

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 2

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 одноставна 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, загально визнаний позитивний вплив водневої пористості на підвищення тріщиностійкості та зниження жарочеламкості. 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 розплави 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 розплави водяною парою використовується для забруднення (в дослідних цілях) включеннями  $Al_2O_3$ , а в інших (ФТІМС НАН України) за допомогою тієї ж операції видаляють вибіркоче 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 розплави.

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

Більш складним є вплив водневої пористості на пластичність алюмінієвих сплавів. Тут працюють ті ж самі фактори, викладені в повідомленні 1 відносно міцності, однак позитивний ефект, особливо для сплавів, близьких за складом до евтектики, більш вагомий і зустрічається він більш часто. У той же час немає однозначної відповіді на питання, чому у низці випадків з підвищенням водневої пористості зростає і відносно подовження. На підставі цих даних можна рекомендувати водневу обробку приєвтектичних силумінів з утворенням газової пористості у виливках для підвищення пластичності литого металу незалежно від умов живлення при твердінні.

*Вплив водневої пористості на інші властивості алюмінієвих сплавів. Тріщиностійкість і гарячеламкість.* У 1954 р. Мерфі А. Дж. [40] повідомив, що при виробництві легких сплавів нерідко практикується умисне введення деякої кількості газів в розплав з метою зниження тріщиноутворення при литті в металеві форми. Цей ефект краще проявляється у сплавів з більш високим ступенем евтектичності. А в 1963 р. Н. Г. Гиршович зі співавторами [66] при дослідженні газонасичених і рафінованих сплавів АЛ2, А8 і алюмінію АВ000 встановили, що передусадкове розширення викликане газовою пористістю, а причина зниження лінійної усадки при збільшенні газовмісту в тому, що чим вище газовміст, тим із більш низьких температур починається усадка і, отже, тим меншу кінцеву величину вона матиме при однаковому коефіцієнті лінійної усадки.

Ще через три роки з'явилася широко відома в колі фахівців монографія І. І. Новікова [67] з великим експериментальним матеріалом у тому ж напрямку. Багато разів доведено, що підвищення газонасичення сплавів завдяки передусадковому розширенню та зменшенню усадки в інтервалі кристалізації різко скорочує або навіть усуває утворення гарячих тріщин. У жодного з досліджених алюмінієвих сплавів не спостерігалось погіршення гарячеламкості після обробки їх водяною парою. У більшості випадків досягався позитивний результат. Цей ефект також відзначений у роботах [8, 68–71] і ще в 1954 р. успішно використаний на одному із зарубіжних заводів [72].

Згаданим передусадковим розширенням займалося багато дослідників, проте механізм і оцінка цього явища сприймаються неоднозначно\*. Тому автор монографії [3], проаналізувавши існуючі думки, спробував узагальнити їх в альтернативне пояснення. Перегрій розплав у вузькій області, безпосередньо дотичній зі стінками форми, швидко втрачає теплоту перегріву і різко переохолоджується. Відбувається зародження кристалів на активних домішках. Якийсь час ці кристали не встигають зростися, а водень, що виділяється на їх поверхні, утворює міжкристалітну пористість, яка і розсовує кристали, створюючи передусадкове розширення. Чим більший вміст водню в розплаві, тим товщий шар міжкристалітної пористості і тим більше передусадкове розширення. Однак стінка форми перешкоджає цьому розширенню, тому поверхневий шар вилівка, що розглядається, утворює гофри, які, вирівнюючись в процесі подальшого розтягування твердо-рідкої або затверділої кірки при утрудненій усадці, створюють передумови зниження гарячеламкості і підвищення тріщиностійкості вилівка.

*Герметичність.* У 1969 р. В. А. Пластинін [59] отримувал литтям в кокіл герметичні виливки з алюмінієвих сплавів без використання надливів. Мета була досягнута наводненням розплаву хлористим амонієм і вакуумуванням вилівка в процесі кристалізації. У 1972 р. Н. С. Постніков [73] при вивченні взаємозв'язку щільності та герметичності прийшов до висновку, що щільність сплаву не може служити критерієм оцінки герметичності. На підтвердження наведено приклад, коли менш щільний сплав АЛ21 виявився більш герметичним, ніж сплав АЛ19, що володіє кращою щільністю. Аналізуючи особливості будови ураженого газовою пористістю металу, автор вказує, що навіть при відносно великих розмірах відокремлених дефектів (близько 1 мм) найтонші перегородки перешкоджають витіканню. Практично негерметичність

\*Тимофеев Г. И. Механика сплавов при кристаллизации слитков и отливок. – М.: Металлургия, 1977. – 160 с.

## Одержання та обробка металів

може виникнути тільки при наскрізному дефекті більше 1 мкм. Розрахунки показують, що при гідротиску 50 ат виливок стає негерметичним, якщо більше третини стінки завтовшки 4 мм складатиметься з пор, включень, раковин і т. п. Однак, оскільки газові пори, особливо в тонкостінному литті, розташовуються ізольовано одна від одної і рідко послаблюють перетин на таку значну величину, вони не надають вирішального впливу на герметичність. І. І. Новиков [67] також відзначає випадки, коли щільні виливки з різних сплавів суцільно уражаються тріщинами, що порушують герметичність литого виробу, а пористі виливки з тих же сплавів виходять без тріщин.

