

УДК 662.8.055.3

*Е.А. Прохорчук¹, К.А. Власова¹, А.В. Трапезников¹, Ю.В. Решетников¹***ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ В ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-17-26

Представлен обзор исследований влияния горячего изостатического прессования (ГИП) на плотность и механические свойства литейных алюминиевых сплавов. В результате ГИП повышаются плотность сплава, его пластичность, циклические характеристики, уменьшается диапазон значений механических свойств, определяемых при испытаниях на растяжение и длительную прочность. Применение ГИП повышает выход годного по литью благодаря сокращению количества брака из-за недопустимой пористости, выявляемой при рентгенографическом контроле. Таким образом, литье приобретает гомогенную, полностью плотную структуру.

Ключевые слова: горячее изостатическое прессование, термообработка, литейные алюминиевые сплавы, механические свойства, пористость, микроструктура.

*E.A. Prokhorchuk¹, K.A. Vlasova¹, A.V. Trapeznikov¹, Yu.V. Reshetnikov¹***PROSPECTS FOR THE USE OF HOT ISOSTATIC PRESSING IN CAST ALUMINUM ALLOYS (review)**

The article provides an overview of studies on the influence of HIP on the density, roughness and mechanical properties of cast aluminum alloys. As a result of HIP, the density of the alloy, its ductility, and cyclic characteristics increase, and the scatter of mechanical properties determined during tensile and long-term strength tests decreases. The use of HIP increases the yield of good casting due to the reduction of rejects due to unacceptable porosity detected during x-ray inspection. Thus, the casting acquires a homogeneous, completely dense structure.

Keywords: hot isostatic pressing, heat treatment, casting aluminum alloys, mechanical properties, porosity, microstructure.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Горячее изостатическое прессование (ГИП) применено в 1955 г. для изготовления тепловыделяющих элементов ядерной энергетики с помощью диффузионной сварки. В связи с одновременным применением высокой температуры и изостатического давления появилось название «сварка давлением газа». Позже эту технологию использовали для улучшения механических характеристик отливок, которые могут содержать такие дефекты, как внутренняя пористость и незначительная усадка. Исследования, проводимые в 1965 г., были сосредоточены на устранении пористости путем ГИП-обработки с целью повышения сопротивления усталости литых алюминиевых поршней для дизельных двигателей внутреннего сгорания. В настоящее время современные технологии литья привели к снижению пористости, однако ГИП по-прежнему считается эффективной обработкой для ее удаления [1].

Суть технологии ГИП заключается в баротермической обработке изделий с помощью инертного газа в газостате. Устранение внутренней пористости происходит благодаря пластической деформации материала изделия в районе расположения этих пор.

В авиационной промышленности ГИП стало методом увеличения срока службы важных деталей (лопаток турбин и т. д.). Известно, что присутствие в отливках усадочной пористости снижает уровень механических характеристик. Использование ГИП сокращает количество брака по пористости, определяемой при рентгеновском контроле [2, 3].

Наиболее широкое применение в промышленности получили такие сплавы, как силумины, для которых характерны малые интервалы кристаллизации и хорошие литейные свойства. Однако данные сплавы имеют невысокий уровень эксплуатационных и механических характеристик [4–6].

Помимо силуминов, в промышленности нашли применение литейные алюминиевые сплавы на основе систем Al–Cu, Al–Mg и т. д., имеющие высокую прочность после термообработки. Однако широкий интервал кристаллизации этих сплавов обуславливает их низкие литейные свойства по сравнению с силуминами.

Таким образом, использование ГИП-обработки позволит добиться уменьшения пористости и повышения механических свойств алюминиевых сплавов.

Влияние ГИП на плотность, шероховатость и механические свойства литейных алюминиевых сплавов

Для литейных алюминиевых сплавов обычной практикой является повышение механических свойств путем термической обработки; устранение пористости в теле отливки возможно с применением ГИП. Комбинирование данных обработок приводит к улучшению механических свойств и устранению пористости. Однако есть и другое мнение. Например, в статье [7] показано, что ГИП повышает сопротивление усталости (с 88 до 140 МПа), предел прочности (с 275 до 310 МПа) и удлинение (от 4 до 7,5 %) сплавов типа А356.

