

<https://doi.org/10.15407/plit2023.03.012>

УДК 621.7

В.П. Школярєнко, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;

e-mail: hvp@ukr.net; ORCID 0000-000153931077

А.С. Нурадїнов, д-р техн. наук, пров. наук. співроб.;

e-mail: nla_73@ukr.net; ORCID 0000-0002-7286-8648;

С.В. Пригунов, канд. техн. наук; наук. співроб.;

e-mail: s.prigunov@gmail.com, ORCID 0009-0007-6891-7818

І.А. Нурадїнов, аспірант, e-mail: inuradinov@gmail.com;

ORCID 0000-0001-8916-5247

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

СПОСІБ УНИКНЕННЯ ГАРЯЧЕЛАМКОСТІ ТРУБНИХ ЗАГОТОВОК ЗІ СПЛАВУ АМг6 ПРИ ЛИТТІ У КОКІЛЬ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛИТТЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРАЦІЇ

На основі аналізу проблеми утворення гарячих тріщин запропоновано спосіб уникнення гарячеламкості трубних заготовок зі сплаву АМг6 при литті у кокіль шляхом оптимізації температурних параметрів лиття та застосування вібрації. Аналіз публікацій за даною темою виявив, що у світі розроблено багато методів оцінки чутливості до утворення гарячих розривів, але дослідження проблеми гарячеламкості при литті у кокіль трубних заготовок зі сплаву АМг6 не проводилось, що зумовило актуальність таких досліджень. Виявлено, що схильність до утворення гарячих тріщин залежить не тільки від піддатливості чи невіддатливості форми, температур прогріву форми та розплаву перед заливанням, але й від його хімічного складу, тому експериментальні дослідження проведено тільки для одного сплаву АМг6. Для перевірки гарячеламкості використано кільцеву пробу, розроблену Зінгером і Дженінгсом [3]. При проведенні експериментів було відлито три кільцеві проби на гарячеламкість у сталевий кокіль при різних умовах лиття. За результатами здійснено оптимізацію параметрів лиття у кокіль трубних заготовок зі сплаву АМг6 під дією вібрації для зниження гарячеламкості. З'ясовано, що гарячі тріщини виникають через лиття у непрогрітий кокіль, високий перегрів розплаву й тривале охолодження виливка у кокіль. Виявлено, що процеси взаємодії ливарної форми та виливка впливають на точність її розмірів і можуть призводити не тільки до тріщин, але й до появи низки специфічних дефектів. Виникнення напруги у виливку та формі є наслідком їх силової взаємодії. З'ясовано, що в результаті гальмування формою лінійної усадки виливка, який твердіє, виникають напруження, які можуть або зруйнувати виливок, або настільки стиснути внутрішню форму, що виливок дуже складно буде відокремити від форми. Виявлено, що вібраційна обробка під час заливання призводить до заліковування гарячих тріщин, покращення проливання форми, ущільнення структури металу, проте ускладнює роз'єднувальну здатність при відокремленні виливка від форми. За результатами досліджень визначено такі оптимальні параметри лиття: температура прогріву кокілю 300 °С, температура розплаву

Твердіння сплавів

АМг6 перед заливанням у кокілю 700 °С, амплітуда вібрації кокілю 0,2 мм, частота вібрації кокілю 4...23 Гц.

Ключові слова: спосіб уникнення гарячеламкості, оптимізація температур розплаву та кокілю, оптимізація параметрів вібрації кокілю.

Відомо, що алюмінієві сплави чутливі до гарячого розтріскування, наприклад, сплави систем Al–Cu або Al–Mg–Si [1]. У світі розроблено багато методів оцінки чутливості до утворення гарячих розривів [1–11], але дослідження проблеми гарячеламкості при литті у кокілю трубних заготовок зі сплаву АМг6 не проводились, що зумовлює їх актуальність. Згідно з ДСТУ 9051:2020 [2], гарячі тріщини є одним із дефектів, що призводить до утворення несучільностей у тілі виливка. Схильність до утворення гарячих тріщин називається гарячеламкістю, яка залежить не тільки від піддатливості чи не піддатливості форми, температур прогріву форми та розплаву перед заливанням, але й від його хімічного складу. Незважаючи на важливу практичну значущість проблеми гарячеламкості сплавів, загальноприйнятої проби для її оцінки немає. У роботі використано кільцеву пробу, розроблену Зінгером і Дженінгсом, що детально описана в [3].