Ф. М. Котлярський зі співавторами повторили експерименти В.А. Пластиніна, керуючи об'ємом і характером пористості в безнадливому циліндричному виливку із наводненого розплаву зміною інтенсивності твердіння [20], вакууму [74] і тиску [75]. В результаті [76] зроблено висновок, що головною умовою досягнення оптимальних результатів (в тому числі стовідсоткової герметичності) є перевід розплаву безнадливого виливка в процесі його кристалізації в газопересичений стан для повної компенсації усадки твердіння розсередженою газовою пористістю. В тепловому плані реалізації цієї умови найкращим чином задовольняють низькі швидкості охолодження (коефіцієнт твердіння 0,5–0,7 мм/с<sup>0.5</sup>). Що ж стосується силових режимів, то для різних сплавів вони різні. Так, наприклад, для вторинного сплаву АК5М2 доцільно використовувати автоклавне лиття (0,5 МПа) зі зняттям надлишкового тиску після утворення по всьому перетину виливка зв'язаного кристалічного каркаса. Для сплаву СИЛ-0, навпаки, заливку і початкову стадію кристалізації виливка краще здійснювати при атмосферному тиску, а після утворення суцільного кристалічного каркаса створювати розрідження до залишкового тиску ~ 0,015 МПа при звичайному газовмісті розплаву і до ~ 0,06 МПа – після спеціального наводнення.

У роботах [14, 77, 78] експериментальним шляхом доведена доцільність водневої обробки розплаву для підвищення герметичності непросочуваних вузлів виливків. Кращі результати виходять при литті в гарячий кокіль (до 400 °С) силумінів, близьких за складом до евтектики.

*Утяжини.* Дослідники давно (принаймні в середині минулого століття) помітили, що ці дефекти властиві дегазованим сплавам [68, 79–81]. Чим більше вміст газу в металі, тим менш імовірна деформація поверхні виливка із-за недостатнього живлення [72, 81, 82]. Підтверджено це і більш пізніми роботами фахівців Японії [83] і України (ФТІМС НАН України) [14, 78, 84–86]. За даними роботи [85], для всіх силумінів характерно зниження обсягу утяжин при підвищенні газонасичення розплаву (табл. 4), але максимальний ефект спостерігався у доевтектичного сплаву, який до водневої обробки розплаву виявляв найбільшу схильність до утворення утяжин. Дослідження виконані на технологічній пробі у вигляді циліндра діаметром 90 мм, сполученого з надливом живильником діаметром 32 мм. Зниження інтенсивності затвердіння істотно сприяє усуненню цього дефекту [14, 78, 86]. Таким чином, при заливці сплаву Al+6%Si в ту ж технологічну пробу при температурі кокіля 400 °С утяжини не утворюються навіть при звичайному вмісті водню (без водневої обробки) [14].

**Таблиця 4**  
**Вплив водню на утяжку силумінових виливків в залежності від вмісту кремнію**

Вміст водню, см <sup>3</sup> /100 г	Об'єм утяжин в см <sup>3</sup> при вмісті Si в %			
	0	6	11,5	15
0,2–0,3	0,93	2,54	0,93	0,83
0,8–1,1	0,90	0,86	0,52	0,45

У низці випадків, в тому числі в останній роботі [14], виникали ситуації, коли після наводнення розплаву, наприклад, за допомогою термочасової обробки (перегрів до температури 1050 °С, годинна витримка в атмосфері водяної пари, швидке охолодження до 750 °С) і заливки в холодний кокіль об'єм утяжини на технологічній пробі зі сплаву Al+6%Si не зменшився, а збільшився. Це явище, очевидно, має загальну природу з іншим явищем, коли газова пористість виливків після наводнення розплаву знижується [87]. Ці ситуації, які здаються парадоксальними, автори обох робіт пояснюють тим, що в процесі водневої обробки з розплаву видалялися неметалеві включення, дрібніші наявних у вихідному, тому при кристалізації необробленого розплаву газовій бульбашці простіше утворитися на великому включенні при вихідному вмісті водню, ніж в обробленому – на більш дрібному включенні навіть при більшому вмісті водню. Однак з підвищенням температури кокіля (в роботі [14]) або товщини виливка (в роботі [87]) через уповільнення процесу кристалізації кількість газу, що виділяється з наводненого розплаву, збільшується порівняно з необробленим розплавом, тому збільшується і газова пористість, а об'єм утворюваних утяжин зменшується.