В работе [8] также исследуют влияние ГИП на усталостные свойства образцов сплава А356, отлитых по выплавляемым моделям. Испытания проводили на образцах, прошедших ГИП-обработку, и на образцах, к которым данная технология не применялась. Результаты усталостных испытаний показали, что прочность у образцов с ГИП выше, чем у литых образцов, вследствие значительного уменьшения объемной доли пор при данной обработке. В литых образцах усталостные трещины зарождались в крупных порах, прилегающих к поверхности образца, и распространялись на глубину, составляющую несколько сотен микрометров.

В работе [9] исследуется совместное влияние термообработки и ГИП на свойства литейного алюминиевого сплава. Для экспериментов получены образцы из сплава марки AlSi7Mg0,3, модифицированного стронцием и отлитого в песчаные формы (аналог сплава марки EN AC-42100 согласно его документации DIN EN 1706). В качестве эталонов исследовали образцы в разных состояниях – литое, после термообработки (закалка + старение) и после ГИП (режимы 0–2). Для сравнения также проведены следующие комбинации: термообработка без старения (режим 3), ГИП с термообработкой (закалка + старение) и ГИП с последующей закалкой (режимы 4 и 5 соответственно). В дополнение к этим испытаниям выполнены эксперименты по интегрированному процессу, при котором образцы охлаждали вместе с газостатом – использовали так называемую систему струйного охлаждения после отжига при давлении 75 МПа с последующим старением и без него (режимы 7 и 8). Струйное охлаждение означает, что технологический газ охлаждается у стенки печи благодаря циркуляции и дополнительной подаче свежего газа при поддержании давления. Для анализа эффекта, вызванного различной скоростью охлаждения образцов вместе с газостатом, проведено ГИП с последующим старением (режим 6).

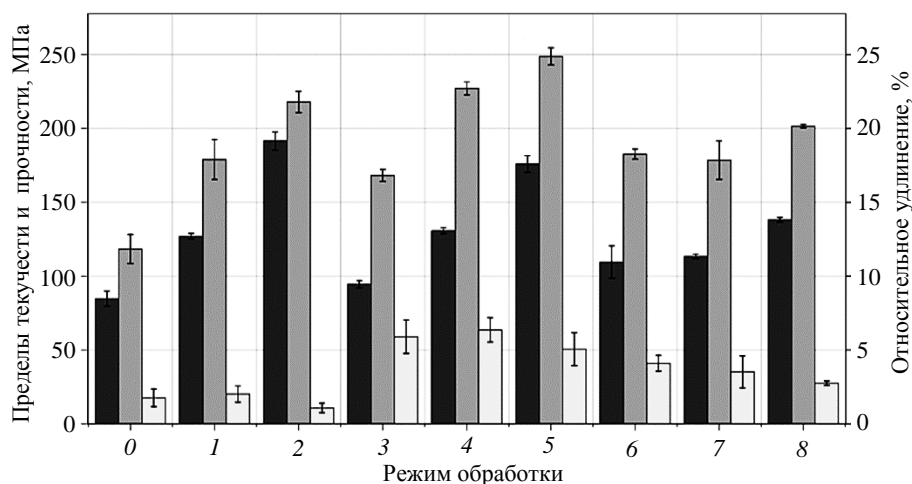


Рис. 1. Результаты механических испытаний образцов: пределы текучести (■) и прочности (■) и относительное удлинение (□)

Результаты механических испытаний представлены на рис. 1.

Исследование механических свойств образцов показывает, что по сравнению с литым состоянием все обработки ведут к повышению комплекса их свойств, однако образцы, прошедшие ГИП-обработку (режим 2), уступают образцам в литом состоянии по значению относительного удлинения на ~30 %, но превосходят образцы, прошедшие испытания по остальным режимам, по пределу текучести. Значительное увеличение значения относительного удлинения можно обнаружить у всех образцов, прошедших одновременно термообработку и ГИП (режимы 4–8). Более высокое значение удлинения показано при комбинации «ГИП + термообработка» (закалка + старение, режим 4), однако значения предела прочности выше у образцов, прошедших ГИП с термообработкой (закалка, режим 5).

В работе [9], кроме того, показано, что ГИП приводит к уменьшению объема материала образца и увеличению его плотности, а также к незначительному увеличению массы из-за окисления (рис. 2).