Дослідження гарячеламкості проведено на сплаві АМг6. Основу хімічного складу сплаву АМг6 складають Al $\approx$ 93,69 % легований Mg $\approx$ 5 %. Інші хімічні елементи наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву АМг6

Крем- ний % мас. част.	Залізо % мас. част.	Мідь % мас. част.	Марга- нець % мас. част.	Магній % мас. част.	Цинк % мас. част.	Титан % мас. част.	Берилій % мас. част.	Калій % мас. част.	Сурма % мас. част.
0,4	0,4	0,1	0,5–0,8	5,8–6,8	0,2	0,02– 0,01	0,0002– 0,005	0,05	0,1

Під час проведення експериментів було відлито три кільцеві проби на гарячеламкість (рис. 1) у сталевий кокілю, пофарбований графітовою фарбою. Заливка сплаву АМг6 відбувалася при температурі 740 °С. Заливання й охолодження виливків проводили в холодну форму на відкритому повітрі; вилучення виливків із форми провадилося механічним вибиванням виливка з форми. Перший виливок був

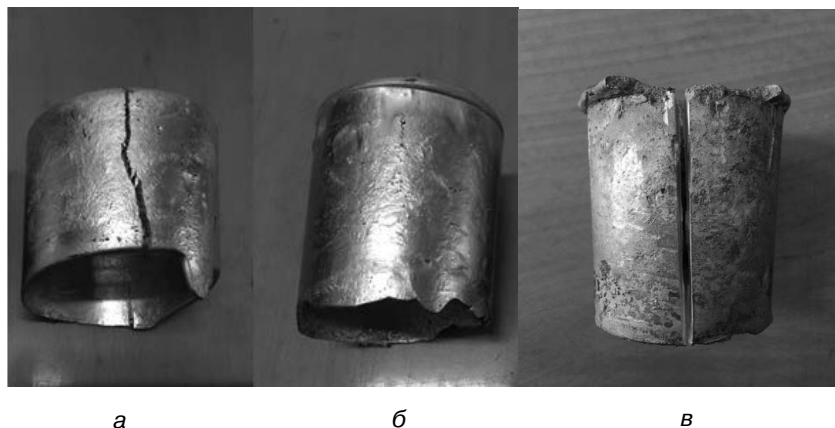


Рис. 1. Фото кільцевих проб: (а) – без прогріву форми, без покриття кокілю фарбою, (б) – із прогрівом, без покриття кокілю фарбою, (в) – із прогрівом, вібрацією та покриттям кокілю графітовою фарбою

Твердіння сплавів

отриманий без попереднього нагріву кокілю, і, як видно з рис. 1, після тверднення утворилася гаряча тріщина. Також сталося неповне пролиття форми через холодний кокіль (рис. 1, а). У другому виливку, який сформувався за умови, коли розплав заливали в кокіль із прогрітим до 500 °С центральним стрижнем, тріщини відсутні, однак залишилися незначні дефекти неповного пролиття форми (рис. 1, б). Третій виливок, який одержано заливанням рідкого металу в кокіль із прогрітим до 500 °С центральним стрижнем та із застосуванням вібрації в процесі тверднення, не мав тріщини. Форма пролилася повністю, проте вібрація настільки ущільнила структуру металу, що виливок неможливо було від'єднати від форми, тому виливок довелося розрізати (рис. 1, в).