*Заміна внутрішніх усадкових дефектів.* Усадкові дефекти типу концентрованих раковин, тріщин, рихлот є наслідком недостатнього живлення виливка. Досить організувати необхідну для даного сплаву спрямованість затвердіння, збільшити кількість і масу надливів, і зазначені дефекти будуть усунені. Однак таке рішення не завжди вигідно з економічної точки зору. Для багатьох виливків простіше і дешевше замінити браконосні усадкові дефекти допустимою газовою пористістю при тому ж дефіциті живлення. Ще в 1954 р. англійськими фахівцями з модифікації алюмінієвих сплавів, згідно повідомленню в монографії під редакцією Мерфі А. Дж. (російський переклад [40] вийшов в 1959 р.), було встановлено, а радянськими вченими Г. І. Корякіним і Г. М. Кімстач в 1970 р. підтверджено [88], що по відношенню до алюмінієво-кремнієвих сплавів ефект модифікування проявляється головним чином в розсередженні концентрованої усадкової раковини і формуванні розвиненої мікропористості. Так, після обробки металу АЛ30 рідким флюсом вмістом 40%NaF+45%NaCl+15%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> величина концентрованої усадкової раковини зменшилася з 2,43 до 0,98 %, а мікропористість зросла з 0,32 до 1,88 %. Аналогічна картина мала місце при модифікуванні заевтектичного силуміну, що містить 21 % Si, п'ятихлористим фосфором: мікропористість різко збільшувалася і поширювалася по всьому об'єму зразка, в той час як концентрована усадкова раковина практично зникла. Автори відзначають, що модифікування всіх алюмінієво-кремнієвих сплавів різними модифікаторами є ефективним засобом управління усадковими процесами і істотного підвищення фізико-механічних властивостей одержуваних з цих сплавів виливків. Слід розуміти, що в цих випадках заміна усадкових дефектів розсередженою газовою пористістю – це наслідок не модифікування, а підвищення вмісту водню при модифікуванні. Саме наводненням розплаву (без модифікування) в поєднанні з подальшим вакуумуванням тверднучого виливка В. А. Пластинін в 1969 р. вирішив ту ж задачу [59]. При литті в кокіль він не тільки розсередив концентровану усадкову раковину, а й зовсім прибрав надлив. Залишилися тільки стояк і випор, маса яких в 5 разів менше маси надливу. Виливок відповідав висунутим вимогам.

Подальші роботи радянських і пострадянських учених-ливарників (крім ФТІМС НАН України) в цьому напрямку практично призупинилися. У той же час зарубіжні публікації з'являлися як в експрес-інформації [39, 70, 89], так і в реферативних журналах [90]. В основному акцентувалась увага на заміні усадкових дефектів і економії металу. Великий експериментальний матеріал представлено в роботі [89]. На одержуваних в чавунних кокілях спеціальних пробах-вливках у вигляді циліндрів зі звуженими торцями досліджували сплави Al-Si (Si від 2 до 20 %) і Al-Cu (Cu від 5 до 40 %). Вміст водню регулювали тривалістю плавки в мазутній печі і дегазацією розплаву. Найбільшу кількість усадкових дефектів спостерігали при мінімальному газовмісті. При підвищеному вмісті водню в розплаві усадкові дефекти (раковини)

замінюються рівномірно розподіленою газовою пористістю. Надмірне підвищення газовмісту призводить до збільшення розмірів пор. Рекомендується допускати невелику кількість водню в розплаві. До цієї рекомендації приєднуються автори роботи [70]. А в роботі [90] повертаються до ролі модифікування алюмінієвих сплавів стронцієм. Вказується, що за рахунок збільшення пористості, супутньої модифікації, можна зменшити розміри надливів без погіршення якості виливків.

Переходячи до робіт ФТІМС НАН України, щоб не повторюватися, можна посперитися на матеріал, викладений в роботі [64], де теоретично обґрунтовано, що газові пори, які утворюються при позитивному тиску, мають тенденцію розсередження і відокремлення, тоді як усадкові пори утворюються при негативному від'ємному тиску і мають тенденцію згущення і сполучення.

*Коротка інформація.* Розчинений газ, що виділяється з розплаву, скорочує тривалість кристалізації виливка за рахунок зменшення або усунення зазору між виливком і формою, величина якого для дегазованого сплаву може бути майже в 4 рази більшою, ніж для сплаву з високим вмістом газу [82]. З тієї ж причини в зоні біля надливу газонасичений розплав охолоджується на 20–25 % швидше [70].

При низькому газовмісті ( $0,13 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ) сплаву АКВ в процесі відпалу виникають і укрупнюються до 10–15 мкм вторинні пори, що групуються в ланцюжки вздовж кордонів зерен. При газовмісті  $0,47 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  і наявності в злитках первинних пор розміром близько 100 мкм вторинні пори не утворюються [9].

Наявність пористості у виливку уповільнює розвиток утомної тріщини і не позначається на довговічності зразків при утомних випробуваннях [91].

*Водневе рафінування алюмінієвих сплавів* [92]. Включає наводнення перегрітого розплаву і подальше прискорене виморожування з кристалізацією. Забезпечує підвищення щільності, що свідчить про зниження вмісту водню, а також збільшує міцність на 12 %. Найдешевший, екологічно чистий метод рафінування, що забезпечує вибіркоче видалення найбільш великої фракції твердих неметалевих включень. Дрібнодисперсні включення залишаються для виконання ролі зародків кристалів. Плавка попередньо наводнених шихтових матеріалів перетворюється з традиційно забруднюючої розплаву у рафінуючу.

