. A., Zelov, V. B. (1984) Hydrogen in cast aluminum alloys. Liteynoe proizvodstvo, no. 1, pp. 10–12 [in Russian].
29. Korotkov, V. G. (1969) Refining aluminum alloys with high cryolite fluxes. Progressivnaya tekhnologiya lityynogo proizvodstva, Gorkiy: VVKI, pp. 352–355 [in Russian].
30. Ryzhikov, A. A., Koryakin, G. I., Yaroslavtsev, O. I., Maslov, P. N. (1969) Development and implementation of the out-of-furnace refining process of the AL30 alloy with liquid fluxes. Progressivnaya tekhnologiya lityynogo proizvodstva, Gorkiy: VVKI, pp. 332–336 [in Russian].
31. Andreev, A. D. (1966) On improving the quality of aluminum alloy ingots. Light alloy technology (VILS), no. 6, pp. 48–53 [in Russian].
32. Kolachev, B. A., Gabidullin, R. M., Kravchenko, V. Ye. (1981) The hydrogen brittleness of aluminum alloys. Legirovanie i obrabotka legkikh splavov, Moscow: Nauka, pp. 126–133 [in Russian].
33. Shvetsov, I. V., Shvetsova, G. B., Yelagin, V. I., Kolachev, B. A. (1970) The effect of hydrogen on the structure and mechanical properties of ingots from AK8 alloy. Gazy v legkikh metallakh, Trudy MATI, no. 71, pp. 58–67 [in Russian].
34. Afanasev, V. K., Popova, M. V., Prudnikov, A. N., Zezikov, M. V., Gorshenin, A. V. (2005) Hydrogen-alloying element of aluminum alloys. Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya, no. 6, pp. 36–39 [in Russian].
35. Klevtsov, G. V. (1990) The influence of casting methods on the structure and fatigue strength of BAJ18 aluminum alloy. Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya, no. 5, pp. 96–102 [in Russian].
36. Makarov, G. S. (1983) Gas refining of aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya, 119 p. [in Russian].
37. Lipchin, T. N. (1985) Efficiency of hardening alloys during crystallization under pressure. Liteynoe proizvodstvo, no. 3, pp. 13–15 [in Russian].
38. Zasyrkin, V. A., Rucheveva, N. V. (1968) Internal defects in deformed aluminum semi-finished products. Alyuminievye splavy. Vyp. 5. Konstruktsionnye splavy, Moscow: Metallurgiya, pp. 5–8 [in Russian].
39. Sand casting and chill casting (1988) EI TOLP, no. 7, seriya 3, pp. 4–18 [in Russian].
40. Merfi, A. Dzh. (1959) Smelting and casting of non-ferrous metals and alloys. Moscow: Metallurgizdat, 646 p. [in Russian].
41. Afanasev, V. K. (1986) On the features of changes in the properties of silumins after heating in the range of 200–300 °C. Zakonomernosti formirovaniya struktury splavov evtekticheskogo tipa. Chast II. Dnepropetrovsk: DMetl, pp. 86–87 [in Russian].
42. Abramov, A. A. (1983) The effect of hydrogen content in the melt before crystallization on the mechanical and operational properties of high-strength cast aluminum alloys. Vysokoprochnye tsvetnye splavy i progressivnye metody proizvodstva otlivok, Moscow: MDNTP, p. 12 [in Russian].
43. Pobezhimov, P. P., Nefedova, L. P., Belov, Ye. V. (1989) Metallurgy of corrosion-resistant aluminum alloys and castings. Moscow: Metallurgiya, 152 p. [in Russian].
44. Abramov, A. A., Zelov, V. B. (1977) The effect of hydrogen on the density and tightness of aluminum cast alloys. Sovremennye metody obespecheniya vysokogo kachestva otlivok, L.: LDNTP, p. 82 [in Russian].
45. Ivanov, V. P. (1971) The effect of small lithium additives on the gas content and mechanical properties of aluminum. Izv. vuzov. tsv. met., no. 3, pp. 118–121 [in Russian].
46. Gabidullin, R. M., Zasyrkin, V. A., Yushin, V. D., Titov, V. N. (1968) On the distribution of hydrogen in a metal during crystallization. Alyuminievye splavy. Konstruktsionnye materialy. Moscow: Metallurgiya, Vyp. 5, pp. 14–21 [in Russian].
47. Afanasev, V. K., Popova, M. V. (2004) The use of hydrogen to obtain the necessary properties of aluminum alloys. Vodorodnaya obrabotka materialov: «VOM–2004», Donetsk, Don NTU, pp. 243–245 [in Russian].
48. Afanasev, V. K., Nikitin, V. I. (1976) The structure and properties of aluminum alloys depending on the conditions for the preparation of charge materials. Liteynoe proizvodstvo, no. 4, pp. 16–17 [in Russian].
49. Afanasev, V. K., Prudnikov, A. N. (1988) Effect of solid-liquid deformation and charge hydrogenation on the properties of castings from aluminum alloys. Liteynoe proizvodstvo, no. 9, pp. 12–13 [in Russian].
50. Nikitin, V. I. (1995) Inheritance in cast alloys. Samara, SGTU, 248 p. [in Russian].
51. Afanasev, V. K., Afanaseva, I. N., Popova, M. V. (1998) Hydrogen and properties of aluminum-silicon alloys, Abakan: Khakasskoe kn. izd-vo, 192 p. [in Russian].
52. Popova, M. V. (2002) Doping silumins with hydrogen, phosphorus and fluorine to obtain alloys with low thermal expansion. Metallurgiya mashinostroeniya, no. 6 (9), pp. 30–32 [in Russian].
53. Prudnikov, A. N., Sprukul, G. I., Sushkova, I. A. (1986) The influence of alloying and melt