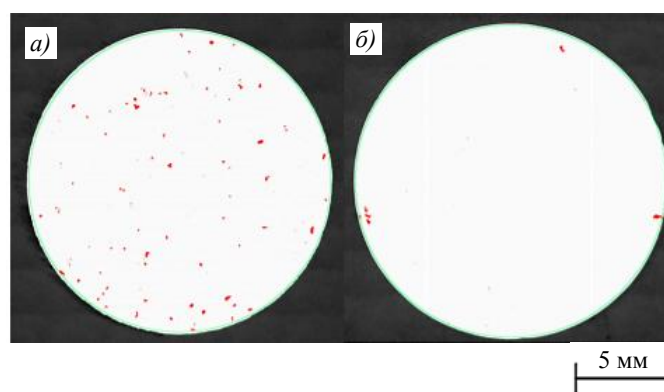


Рис. 2. Микрошлифы образцов из сплава марки AlSi7Mg0,3 в литом состоянии (а) и после обработки ГИП + термообработка без старения (б)

Основной причиной уменьшения объема материалов при использовании ГИП является снижение пористости, как показано на микрошлифах. В исходном состоянии поры равномерно распределены, после ГИП почти все поры закрываются.

Однако при исследовании влияния ГИП на шероховатость и плотность образцов сплава состава Al–9Si–3Cu, изготовленных из отливок, полученных методом литья под давлением (ЛПД) и термически обработанных по режимам T4 и T6, выявлено, что ГИП-обработка не оказывает заметного влияния ни на плотность, ни на шероховатость при ЛПД [10]. Это ожидаемо, так как при ЛПД получают почти плотное литье.

Существенное влияние ГИП наблюдается у образцов из сплава состава Al–9Si–3Cu, отлитых по выплавляемым моделям. Образцы стали более плотными и шероховатыми. Повышение плотности произошло из-за закрытия пор по всему объему, шероховатость поверхности увеличилась благодаря «залечиванию» пор, расположенных вблизи поверхности образца.

Механические свойства образцов сплава состава Al–9Si–3Cu, изготовленных из отливок, полученных ЛПД и термически обработанных по режимам T4 и T6, а также литьем по выплавляемым моделям (ЛВМ) в литом состоянии, представлены на рис. 3.