З рис. 2 видно, що прогрів форми перед заливкою забезпечив не тільки відсутність тріщини, а й покращив проливання форми. Покриття внутрішньої поверхні кокілю мастилом на основі графіту забезпечило гладку поверхню виливків, але недостатня роз'єднувальна здатність покриття призвела до ускладненого вивільнення виливка з форми. Для покращення роз'єднувальної здатності при від'єднанні виливка від форми в ході наступного експерименту на форму було нанесено покриття на основі цирконієвої фарби, рис. 2.



Рис. 2. Фото кільцевих проб, покритих фарбою на основі цирконію

Унаслідок застосування покриття на основі цирконію виливок легко відділився від форми, але поверхня виливка виявилася шорсткою, з порами та раковинами через те, що фарба наносилася пензлем, а не розпиленням.

З метою виявлення впливу температур прогріву кокілю і температур заливання розплаву на утворення гарячих тріщин при литті кільцевих проб із вібрацією та без проведено дослідження, результати яких наведено у табл. 2 та 3.

За даними табл. 2 та 3, в подальшому обирали раціональні технологічні параметри: температура кокілю — 300 °С, температура заливання розплаву при литті кільцевої

Таблиця 2

Температурні параметри прогріву кокілю

№ експ.	Температура прогріву кокілю °С	Температура розплаву °С	Наявність тріщин без вібрації	Наявність тріщин із вібрацією
1	20	740	+	+
2	100	740	+	—
3	200	740	+	—
4	300	740	+	—
5	400	740	—	—
6	500	740	—	—

Таблиця 3

Температурні параметри розплаву перед литтям

№ експ.	Температура прогріву кокілю °С	Температура розплаву °С	Наявність тріщин без вібрації	Наявність тріщин із вібрацією
1	300	700	+	–
2	300	710	+	–
3	300	720	+	–
4	300	730	+	–
5	300	740	–	–
6	300	750	–	–

проби з вібрацією та без — 700...740 °С. Для визначення раціональних технологічних параметрів лиття трубних заготовок було проведено дослідження впливу вібрації на тріщиностійкість сплаву АМг6 при литті в кокіль. Амплітуда вібрації становила 0,2 мм, частота під час кожного експерименту була однаковою, її змінювали в діапазоні від 4 Гц до 32 Гц. Дослідженню підлягав процес тверднення виливка трубної заготовки в кокілі під дією вібрації. Вібрацію кокілю починали перед заливкою розплаву, нагрітого до температури 700...740 °С, і закінчували через 1 хв після завершення заливки.

Вібрація позитивно позначилася на тріщиностійкості сплаву АМг6. Під дією вібрації тріщина не утворювалась. Із шести виливків, що тверділи під дією вібрації, у двох утворилася тріщина. Решта чотири виливка — без тріщин. Причиною цього є поліпшення живлення виливків за рахунок вібрації, що сприяє надходженню розплаву не тільки в зону формування тріщини, але і в зони усадкових дефектів. Установлено, що вібрація виливка в процесі заливки та тверднення з амплітудою 0,2 мм підвищує тріщиностійкість виливків у діапазоні частот від 4 Гц до 23 Гц. Механізм цього явища полягає в посиленні заліковування усадкових тріщин при вібрації.

Висновки

1. Виявлено, що гарячі тріщини виникають через лиття у непрогрітий кокіль, високий перегрів розплаву і тривале охолодження виливка в кокілі.
2. Доведено, що в результаті гальмування формою лінійної усадки виливка виникають напруження, які можуть або зруйнувати виливок, або настільки стиснути внутрішню форму, що виливок дуже складно буде відокремити від форми.
3. Виявлено, що вібраційна обробка під час заливки призводить до заліковування гарячих тріщин, покращення проливання форми, ущільнення структури металу, але ускладнює роз'єднувальну здатність при відокремленні виливка від форми.
4. Визначено такі оптимальні параметри лиття: температура прогріву кокілю 300 °С, температура розплаву АМг6 перед заливанням у кокіль 700 °С, амплітуда вібрації кокілю 0,2 мм, частота вібрації кокілю від 4 Гц до 23 Гц.