*Нові розробки ФТІМС НАН України. Сенс наводнення.* Вище представлено огляд робіт, опублікованих до 2011 р. Надходження зарубіжної інформації припинилося ще раніше. Однак, у ФТІМС НАН України роботи тривали. Зокрема, вперше було поставлено питання: якщо в одних організаціях (ВІЛС, МАТІ) барботажна обробка алюмінієвих розплавів використовується для забруднення розплаву (в дослідницьких цілях) включеннями  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а в інших (ФТІМС НАН України) за допомогою цієї ж операції видаляють вибіркоче найбільшу фракцію тих же включень, то що відбувається в дійсності? [93]. У роботі показано, що в процесі зазначеної обробки відбувається утворення, в основному, нових монолітних пасивних по відношенню до водню твердих неметалевих включень (ТНМВ), а також наводнення розплаву і створення комплексів  $\text{Al}_2\text{O}_3$ – водень на основі наявних перед обробкою активних пухких (дірчастих) оксидів. Частина цих комплексів з бульбашками, що утворилися, спливає на поверхню ванни розплаву, а дозародкові комплекси акумулюють газоподібний водень в своїх несущільностях і розчинений водень в примежовому шарі. На час чергової обробки частина монолітних пасивних по відношенню до водню ТНМВ може перейти в активний по відношенню до водню пухкий стан за рахунок коагуляції, гідратації і інших неврахованих (невиявлених) факторів (на це потрібен певний час) і включитися в процес пороутворення. Тому можна вважати, що в процесі обробки ми забруднюємо розплаву пасивними монолітними оксидами, що утворюються в результаті реакції алюмінію з водою, і очищаємо розплаву від активних пухких оксидів, що виконують роль центрів зародження газових бульбашок і спливаючих разом з цими бульбашками.

*Заміна газової пористості усадковою раковиною.* Відомо, що в непросочуваних вузлах виливків після попереднього впливу на водневомісний розплаву надлишкового

тиску, характерного для умов автоклавного лиття або лиття під низьким тиском, можливий перехід газової пористості, що утворюється в звичайних умовах, у концентровану усадкову раковину без зміни вмісту водню у виливку. У роботі [94] показано, що причиною цього явища є повільність перерозподілу водню між пухкими неметалічними включеннями і розплавом після зниження тиску в твердіючому виливці під дією усадки, через що позитивний тиск встигає змінитися від'ємним.

*Механічні властивості пористої металу.* Ця характеристика важлива для оцінки експлуатаційного стану непросочуваних вузлів виливків з пористою будовою, а також для реальних фасонних і великогабаритних виливків, що одержувалися, зазвичай, або в піщаних (в тому числі оболонкових, керамічних) найчастіше нагрітих формах, або в пофарбованих кокілях з робочою температурою 250–400 °С. Ознайомлення з профільною літературою свідчить про те, що вплив водневої пористості на міцність і пластичність алюмінієвих сплавів досить складний [95]. В одних випадках ця залежність має оберненопропорційний лінійний характер, в інших спостерігається безсистемний розкид даних. У зазначеній роботі [95] досліджували вплив водневої пористості від 0,05 до 3,6 % на міцність вертикальних і горизонтальних стінок клинчастих виливків зі сплаву АК7. При загальній тенденції зниження міцності зі збільшенням пористості одну і ту ж міцність, наприклад 150 МПа, може мати литий метал з пористістю від 0,4 до 2,8 %, а при одній і тій же пористості значення  $\sigma_b$  можуть змінюватися на  $30 \pm 5$  МПа.

У роботі [96] використовували спеціально розроблену методику, яка забезпечує інтенсивність твердіння на рівні піщаної форми. Сплав АК9 наводнювали при температурах 615–625, 710–745 °С і після певної витримки в інтервалі до 100 хв відливали заготовки для розривних зразків. Визначали пористість, міцність і відносне подовження. Витримка сильно позначалася на пористості (від 4 до 2 %), але незначно на  $\sigma_b$  і  $\delta$ . Міцність не стільки залежала від пористості, скільки від температури наводнення розплаву: при 615–625 °С  $\sigma_b = 150$ –160 МПа, при 710–745 °С  $\sigma_b = 130$ –140 МПа.

В роботі [97] зі сплаву АК7 отримували безнадливні виливки діаметром 50 і висотою 190 мм заливанням розплаву з різним перегрівом (620–720 °С) у чавунний кокіль з товщиною стінки 2 мм. У першій серії розплав не обробляли, у другій – наводнювали. Зразки на розрив діаметром 8 мм вирізали з нижньої частини виливків. Визначали пористість, міцність і відносне подовження. Після наводнювання пористість збільшилася приблизно вдвічі і в залежності від температури заливки коливалася в межах 2,5–4,5 %. У той же час, міцність без наводнення і після наводнення виявилася зіставною в межах 110–140 МПа, а при температурі заливки 645 °С значення міцності були однакові, приблизно 130 МПа. Пластичність також була приблизно однакова – 2,5–4 %.

Наведені матеріали свідчать про те, що кращі значення механічних властивостей близькі до ГОСТівських для лиття в піщані форми, отримані дані нестабільні зі значним розкидом, питання знаходиться на стадії накопичення експериментальних даних.