- processing on the properties of castings from eutectic and hypereutectic silumins. *Zakonomernosti formirovaniya struktury spлавov evtekticheskogo tipa*, Dnepropetrovsk: DMYeTI, pp. 259–260 [in Russian].
54. Fedotov, V. M. (1994) The technology of preparation of hypereutectic silumins. *Tekhnol. ser. resursosberg. protsessy, oborud., mater.*, no. 1–2, pp. 68–71 [in Russian].
 55. Borbe, P. C., Erdmann-Jesnitzer, F., Schoebel, W. (1983) Beitrag zum Wasserstoffeinfluß auf das Zeitstandsverhalten von Aluminium-Lickel-Legierungen. *Aluminium (BRD)*, Vol. 59, no. 4, pp. 271–276 [in German].
 56. Altman, M. B. (1964) Non-metallic inclusions in aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya, 127 p. [in Russian].
 57. Krupman, L. I., Onopchenko, V. M., Komarov, A. A., Shcherbakov, A. I. (1973) Liquid alloy casting of aluminum alloys. *Tekhnologiya legkikh spлавov (VLS)*, no. 12, pp. 29–32 [in Russian].
 58. Krushenko, G. G., Vasilenko, Z. A. (1988) Density and mechanical properties of silumin thermally processed in a liquid state. *Rasplavy*, no. 6, pp. 67–69 [in Russian].
 59. Plastinin, V. A. (1969) Getting aluminum die casting using vacuum. *Progressivnaya tekhnologiya liteynogo proizvodstva*, Gorkiy: VVKI, pp. 466–469 [in Russian].
 60. Dorofeev, A. V., Kilin, A. B., Tertishnikov, A. S. (2002) Processing of aluminum melts by electric current. *Liteyshchik Rossii*, no. 2, pp. 19–21 [in Russian].
 61. Shapovalov, V. I. (1995) Cast porous alloys: production, structure, properties and application. *Metall i lite Ukrainy*, no. 2, pp. 2–10 [in Russian].
 62. Sonsino, C. M., Dietrich, K. (1991) Einfluß der Porosität auf das Schwing-festigkeitsverhalten von Aluminium-Gußwerkstoffen-Teil 1. *Giesser. Forsch.*, Vol. 43, no. 3, pp. 119–130 [in German].
 63. Achimovich, Z. S., Tomovich, M. N., Tomovich, S. M., Dzhurichich, M. R. (1994) Quality of castings from silumin obtained by casting according to gasified models. *Liteynoe proizvodstvo*, no. 12, pp. 18–19 [in Russian].
 64. Kotlyarskyi, F. M. (1983) Theoretical background of the formation of shrinkage and gas defects in non-impregnated casting units. *Liteynoe proizvodstvo*, no. 7, pp. 22–24 [in Russian].
 65. Kotlyarskyi, F. M., Belik, V. I. (1985) Casting quality after thermal processing of aluminum-silicon melts. *Liteynoe proizvodstvo*, no. 6, pp. 9–11 [in Russian].

Received 25.09.2019

Ф. М. Котлярский, *д-р техн. наук, ст. науч. сотр.*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины (Киев, Украина)

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЛИЯНИИ ВОДОРОДА НА СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ. Сообщение 1

В представленном литературном обзоре в хронологическом порядке изложено развитие двойственного влияния водорода на формирование и качество отливок из алюминиевых сплавов и, соответственно, неоднозначного отношения к нему со стороны ученых и практиков – литейщиков. До середины прошлого века бытовало единодушное мнение, что водород является очень вредной примесью, причиной различных видов брака, снижения выхода годного и ухудшения экономических показателей производства, поэтому необходимо максимально снижать его содержание в слитках и фасонных отливках. Однако исследованиями, выполненными в последующие годы, доказано, что использование растворенного в алюминиевых сплавах водорода в качестве легирующего или модифицирующего элемента позволяет значительно упрочнить ряд сплавов в деформированном состоянии при сохранении удовлетворительной пластичности, впервые обеспечить возможность холодной пластической деформации заэвтектических силуминов. Особо важную роль играет водород в формировании сложных фасонных отливок с металлоемкими узлами, питание которых с целью устранения концентрированных усадочных раковин и утяжин требует увеличения количества прибылей, технологических напусков и уклонов, то есть больших непроизводительных расходов расплава, что экономически не выгодно. В то же время, повышение содержания водорода в расплавах позволяет заменить браконосные усадочные дефекты допустимой рассредоточенной газовой микропористостью, сохраняя конфигурацию отливки близкой к чертежу детали и повышая герметичность металлоемких узлов. Кроме того, общепризнано положительное влияние водородной пористости на повышение трещиностойчивости и снижение горячеломкости. При этом механические свойства остаются на уровне предъявляемых требований. В практическом плане заслуживает внимания водородное рафинирование