Список літератури

- 1 Hot tearing Susceptibility in Aluminum Alloys. <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=390>
- 2 ДСТУ 9051:2020 «Виливки із чавуну та сталі. Дефекти. Терміни та визначення понять». 15с.
- 3 Новиков И. И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. Москва: Наука, 1966. 300 с.
- 4 Школяренко В. П., Нурадінов А. С., Сіренко К. А. Оптимізація технологічних процесів лиття безшовних труб у кокіль гравітаційним методом. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Наука і Металургія»*. Дніпро, ІЧМ НАН України, 2022. С. 31–32. http://isi.gov.ua/wp-content/uploads/2022/11/%D0%9D%D0%9C_2022.pdf

- 5 Liu B.C., Kang J.W., Xiong S.M. A study on the numerical simulation of thermal stress during the solidification of shaped castings Science and Technology of Advanced Materials. №2. 1, 2001. P.p.157–164. [https://doi.org/10.1016/S1468-6996\(01\)00041-9](https://doi.org/10.1016/S1468-6996(01)00041-9)
- 6 Ol'khovik E.O., Desnitskii V.V., Molchanyuk R.A. Interaction between casting and mold during solidification. Steel №37.5, 2007. P.p.422–424. <https://doi.org/10.3103/S0967091207050051>
- 7 Liu J.X., Liao R.D. Simulation of Thermal Stress and Hot Tearing in Engine Block Casting Advanced Materials Research №154-155, 2010. P.p.1571–1574. <https://www.scientific.net/amr.154-155.1571>
- 8 Ol'khovik E. Development the Methods for Preventing Hot Cracking With Use Analysis of Temperature Fields. VII International Scientific Practical Conference “Innovative Technologies in Engineering” IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering №142, 2016. P.p.1-6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012084>
- 9 Causes of casting cracks and six kinds of common defects and their prevention. Yaang Pipe Industry Co., Limited, China. 2021. <https://www.epowermetals.com/causes-of-casting-cracks-and-six-kinds-of-common-defects-and-their-prevention.html>
- 10 Vishwakarma K, Chaturvedi M. A study of HAZ microfissuring in a newly developed Allvac 718 Plus superalloy. Superalloy, 2008. P.p.241–250. https://www.tms.org/Superalloys/10.7449/2008/Superalloys_2008_241_250.pdf
- 11 Singh S., Andersson J. Hot cracking in cast alloy 718, Science and Technology of Welding and Joining, №23:7, 2018. P.568-574, <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1429238>

Надійшла 19.04.2023

References

- 1 Hot tearing Susceptibility in Aluminum Alloys. <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=390>
- 2 DSTU 9051:2020 «Iron and steel castings. Defects. Terms and definitions of concepts». 15s. [in Ukrainian].
- 3 Novikov I. I. Heat brittleness of non-ferrous metals and alloys. Moscow: Nauka, 1966. 300 p. [in Russian].
- 4 Shkolyarenko V. P., Nuradinov A. S., Sirenko K. A. Optimization of technological processes of casting seamless pipes in a mold by gravity method. *All-Ukrainian Scientific and Technical Conference «Science and Metallurgy»*. Dnipro, ICHM NAS of Ukraine, 2022. P. 31–32. [in Ukrainian].
- 5 Liu B.C., Kang J.W., Xiong S.M. A study on the numerical simulation of thermal stress during the solidification of shaped castings Science and Technology of Advanced Materials. №2. 1, 2001. P.p. 157–164. [https://doi.org/10.1016/S1468-6996\(01\)00041-9](https://doi.org/10.1016/S1468-6996(01)00041-9)
- 6 Ol'khovik E.O., Desnitskii V.V., Molchanyuk R.A. Interaction between casting and mold during solidification. Steel №37.5, 2007. P.p.422–424. <https://doi.org/10.3103/S0967091207050051>
- 7 Liu J.X., Liao R.D. Simulation of Thermal Stress and Hot Tearing in Engine Block Casting Advanced Materials Research №154–155, 2010. P.p. 1571–1574. <https://www.scientific.net/amr.154-155.1571>
- 8 Ol'khovik E. Development the Methods for Preventing Hot Cracking With Use Analysis of Temperature Fields. VII International Scientific Practical Conference “Innovative Technologies in Engineering” IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering №142, 2016. P.p. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012084>
- 9 Causes of casting cracks and six kinds of common defects and their prevention. Yaang Pipe Industry Co., Limited, China. 2021. <https://www.epowermetals.com/causes-of-casting-cracks-and-six-kinds-of-common-defects-and-their-prevention.html>