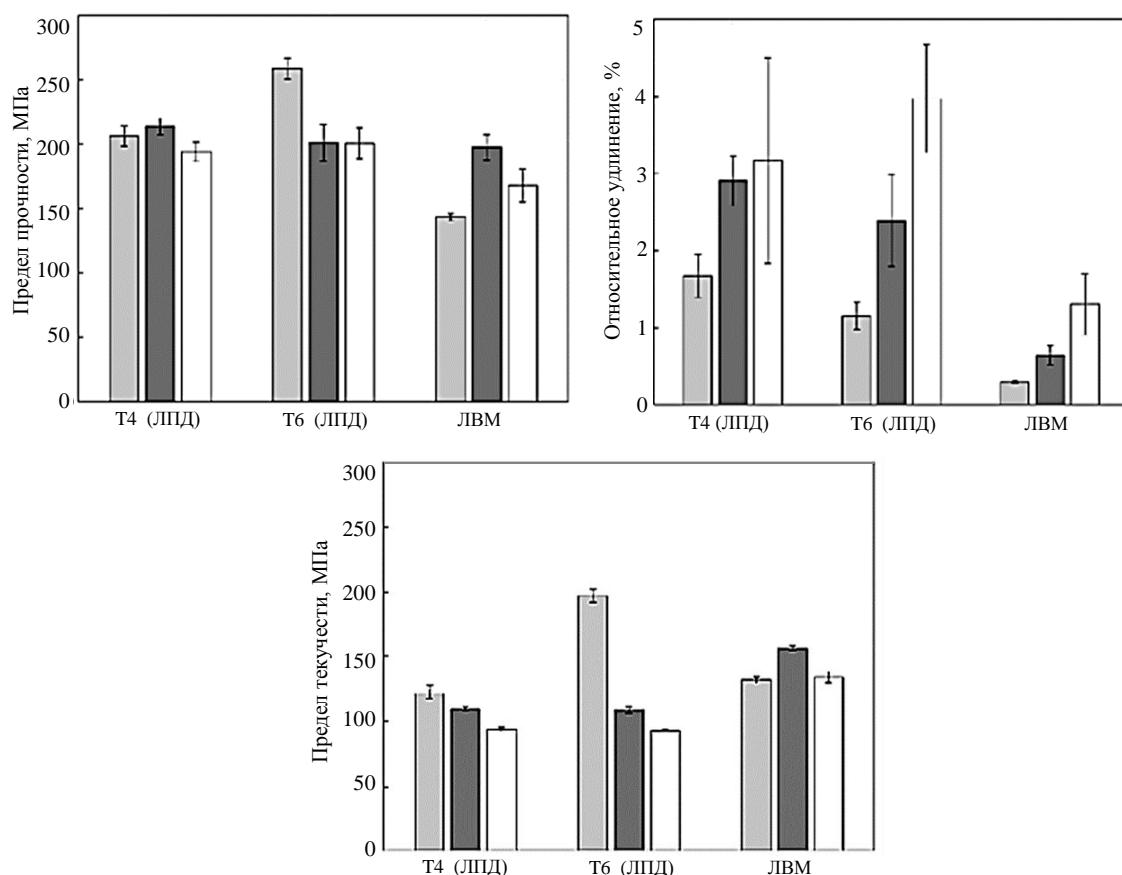


Рис. 3. Результаты механических испытаний образцов сплава состава Al–9Si–3Cu в исходном состоянии (■) и после термообработки и ГИП по режимам 1 (◆ – при давлении 75 МПа и температуре 480 °С в течение 2 ч) и 2 (□ – при давлении 100 МПа и температуре 510 °С в течение 2 ч)

Для образцов, полученных ЛПД, ГИП-обработка приводит к ухудшению их прочностных свойств и повышению пластичности. Особенно это заметно для режима T6. Поскольку пористость данных материалов незначительная, этот результат следует отнести к отрицательному влиянию высокой температуры на режимы термообработки T4 и T6. Значительный положительный эффект от ГИП можно наблюдать для образцов, полученных ЛВМ, – механические свойства существенно возросли.

Для образцов, полученных литьем в кокиль, ГИП-обработка приводит к повышению их плотности и механических характеристик. В работе [11] исследованы образцы из сплава системы Al–Zn–Mg–Cu–Ni–Fe (режим T7). По результатам испытаний получены данные по плотности и пористости (рис. 4).



Рис. 4. Результаты измерения плотности и пористости образцов из сплава системы Al–Zn–Mg–Cu–Ni–Fe, полученных литьем в кокиль

Как видно из данных, представленных на рис. 4, плотность повысилась незначительно (на ~0,29 %), а пористость, в свою очередь, благодаря ГИП-обработке снизилась на 20 %. Это означает, что образцы, изготовленные без применения ГИП-обработки, являются достаточно хрупкими. Уменьшение пористости должно привести к повышению механических свойств. Механические характеристики образцов из сплава системы Al–Zn–Mg–Cu–Ni–Fe в термообработанном состоянии и состоянии после совместного применения ГИП и термообработки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики образцов после испытаний при различных режимах термообработки

Режим термообработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	Среднее значение $\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	Среднее значение σ_B , МПа	δ , %	Среднее значение δ , %
T6	492	–	502	462,25	0,3	0,18
	–		431		0,1	
	–		438		0,1	
	–		478		0,2	
ГИП + T6	493	495,00	526	525,00	1,8	2,15
	494		522		3,1	
	498		527		1,7	
	495		525		2,0	

Видно, что термообработанные образцы разрушены без определения относительного удлинения; после ГИП прочность возросла в среднем на 14 %, пластичность – в 12 раз, а также повысилась воспроизводимость результатов испытаний.

Однако ГИП-обработка отливок в некоторых случаях не приводит к стабильности механических свойств. Это связано с присутствием толстых оксидных пленок [12], которые легко образуются на поверхности расплавленного алюминия при наличии минимального количества кислорода. При высокой скорости потока в алюминиевых сплавах эти пленки могут складываться, образуя двойные пленки, которые захватываются в отливку. Оксидные пленки представляют собой трещины в структуре материала и

ухудшают его механические свойства. Они не только снижают предел прочности, пластичность и сопротивление усталости, но также увеличивают диапазон значений этих свойств.

В исследованиях, представленных в работах [13, 14], авторы решали задачу подбора такого режима ГИП, который позволил бы не только устранить пористость, но и минимизировать влияние оксидных пленок путем их частичного разрушения и «залечивания» в процессе обработки. Для решения поставленной задачи выбраны два режима ГИП-обработки с последующей упрочняющей термообработкой образцов сплава марки А206 (Т71). Одни образцы не подвергали ГИП, другие же подвергали ГИП при его типичных параметрах для алюминиевых сплавов (режим 1). Для оставшихся образцов применяли ГИП при температуре эвтектики материала (режим 2). Результаты полученных механических характеристик представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические характеристики образцов из сплава марки А206 после испытаний при различных режимах обработки (минимальное/максимальное значения)

Условный номер режима	Параметры режима	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
		МПа		
	Без ГИП (исходное состояние)	124/372	227/307	0/4,9
1	Давление 103 МПа, температура 516 °С, продолжительность 4 ч	355/441	244/334	1,8/18,2
2	Давление 103 МПа, температура 543 °С, продолжительность 2 ч	320/417	269/320	2,3/17,0

Как видно из данных, представленных в табл. 2, средние значения механических свойств повысились благодаря использованию ГИП. Среднее удлинение увеличилось в 4 раза, а относительное удлинение превысило 18 %. Минимальная прочность при растяжении увеличилась почти в 3 раза, однако диапазон значений механических свойств является существенным.