*Порушення герметичності в зоні газової пористості.* Багато разів доведено, що наводнення алюмінієвих сплавів покращує герметичність непросочуваних вузлів виливків. У той же час в низці безнадливних виливків діаметром 50 і висотою 200 мм в осьовій зоні середньої по висоті частини фіксується негерметична ділянка протяжністю близько 40 мм. В роботі [98] пояснено це послідовним затвердінням легкоплавкої складової (евтектики) всередині раніше сформованого кристалічного каркаса. Бульбашки водню в осьовій зоні евтектики беруть участь у компенсації усадки всього виливка, тому вони розширюються зі зменшенням внутрішнього газового тиску настільки, що їх позитивний тиск на розплав переходить у від'ємний і відбувається розрив.

*Воднева пористість – індикатор вмісту в розплаві включень  $Al_2O_3$ .* Для оцінки вмісту твердих неметалевих включень в роботі [99] використано ефект впливу тонкодисперсної окисної суспензії на швидкість дифузійного видалення водню з пересиченого розплаву. Відбирається доза рідкого металу 1,5–2 кг і переливається

в тигель із заданою температурою; за допомогою вологого азбестового тампону проводиться двохвилинне наводнення; робиться витримка (7–20 хв); тигель з розплавом встановлюється на ваговий пристрій; в розплав опускається тонкостінний носик форми проби; шляхом вакуумного всмоктування форма заповнюється розплавом, записується крива витрати живильної фази в процесі твердіння проби; за різницею між цією кривою і аналогічною раніше записаною кривою для добре очищеного від  $Al_2O_3$  того ж сплаву визначається бал вмісту включень. Мінімальний час аналізу 15 хв, що дозволяє використовувати результати аналізу по ходу плавки.

Таким чином, будучи незамінним учасником аналізів, які сприяють поліпшенню якості розплаву, водень підвищує якість виливка.

*Місце водню в структурі рідкого стану.* У роботі [100] зроблена спроба розібратися в цьому питанні шляхом порівняльного аналізу низки експериментально встановлених у ФТІМС НАН України явищ, пов'язаних з воднем і які виражаються важливими якісними проявами при формуванні виливків: ступеневий характер газовиділення у вакуумі з попередньо наводненого розплаву; вплив витримки після наводнення і швидкості охолодження наводненого розплаву перед заливкою на перерозподіл розсередженої газової пористості в центральній частині виливка і що скупчується у верхній частині; в непросочуваних вузлах виливків після попереднього впливу на розплав тиску газова пористість переходить у концентровану раковину при незмінному вмісті водню; прояв пружних властивостей розплаву.

Незважаючи на різноплановість виконаних досліджень, пояснення механізмів встановлених явищ адекватно укладаються в одну модель, побудовану на наявності двох форм водню: легкорухливого в розупорядкованій зоні розплаву і менш рухомого в твердо-газо-кластерних комплексах.

*Поєднання наводнення з іншими видами обробки розплаву.* Зазвичай при наводненні не звертають уваги на те, що цей же розплав паралельно може піддаватися введенню частинок  $Al_2O_3$ , рафінуванню, модифікуванню, обробці електричним струмом, що може спричинити додатковий вплив на якість виливка. У присвяченій цим питанням роботі [101] встановлено наступне.

При введенні частинок  $Al_2O_3$  (у вигляді стружки) відбувається різке збільшення і нерівномірний розподіл водневої пористості, тому таке поєднання недоцільно.

Рафінування флюсом через зниження вмісту часток  $Al_2O_3$  прискорює дифузійне видалення введеного в розплав водню, тому розливання розплаву слід проводити незабаром після наводнення при низьких перегрівках. Газова пористість буде більш рівномірною.

Модифікування солями натрію або стронцієм приходить у розплав зі своїм наводненням, тим не менш, додаткове штучне наводнення виявляється не зайвим. Саме поєднання модифікування зі штучним наводненням забезпечує максимальні показники міцності і пластичності. Оптимістично сприймається той факт, що при повільному твердінні сплаву АК9 газова пористість наближається до усадки твердіння, а механічні властивості задовольняють вимогам ГОСТ, що створює вагомі передумови для маловідходного безнадливного лиття з компенсацією усадки твердіння дрібнодисперсною газовою фазою.

Поєднання обробки розплаву електричним струмом і наводненням з фізичної сутності нагадує водневе рафінування. Дія електровакуумного рафінування в першому схожа з переплавом в другому, а наводнення у обох випадках виконує функції каталізатора.