- 10 Vishwakarma K, Chaturvedi M. A study of HAZ microfissuring in a newly developed Allvac 718 Plus superalloy. *Superalloy*, 208. P.p. 241–250. https://www.tms.org/Superalloys/10.7449/2008/Superalloys_2008_241_250.pdf
- 11 Singh S., Andersson J. Hot cracking in cast alloy 718, *Science and Technology of Welding and Joining*, №23:7, 2018. P.p. 568–574. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1429238>

Received 19.04.2023

V.P. Shkolyarenko, Ph.D. (Engin), Senior Research Scientist;

e-mail: hvp@ukr.net, ORCID 0000-0001-5393-1077

A.S. Nuradinov, Dr. Sci. (Engin), Leading Research Scientist;

e-mail: nla_73@ukr.net; ORCID 0000-0002-7286-8648

C.V. Prygunov, Ph.D. (Engin), Research Scientist;

e-mail: s.prygunov@gmail.com; ORCID 0009-0007-6891-7818

I.A. Nuradinov, Leading Research; e-mail: inuradinov@gmail.com;

ORCID 0000-0001-8916-5247

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

THE METHOD OF AVOIDING HEAT BRACKET OF PIPE BILLS MADE OF AMg6 ALLOY WHEN CASTING IN MOLDS BY OPTIMIZING THE TEMPERATURE PARAMETERS OF CASTING AND USING VIBRATION

On the basis of the analysis of the problems of the formation of hot cracks, the optimization of the casting parameters in the mold of tube blanks from the AMg6 alloy under the influence of vibration to reduce their hot brittleness was carried out. The analysis of publications on this data revealed that many methods of assessing the sensitivity to the formation of hot cracks have been developed in the world, but the study of the problem of hot brittleness during casting in a mold of tube blanks made of AMg6 alloy has not been conducted, which determined the relevance of such studies. In the course of experimental studies, it was found that the tendency to the formation of hot cracks depends not only on the malleable or non-malleable form, the temperatures of heating the form and the melt before pouring, but also on its chemical composition, therefore, experimental studies were conducted only for one case of AMg6. The ring test developed by Singer and Jennings [3] was used to check hot brittleness. During the experiments, three ring samples for hot brittleness were cast in a steel mold under different casting conditions. According to the results, the parameters of casting in the mold of tube blanks from AMg6 alloy under the influence of vibration to reduce hot brittleness were optimized. It was found that hot cracks occur due to casting in an unheated mold, high overheating of the melt and prolonged cooling of the casting in the mold. It was found that the processes of interaction between the mold and the casting affect the accuracy of its dimensions and can lead not only to cracks, but also to the appearance of a number of specific defects. The emergence of stresses in the casting and the mold is a consequence of their force interaction. It was found that as a result of inhibition by the mold of the linear shrinkage of the solidified casting, stresses arise that can either destroy the casting or compress the inner mold so much that it will be very difficult to separate the casting from the mold. It was found that vibration processing during pouring leads to healing of hot cracks, improvement of mold shedding, compaction of the metal structure, but complicates the separation ability when separating the casting from the mold. According to the results of graphical optimization, the following optimal casting parameters were determined: mold heating temperature 300 °C, AMg6 melt temperature before pouring into the mold 700 °C, mold vibration amplitude 0.2 mm, mold vibration frequency 4...23 Hz.

Keywords: method of avoiding hot embrittlement, optimization of melt and die temperatures, optimization of die vibration parameters.