На рис. 5 приведено сравнение микрошлифов поперечных сечений образцов в различных условиях ГИП.

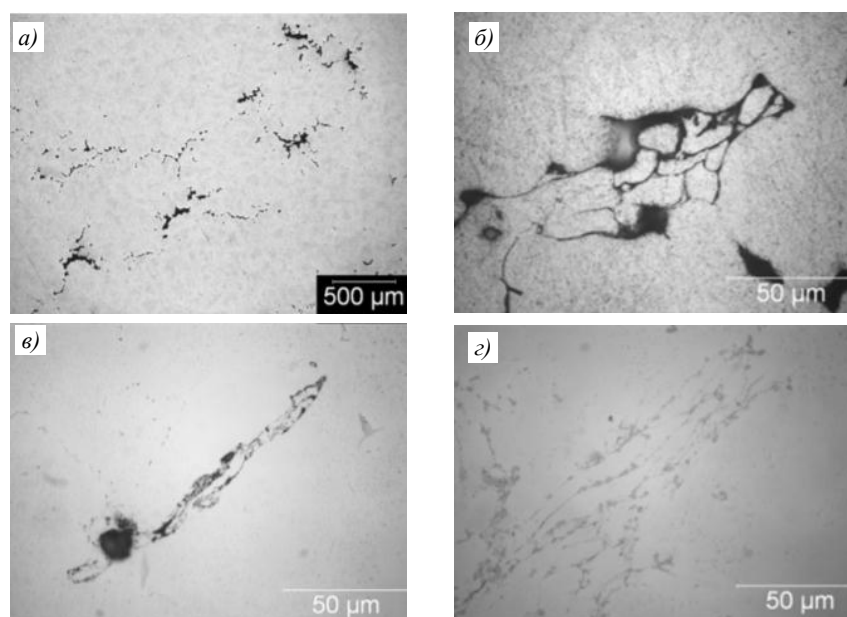


Рис. 5. Микроструктура образцов из сплава марки А206 в литом состоянии (а, б) и после ГИП-обработки – типичной (в) и при температуре эвтектики (г)

Образцы в литом состоянии содержат много двойных пленок и имеют большую пористость. Двойные пленки расположены на фронтах затвердевания дендритов в эвтектических областях. Трещиноподобный характер пленок легко увидеть с помощью разнообразных пространств, существующих между двумя тонкими оксидными слоями. Образцы, подвергнутые ГИП, не имеют измеряемой пористости, что позволяет предположить, что все поры были закрыты – в данных образцах меньше видимого пространства между двойными пленками.

Многие дефекты затвердевания, такие как газовые поры и усадочные полости, присутствовали в алюминиевых сплавах марок А356 и А204 при литье в песчаные формы [15]. Применение ГИП-обработки незначительно повлияло на микроструктурные особенности (размер зерна, интерметаллические соединения), однако значительно уменьшило дефекты затвердевания. Для обоих алюминиевых сплавов процесс ГИП привел к снижению диапазона данных и увеличению сопротивления усталости на ~40 % – для сплава А356 и на ~70 % – для сплава А204.

При использовании физико-механической обработки отливок можно добиться повышения герметичности изделия. Так, в статье [16] определено влияние пескоструйной обработки поверхности в сочетании с ГИП на герметичность отливок из сплава ВАЛ19. Эффективность данной обработки оценивали на образцах, отлитых в формы из холоднотвердеющих смесей. На рис. 6 представлен уровень механических свойств при разных режимах обработки.