### 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 фильтрация алюминиевых расплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 196 с.
5. *Orie W. R., Grant N. J.* Hydrogen solubility in aluminium and some aluminium alloys // Transactions metallurgical Society 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., Глотов 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., Глотов 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. Гольцев 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. ВОТ. 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. Björkergen 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.: Металлургиздат, 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 электротокотом // 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 Schwingfestigkeitsverhalten 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.
66. *Гиршович Н. Г., Лебедев К. П., Нехендзи Ю. А.* Предусадочное расширение черных и цветных сплавов // Литейное производство. – 1963. – № 4. – С. 23–28.
67. *Новиков И. И.* Горячеломкость цветных металлов и сплавов. – М.: Наука, 1966. – 299 с.
68. *Сокольская Л. Н.* Газы в легких металлах. – М.: Металлургиздат, 1959. – 115 с.
69. *Нехендзи Ю. А., Лебедев К. П., Купцов И. В.* Влияние плавки и разлива в вакууме на литейные свойства сплавов // Литейные свойства металлов и сплавов. – М.: Наука, 1967. – С. 60–65.
70. *Pehlke R. D., Trojan P. K., Flinn R. A., Winter B. P., Sutton M. C.* Mold wall movement, volumetric shrinkage and thermal profiles in pure aluminium and 356 alloy // 49 th Int. Congr., Chicago, 14–17 Apr. – 1982. – p. 11.
71. *Harriss R. and Cesana A.* The flux injection process // The Foundryman. – 1987.
72. *Scheuer E., Williams J., Wood J.* Foundry Properties of Aluminium Alloy // Metal industry. – 1954. – Vol. 85. – № 3. – pp. 47–52; № 4. – pp. 63–65.
73. *Постников Н. С.* Высокогерметичные алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 160 с.
74. *Котлярский Ф. М.* Влияние вакуума на формирование и герметичность отливок из алюминиевых сплавов в условиях бесприбыльного литья // Процессы литья. – 1995. – № 1. – С. 82–89.
75. *Котлярский Ф. М., Белик В. И., Борисов Г. П., Кондрацкий В. В.* Влияние избыточного давления на формирование и герметичность отливок из алюминиевых сплавов в условиях бесприбыльного литья // Процессы литья. – 1995. – № 2. – С. 93–98.
76. *Котлярский Ф. М.* О возможности получения герметичных бесприбыльных отливок из алюминиевых сплавов // Литейное производство. – 1998. – № 7. – С. 17–19.
77. *Котлярский Ф. М., Белик В. И., Борисов Г. П.* Влияние режимов газонасыщения расплава на формирование и герметичность отливок из алюминиевых сплавов // Процессы литья. – 1998. – № 2. – С. 53–58.
78. Отчет по теме НИР 1.6.5.476. Разработка научных основ повышения качества и эффективности производства отливок из алюминиевых сплавов путем водородной обработки расплава и литья под давлением. – К.: ФТИМС НАНУ, 2004. – 378 с.
79. *Горшков И. Е.* Литье слитков цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургиздат, 1952. – 416 с.
80. *Книпп Э.* Пороки отливок. – М.: Гостехиздат, 1958. – 276 с.
81. *Пржибыл Й.* Теория литейных процессов. – М.: МИР, 1967. – 328 с.

82. Mold wall movement volumetric shrinkage and thermal profiles in pure aluminium and 356 alloy / K. D. Pehlke, P. K. Tro-Yan, R. A. Flinn et al. // 49 Jnt. Congr. Chicago, 14–17 Apr. – 1982. – p. 11.
83. Morimoto Kazufumi, Awano Yoji, Nakamura Motoyuki // Jap. Foundrymen's Soc. – 1991. – Vol. 63. – № 9. – С. 757–762.
84. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П., Белик В. И. Образование утяжин в отливках из алюминиевых сплавов // Литейное производство. – 1986. – № 4. – С. 9–11.
85. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П. О двойственной роли водорода в процессах формирования отливок из алюминиевых сплавов // 50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС. – К.: Процессы литья. – 2008. – С. 434–467.
86. Котлярский Ф. М., Белик В. И. Влияние интенсивности теплоотвода на формирование отливок из силуминов // Литейное производство. – 1990. – № 6. – С. 10–11.
87. Борисов Г. П., Котлярский Ф. М. Водородная обработка расплава – как метод снижения водородной пористости в отливках из алюминиевых сплавов // Водородная обработка материалов. – Донецк: ДонГТУ. – 2001. – С. 202–204.
88. Корякин Г. И., Кимстач Г. М. Исследование влияния эффекта модифицирования на изменение составляющих суммарной усадки Al–Si–сплавов // Тр. Горьк. ПКТИ. – 1970. – Вып. 1. – С. 68–75.
89. Влияние содержания водорода на образование усадочных дефектов в отливках из алюминиевых сплавов // ЭИ ТОЛП. – 1986. – № 22. – серия 3. – С. 6–7.
90. Argo D., Gruzleski J. E. Porosity in modified aluminum alloy castings // Trans. Amer. Foundrymen's Soc. Proc. 92nd Annu. Meet., Apr. 24–28, Des Plaines (Ill). – 1988. – Vol. 96. – pp. 65–74.
91. Huck M., Naundorf H., Schutz W. Bruchmechanische Untersuchungen und Rißfortschrittmessungen an lunkerbehafteten, bauteilähnlichen Proben aus GK-AlSi12 // Z. Werkstofftechn. – 1983. – Vol. 14. – № 10. – pp. 325–329.
92. Котлярский Ф. М., Борисов Г. П., Белик В. И., Дука В. М. Водородное рафинирование алюминиевых сплавов от твердых неметаллических включений // Процессы литья. – 2008. – № 4. – С. 48–55.
93. Котлярский Ф. М. Барботажная обработка алюминиевых расплавов водяным паром. Загрязняем или рафинируем? // Процессы литья. – 2014. – № 2. – С. 14–20.
94. Котлярский Ф. М. Влияние давления на характер газоусадочных дефектов в непропитываемых узлах отливок // Процессы литья. – 2013. – № 1. – С. 29–32.
95. Котлярский Ф. М., Дука В. М. Комплексное влияние водородного рафинирования и скорости затвердевания на структуру и механические свойства сплава АК7 // Процессы литья. – 2016. – № 2. – С. 9–22.
96. Котлярский Ф. М. Определение свойств отливок с низкой интенсивностью затвердевания // Процессы литья. – 2011. – № 2. – С. 20–23.
97. Борисов А. Г., Котлярский Ф. М., Вернидуб А. Г., Цир Т. Г., Шеневидько Л. К. Влияние тепловых параметров прямого термического метода реолитья на формирование и свойства бесприбыльных отливок из сплава АК7 // Процессы литья. – 2015. – № 2. – С. 40–47.
98. Котлярский Ф. М. О влиянии газовой пористости на герметичность отливок из алюминиевых сплавов // Процессы литья. – 2011. – № 3. – С. 30–33.
99. Котлярский Ф. М. Оценка содержания твердых неметаллических включений в жидких алюминиевых сплавах // Процессы литья. – 2013. – № 2. – С. 8–14.
100. Котлярский Ф. М. Водород как составная часть структуры жидкого состояния алюминиевых сплавов // Процессы литья. – 2019. – № 1. – С. 3–9.
101. Котлярский Ф. М. Влияние совмещения наводороживания с другими видами обработки расплава на формирование и качество отливок из алюминиевых сплавов // Процессы литья. – 2019. – № 3. – С. 3–11.