алюминиевых сплавов, как самый дешевый, экологически чистый метод рафинирования, в отличие от других обеспечивающий избирательное удаление наиболее крупной фракции твердых включений, оставляя мелкие для выполнения роли зародышей кристаллов. При этом методе плавка предварительно наводороженных шихтовых материалов превращается из традиционно загрязняющей расплав в рафинирующую. В обзор включены последние разработки ФТИМС НАН Украины, в которых впервые дан ответ на вопрос: если в одних организациях (ВИЛС, МАТИ) барботажная обработка расплава водяным паром используется для загрязнения (в исследовательских целях) включениями Al_2O_3 , а в других (ФТИМС НАН Украины) с помощью этой же операции удаляют избирательно наиболее крупную фракцию тех же включений, то что происходит в действительности?; раскрыт механизм замены газовой пористости усадочной раковины при автоклаве литье и литье под низким давлением; изучены свойства пористого металла, что важно для оценки эксплуатационного состояния непропитываемых узлов отливок с пористым строением; встречающиеся случаи локального нарушения герметичности в зоне газовой пористости; водородная пористость – индикатор содержания в расплаве включений Al_2O_3 с возможностью использования результатов анализа по ходу плавки; водород как составная часть структуры жидкого состояния; совмещение наводороживания с другими видами обработки расплава.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, литье, водород, двойственное влияние, модификатор, рафинирование, экономика.

F. M. Korlyarskiy, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher
Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

EXISTING IDEALS ABOUT THE INFLUENCE OF HYDROGEN ON THE PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOYS. Report 1

The presented literature review chronologically describes the development of the double influence of hydrogen on the formation and quality of castings of aluminum alloys and, accordingly, the ambiguous treatment of it by scientists and foundry men. Until the middle of the last century, there was a unanimous opinion that hydrogen is a very harmful impurity, the cause of various types of defect, a decrease in the yield of suitable and worsening economic indicators of production, so it is necessary to minimize its content in ingots and shaped castings. However, studies carried out in the following years have shown that the use of dissolved hydrogen in aluminum alloys as an alloying or modifying element can significantly strengthen a number of alloys in the deformed state while maintaining a satisfactory plasticity, for the first time to provide the possibility of cold plastic deformation of eutectic silumin. Hydrogen plays a particularly important role in the formation of complex shaped castings with metal nodes, the feeding of which, in order to eliminate concentrated shells and weights, requires an increase in the number of overlaps, technological overlaps and slopes with high unproductive costs of liquid metal, which is not economically profitable. At the same time, increasing the content of hydrogen in the melt allows you to replace the malignant shrinkage defects with a permissible dispersed gas microporosity, keeping the configuration of the casting close to the parts drawing and improving the tightness of metal-intensive units. In addition, the generally recognized positive effect of hydrogen porosity on increasing fracture toughness and reducing heat brittleness. The mechanical properties remain at the level of operational requirements. In practical terms, hydrogen refining of aluminum alloys deserves attention as the cheapest environmentally friendly refining method which, unlike other methods, provides for the selective removal of the largest fraction of solid inclusions, leaving small ones to play the role of embryo crystals. In this method, the melting of pre-flooded charge materials is transformed from a traditionally polluting melt into a refinery. The review includes the latest developments of the PTIMA of the NAS of Ukraine, which first answered the question: if in some organizations (VILS, MATI) bubbling melt water treatment is used for contamination (for research purposes) by Al_2O_3 inclusions, and in others (PTIMA of the NAS of Ukraine) using the same operation selectively remove the largest fraction of the same inclusions, so what really happens?; mechanism for replacement of gas porosity by shrinkage at autoclave and low-pressure casting is disclosed; the properties of porous metal are studied, which is important for the evaluation of the operational state of metal capacitive nodes of castings with a porous structure; cases of local leakage in the gas porosity zone; hydrogen porosity - an indicator of the content in the melt of Al_2O_3 inclusions with the possibility of using the results of the analysis in the course of melting; hydrogen as part of the liquid state structure; combining flooding with other types of melt treatment.

Keywords: aluminum alloys, casting, hydrogen, dual influence, modifier, refining, economy.