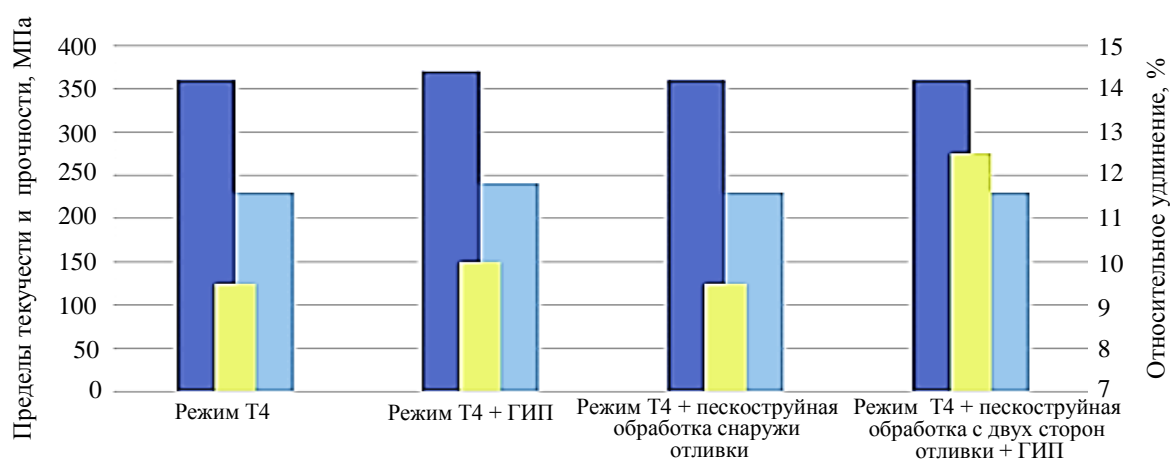


Рис. 6. Сравнение механических свойств (пределов текучести (■) и прочности (■)) и относительного удлинения (■) образцов из сплава ВАЛ19 при разных режимах обработки

Анализ представленных на рис. 6 данных показал, что ГИП-обработка незначительно влияет на механические свойства и герметичность алюминиевых сплавов системы Al–Mg. Это объясняется наличием в структуре сквозных и поверхностных дефектов [17, 18]. Данные дефекты не устраняются при применении ГИП, так как давление воздуха в них равно давлению в газостате. Сквозные и поверхностные дефекты заживают, используя пескоструйную обработку поверхности электрокорундом, тем самым повышая герметичность отливки, однако механические свойства остаются неизменными.

В рассматриваемых работах также проанализирована газоусадочная пористость на изломах образцов (рис. 7).

Излом, представленный на рис. 7, б, имеет мелкоячеистый характер после пластической деформации, что показывает незначительное количество газовых пор и раковин.

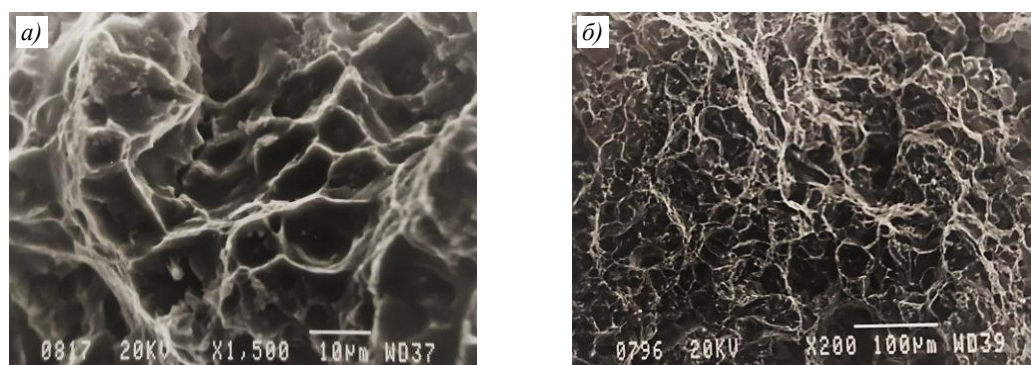


Рис. 7. Микроструктура образцов из литейного сплава ВАЛ19 в разных состояниях: а – режим Т4; б – режим Т4 + пескоструйная обработка + ГИП

Актуальной задачей остается правильный подбор режимов ГИП. В работе [19] проведены исследования различных условий ГИП на образцах из сплава А356, полученных литьем в песчаные формы.

В статье [20] показано влияние температур ГИП: 490, 510 и 530 °С, при давлении 100 МПа и продолжительности 2 ч на микроструктуру и свойства отливок из сплава состава Al–Si–7Cu–2Mg с различной толщиной стенок. Результаты экспериментов показывают, что ГИП при температуре 490 °С эффективно устраняет внутреннюю пористость отливок с толщиной стенки <40 мм. Однако для отливок с толщиной стенки ~70 мм даже ГИП при температуре 530 °С не может устранить дефекты полностью.