Поступила 25.09.2019

## References

1. Goltsov, V. A. (1995) History, ideology and prospects of hydrogen processing of materials. Vodородnaya 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., Zasyupkin, 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 silumin 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 BAJ15 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. *Björkergen, L. E.* et al. (1993) The effect of porosity on the fatigue characteristics of various castings. Doklad na 60-m Mezhdunarodnom Kongresse liteyshchikov, 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 liteynogo 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 liteynogo 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 BAl18 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: DMetI, 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. Vodородnaya 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 splavov 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 splavov (VILS)*, 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 litynogo 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].
66. *Girshovich, N. G., Lebedev, K. P., Nekhendzi, Yu. A.* (1963) Pre-expansion of ferrous and non-ferrous alloys. *Liteynoe proizvodstvo*, no. 4, pp. 23-28 [in Russian].
67. *Novikov, I. I.* (1966) Heat resistance of non-ferrous metals and alloys, Moscow: Nauka, 299 p. [in Russian].
68. *Sokolskaya, L. N.* (1959) Gases in light metals. Moscow: Metallurgizdat, 115 p. [in Russian].
69. *Nekhendzi, Yu. A., Lebedev, K. P., Kuptsov, I. V.* (1967) The influence of melting and casting in vacuum on the casting properties of alloys. *Liteynye svoystva metallov i splavov*. Moscow: Nauka, pp. 60-65 [in Russian].
70. *Pehlke, R. D., Trojan, P. K., Flinn, R. A., Winter, B. P., Sutton, M. C.* (1982) Mold wall movement, volumetric shrinkage and thermal profiles in pure aluminium and 356 alloy. 49th Int. Congr., Chicago, 14-7 Apr., pp. 11 [in English].
71. *Harriss, R. and Cesana, A.* (1987) The flux injection process. *The Foundryman* [in English].
72. *Scheuer, E., Williams, J., Wood, J.* (1954) Foundry properties of aluminium alloy. *Metal Industry*, Vol. 85, no. 3, pp. 47-52; no. 4, pp. 63-65 [in English].
73. *Postnikov, N. S.* (1972) High sealed aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya, 160 p. [in Russian].
74. *Kotlyarskyi, F. M.* (1995) The effect of vacuum on the formation and tightness of castings from aluminum alloys in the conditions of non-profit casting. *Protsessy litya*, no. 1, pp. 82-89 [in Russian].
75. *Kotlyarskyi, F. M., Belik, V. I., Borisov, G. P., Kondratskiy, V. V.* (1995) The effect of excess pressure on the formation and tightness of castings from aluminum alloys in the conditions of non-profit casting. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 93-98 [in Russian].
76. *Kotlyarskyi, F. M.* (1998) On the possibility of obtaining sealed non-profit castings from aluminum alloys. *Liteynoe proizvodstvo*, no. 7, pp. 17-19 [in Russian].
77. *Kotlyarskyi, F. M., Belik, V. I., Borisov, G. P.* (1998) The influence of gas saturation of the melt on the formation and tightness of castings from aluminum alloys. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 53-58 [in Russian].
78. *Otchet po teme NIR 1.6.5.476.* (2004) Development of scientific foundations for improving the quality and production efficiency of castings from aluminum alloys by means of hydrogen melt processing and injection molding. K.: PTIMA NAS of Ukraine, 378 p. [in Russian].
79. *Gorshkov, I. Ye.* (1952) Non-ferrous metal and alloy ingot casting. Moscow: Metallurgizdat, 416 p. [in Russian].
80. *Knipp, E.* (1958) Vices of castings. Moscow: Gostekhzdat, 276 p. [in Russian].
81. *Przhibyl, Y.* (1967) Theory of foundry processes. Moscow: MIR, 328 p. [in Russian].
82. *Pehlke, K. D., Tro-Yan, P. K., Flinn, R. A.* et al. (1982) Mold wall movement volumetric shrinkage and thermal profiles in pure aluminium and 356 alloy. 49 Jnt. Congr. Chicago, 14-17 Apr., p. 11 [in English].
83. *Morimoto Kazufumi, Awano Yoji, Nakamura Motoyuki* (1991) *Jap. Foundrymen's Soc.*, Vol. 63, no. 9, pp. 757-762 [in English].
84. *Kotlyarskyi, F. M., Borisov, G. P., Belik, V. I.* (1986) Formation of weights in aluminum alloy castings. *Liteynoe proizvodstvo*, no. 4, pp. 9-11 [in Russian].
85. *Kotlyarskyi, F. M., Borisov, G. P.* (2008) On the dual role of hydrogen in the formation of castings