В патенте [21] представлен собственный режим ГИП, который позволяет получать высокие механические свойства. Исследования проводили на отливках из сплавов АК9ч, АМ4,5Кд и АМгблч, полученных литьем в песчаные формы. По предложенному способу отливки подвергали термообработке и ГИП по режимам, представленным в табл. 3. После ГИП все отливки обрабатывали по стандартным режимам (сплавы АК9ч и АМ4,5Кд – по режиму Т6, сплав АМгблч – по режиму Т4).

Таблица 3

Предлагаемые режимы проведения горячего изостатического прессования (ГИП) и термообработки

Сплав	Режим ГИП	Режим термообработки
АК9ч (АЛ4)	Температура 490 °С, давление 130 МПа, продолжительность 2,5 ч	Закалка при температуре 535 °С в течение 6 ч
АМ4,5Кд (ВАЛ10)	Температура 490 °С, давление 140±10 МПа, продолжительность 1,5 ч	Закалка при температуре 545 °С в течение 12 ч
АМгблч (АЛ23-1)	Температура 390 °С, давление 100 МПа, продолжительность 3,0 ч	Закалка при температуре 430 °С в течение 20 ч

Испытания проводили на образцах, вырезанных из отливок, обработанных по предлагаемому способу ГИП и по прототипу (рис. 8).

Анализ данных, представленных на рис. 8, показывает, что применение разработанной ГИП-обработки отливок из литейных алюминиевых сплавов позволит повысить их механические свойства.

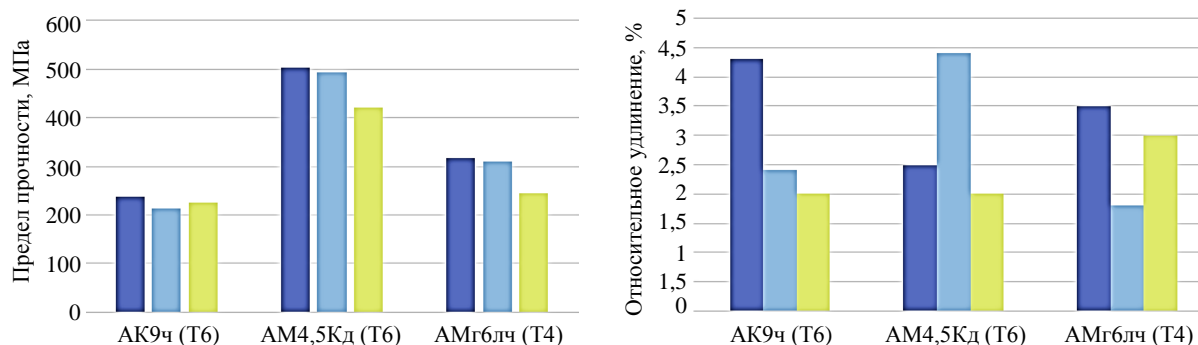


Рис. 8. Механические свойства образцов из сплавов АК9ч, АМ4,5Кд и АМг6лч, обработанных по предлагаемому способу ГИП (■), по прототипу (■) и термообработкой (■)

Заключения

Проведен обзор научно-технической литературы в части применения ГИП на отливках из алюминиевых сплавов. По результатам исследований выявлено, что ГИП устраняет пористость в теле отливки и повышает ее плотность для таких способов литья, как литье в песчаные формы, в формы из холоднотвердеющих смесей, в кокиль и по выплавляемым моделям. Горячее изостатическое прессование незначительно влияет на отливки, полученные ЛПД. Свойства литых изделий после ГИП становятся приближенными к свойствам аналогичных изделий, полученных деформацией.

Среди технологий алюминиевого литья ГИП широко применяется для обработки силуминов. При использовании такого способа получения отливок, как ГИП, возможно полностью устранить их микропористость. При этом повышаются механические свойства сплавов: предел текучести увеличивается незначительно, предел прочности при растяжении – на 20%, а относительное удлинение – в 3 раза.

В меньшей степени используют ГИП для обработки отливок из алюминиевых сплавов других систем, таких как Al–Cu и Al–Mg. Обработка ГИП литья из этих сплавов способствует устранению практически всей микропористости и существенному повышению уровня механических свойств. Это расширяет возможность применения данных сплавов для изготовления сложных отливок в песчаных формах, которые невозможно получить другим способом литья.

Библиографический список

1. Алексеев С.В., Зайцев А.А., Толстоухов С.С. Дисперсное ядерное топливо. М.: Техносфера, 2015. 256 с.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
3. Каблов Е.Н., Орлов М.Р., Оспенникова О.Г. Механизмы образования пористости в монокристаллических лопатках турбины и кинетика ее устранения при горячем изостатическом прессовании // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 117–129.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
6. Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.

7. Ivanova E., Tagirov D., Kaibyshev R. Effect of Liquid Hot Isostatic Pressing on Structure and Mechanical Properties of Aluminum Gravity Die Castings // *Materials Science Forum*. Switzerland, 2012. Vol. 706–709. P. 408–413. URL: <https://www.researchgate.net/publication/272608833> (дата обращения: 29.03.2021). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.408.
8. Lee M.H., Kim J.J., Kim K.H. et al. Effects of HIPping on high-cycle fatigue properties of investment cast A356 aluminum alloys // *Materials Science and Engineering A*. 2003. Vol. 340. P. 123–129. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00157-0.
9. Brummer M., Hoffmann H., Werner E. Heat Treatment of Aluminum Castings Combined with Hot Isostatic Pressing // *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*. Yokohama, 2010. P. 1095–1100.
10. Ostermeier M., Hoffmann H., Werner E. The Effects of Hot Isostatic Pressing on Aluminium Castings // *Key Engineering Materials*. 2007. Vol. 345–346. P. 1545–1548. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.345-346.1545.
11. Шуркин П.К., Акопян Т.К., Короткова Н.О. Влияние горячего изостатического прессования на структуру и механические свойства отливок экономнолегированного алюминиевого сплава АЦ6Н0,5Ж с повышенным содержанием свинца // *Цветные металлы*. 2016. № 9. С. 89–95. DOI: 10.17580/tsm.2016.09.13.
12. Pedram Y. Pore formation in aluminum casting: theoretical calculation and extrinsic effect of entrained surface oxide films: Masters thesis // *UNF Graduate Theses and Dissertations*. Pennsylvania State University, 2017. P. 101. URL: <https://digitalcommjns.unf.edu/etd/761> (дата обращения: 29.03.2021). DOI: 10.13140/RG.2.2.31160.85769/2.
13. Staley Jr. J.T., Tiryakio'glu M., Campbell J. The effect of increased HIP temperatures on bifilms and tensile properties of A206-T71 aluminum castings // *Materials Science and Engineering A*. 2007. Vol. 460–461. P. 324–334. DOI: 10.1016/j.msea.2007.01.049.
14. Staley Jr. J.T., Tiryakio'glu M., Campbell J. The effect of hot isostatic pressing (HIP) on the fatigue life of A206–T71 aluminum castings // *Materials Science and Engineering A*. 2007. Vol. 465. P. 136–145. DOI: 10.1016/j.msea.2007.02.009.
15. Ceschini L., Morri A. The effect of hot isostatic pressing on the fatigue behavior of sand-cast A356 – T6 and A204 – T6 aluminum alloys // *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 204 (1). P. 231–238. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.067.
16. Белов Е.В., Дуюнова В.А., Леонов А.А., Трапезников А.В. Метод повышения герметичности и упрочнения литейных коррозионностойких свариваемых магналиев // *Труды ВИАМ*. 2020. № 6–7 (89). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-11-18.
17. Белов Е.В., Дуюнова В.А., Леонова А.А., Трапезников А.В. Особенности формирования физико-механических свойств и структуры в интервале кристаллизации литейных Al–Mg сплавов // *Металлы*. 2020. № 3. С. 28–35.
18. Левчук В.В., Трапезников А.В., Пентюхин С.И. Коррозионностойкие литейные алюминиевые сплавы (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 7 (67). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-33-40.
19. Hafenstein S., Werner E. Simultaneous hot isostatic pressing and solution annealing of aluminum cast alloys followed by instantaneous aging at elevated temperatures // *Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 416. P. 1–9. DOI: 10.1088/1757-899X/416/1/012084.
20. Guan L., Wei Z., Mao H. et al. Influence of Hot Isostatic Pressing Temperature on the Microstructure and Properties of AlSi7Cu2Mg Alloys // *Journal of Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. 2020. Vol. 35. P. 1135–1141.
21. Способ горячего изостатического прессования отливок из алюминиевых сплавов: пат. 2501880 Рос. Федерация; заявл. 26.11.012; опубл. 20.12.13.