- from aluminum alloys. 50 let v Akademii nauk Ukrainy: ILP, IPL, PTIMA. K.: redaktsiya zhurnala «Protsessy litya», pp. 434-467 [in Russian].
86. *Kotlyarskyi, F. M., Belik, V. I.* (1990) Effect of heat sink intensity on the formation of castings from silumins. *Liteynoe proizvodstvo*, no. 6, pp. 10-11 [in Russian].
  87. *Borisov, G. P., Kotlyarskyi, F. M.* (2001) Hydrogen treatment of the melt - as a method of reducing hydrogen porosity in castings from aluminum alloys. *Vodorodnaya obrabotka materialov. Donetsk: DonGTU*, pp. 202-204 [in Russian].
  88. *Koryakin, G. I., Kimstach, G. M.* (1970) Investigation of the effect of the modification effect on the change in the components of the total shrinkage of Al-Si alloys. *Tr. Gork. PKTI*, Vol. 1, pp. 68-75 [in Russian].
  89. Effect of hydrogen content on the formation of shrinkage defects in castings from aluminum alloys (1986) *EI TOLP*, no. 22, seriya 3, pp. 6-7 [in Russian].
  90. *Argo, D., Gruzleski, J. E.* (1988) Porosity in modified aluminum alloy castings. *Trans. Amer. Foundrymen's Soc. Proc. 92nd Annu. Meet.*, Apr. 24-28, Des Plaines (Ill). Vol. 96, pp. 65-74 [in English].
  91. *Huck, M., Naundorf, H., Schutz, W.* (1983) Bruchmechanische Untersuchungen und Rißfortschrittsmessungen an lunkerbehafteten, bauteilähnlichen Proben aus GK-ALSi12. Vol. 14, no. 10, pp. 325-329 [in German].
  92. *Kotlyarskyi, F. M., Borisov, G. P., Belik, V. I., Duka, V. M.* (2008) Hydrogen refining of aluminum alloys from solid non-metallic inclusions. *Protsessy litya*, no. 4, pp. 48-55 [in Russian].
  93. *Kotlyarskyi, F. M.* (2014) Bubbling treatment of aluminum melts with water vapor. Are we polluting or refining? *Protsessy litya*, no. 2, pp. 14-20 [in Russian].
  94. *Kotlyarskyi, F. M.* (2013) The effect of pressure on the nature of gas-shrinking defects in non-impregnated knots. *Protsessy litya*, no. 1, pp. 29-32 [in Russian].
  95. *Kotlyarskyi, F. M., Duka, V. M.* (2016) The complex effect of hydrogen refining and solidification rate on the structure and mechanical properties of AK7 alloy. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 9-22 [in Russian].
  96. *Kotlyarskyi, F. M.* (2011) Determination of properties of castings with low hardening rate. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 20-23 [in Russian].
  97. *Borisov, G. P., Kotlyarskyi, F. M., Vernyudub A. G., Tsir, T. G., Shenevidko, L. K.* (2015) The influence of thermal parameters of the direct thermal method of casting on the formation and properties of non-profit castings from AK7 alloy. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 40-47 [in Russian].
  98. *Kotlyarskyi, F. M.* (2011) On the effect of gas porosity on the tightness of castings from aluminum alloys. *Protsessy litya*, no. 3, pp. 30-33 [in Russian].
  99. *Kotlyarskyi, F. M.* (2013) Evaluation of the content of solid non-metallic inclusions in liquid aluminum alloys. *Protsessy litya*, no. 2, pp. 8-14 [in Russian].
  100. *Kotlyarskyi, F. M.* (2019) Hydrogen as an integral part of the liquid state structure of aluminum alloys. *Protsessy litya*, no. 1, pp. 3-9 [in Russian].
  101. *Kotlyarskyi, F. M.* (2019) The effect of combining hydrogenation with other types of melt processing on the formation and quality of castings from aluminum alloys. *Protsessy litya*, no. 3, pp. 3-13 [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 2

*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, выпол-*

ненными 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 трещиностойкости 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 раковиной 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. Kotlyarskiy, Dr. Sci. (Engin.), 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 2

*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 defects, 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 parts, the feeding of which with melt, 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*



## Одержання та обробка металів

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 nucleating 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.



Щиро вітаємо головного  
наукового співробітника,  
члена-кореспондента НАН України

**МАЗУРА Валерія Леонідовича**

з нагородженням орденом  
«За заслуги» I ступеня!

Бажаємо нових творчих звершень і натхнення!

**Адміністрація і колектив ФТІМС НАН України**