

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-24-34

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОТЛИВОК ИЗ СПЛАВА VT40L

М.А. Макушина¹, А.С. Кочетков¹, И.Д. Виноградов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Приведены результаты исследований влияния различных режимов горячего изостатического прессования (ГИП) и термической обработки на механические свойства и структуру литых образцов из сплава марки VT40L. Экспериментально определена температура полиморфного превращения в сплаве методом пробных закалок. Проведены испытания образцов на растяжение с определением предела кратковременной прочности и предела текучести, определены предел выносливости на базе $N=2 \cdot 10^7$ циклов, ударная вязкость и твердость. По результатам испытаний выбран режим обработки отливок, обеспечивающий комплекс свойств, необходимый для деталей изделий авиационной техники.

Ключевые слова: титан, литейные сплавы, литые образцы, многоцикловая усталость, предел прочности, горячее изостатическое прессование, термическая обработка

Для цитирования: Макушина М.А., Кочетков А.С., Виноградов И.Д. Влияние различных режимов горячего изостатического прессования и термической обработки на структуру и свойства отливок из сплава VT40L // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-24-34.

Scientific article

THE INFLUENCE OF VARIOUS MODES OF HOT ISOSTATIC PRESSED AND HEAT TREATMENT ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF CASTINGS FROM THE VT40L ALLOY

M.A. Makushina¹, A.S. Kochetkov¹, I.D. Vinogradov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. This article presents the results of studies of the influence of various modes of hot isostatic pressing (HIP) and heat treatment on the mechanical properties and structure of cast samples from the VT40L alloy. The temperature of the polymorphic transformation in the alloy was determined experimentally using the test quenching method. Tensile tests were carried out to determine the short-term strength and yield strength, the endurance limit on the basis of $N = 2 \cdot 10^7$ cycle, impact strength and hardness were determined. Based on the test results, a casting processing mode was selected that provides a set of properties necessary for parts of aircraft products.

Keywords: titanium, cast alloys, cast samples, high cycle fatigue, tensile strength, hot isostatic pressed, heat treatment

For citation: Makushina M.A., Kochetkov A.S., Vinogradov I.D. The influence of various modes of hot isostatic pressed and heat treatment on structure and properties of castings from the VT40L alloy. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-24-34.

Введение

Актуальная проблема современной авиационно-космической отрасли – разработка энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий изготовления элементов конструкций летательных аппаратов [1, 2].

Наиболее экономичным способом переработки материалов в изделия является фасонное литье, обеспечивающее высокие показатели коэффициента использования материала и выход годной продукции. С его помощью можно получить заготовку, требующую минимальной механической обработки или же не требующую вовсе (как в случае прецизионного литья) [3]. Однако применение отливок ограничено пониженным уровнем их механических свойств по сравнению с деформируемыми материалами. Это связано с особенностями структуры литого материала и наличием дефектов (поры, усадочные раковины и т. д.) [4].

В качестве альтернативы высокопрочным деформируемым сплавам типа ВТ22 предложен экономнолегированный литейный титановый сплав марки ВТ40Л [5–7], легированный в небольших количествах такими элементами внедрения, как углерод и кислород, что позволило достичь высоких значений прочностных характеристик и уменьшить ликвацию. По литейным характеристикам сплав не уступает другим литейным титановым сплавам, например таким, как сплав ВТ21Л, а по удельным характеристикам значительно превосходит их благодаря низкой плотности, которая достигается за счет малого количества тяжелых легирующих элементов. Однако при разработке технологии изготовления фасонных отливок необходимо учитывать их склонность к образованию внутренних дефектов, которые могут стать концентраторами напряжений. Дефекты усадочного происхождения особенно часто появляются в отливках сложной конфигурации, где сочетаются части с сечениями различной толщины. Технология литья титановых сплавов имеет ряд особенностей, одна из которых – центробежная заливка. Поэтому традиционные методы устранения усадочных дефектов в виде установки прибылей (массивных узлов) не всегда действенны. Это связано со сложностью выбора места подвода расплава и влиянием инерциальных сил на его движение в форме. На внутренние дефекты литейных сплавов оказывает влияние также интервал кристаллизации сплава – чем он шире, тем больше склонность к образованию неравномерно распределенной усадочной пористости. Литейные сплавы обладают более узким интервалом кристаллизации по сравнению с деформируемыми, однако сплав ВТ40Л имеет интервал кристаллизации в 100 °С, что несколько больше, чем у остальных литейных титановых сплавов.

Температурный интервал кристаллизации некоторых литейных титановых сплавов:

Сплав	ВТ5Л	ВТ6Л	ВТ20Л	ВТ21Л	ВТ40Л
Ликвидус, °С	1640	1650	1620	1630	1650
Солидус, °С	1600	1590	1560	1550	1550

Поэтому для устранения внутренних дефектов целесообразно применение горячего изостатического прессования (ГИП) – технологического процесса обработки изделий при высоком газовом давлении и повышенных температурах. В современном производстве – как в России, так и за рубежом – широко используется данный процесс. Устранение внутренних дефектов происходит путем пластической деформации материала отливки в области расположения несплошностей. Стенки поры или раковины постепенно сближаются и диффузионно срачиваются. Таким образом получается бездефектная или почти бездефектная литая заготовка (рис. 1) [8].

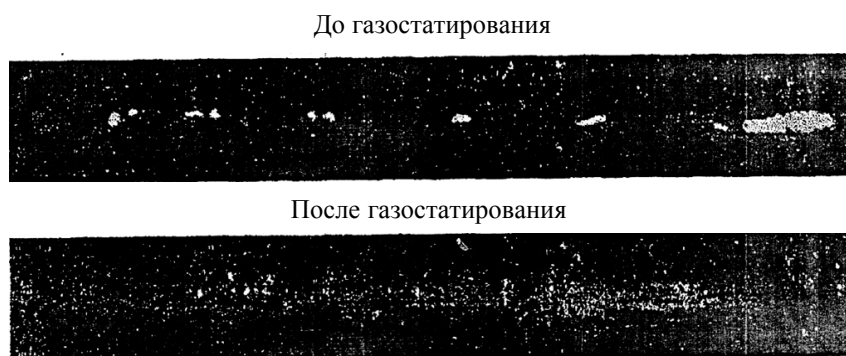


Рис. 1. Рентгенографический снимок образцов из сплава марки ВТ40Л до и после горячего изостатического прессования

Горячее изостатическое прессование является самым эффективным способом устранения внутренних, не сообщающихся с поверхностью дефектов в литых изделиях. Однако при выборе технологических параметров ГИП следует учитывать ряд аспектов. Так, температура внутри газостата при проведении ГИП должна быть достаточно высокой, для того чтобы обеспечить необходимую пластичность материала отливки. Но с другой стороны, температура не должна быть излишне высокой – это может привести к оплавлению деталей и нежелательному изменению ее структуры. Следует также тщательно подходить к выбору давления в газостате и продолжительности процесса. При правильном выборе этих параметров в результате ГИП можно добиться практически полного устранения усадочных дефектов и, как следствие, повышения механических свойств.

В итоге свойства отливок во многом зависят также от вида и режима термической обработки [9, 10]. Поэтому исследование влияния различных комбинаций постобработки отливок из перспективного литейного титанового сплава ВТ40Л – актуальная задача.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 8. «Легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [11].

Материалы и методы

Исследования проводили на литых образцах, полученных с применением слитков из сплава ВТ40Л и керамических форм методом центробежного литья в вакуумно-дуговой печи с водоохлаждаемым тиглем. Слитки сплава ВТ40Л изготавливали по технологии, обеспечивающей достаточную равномерность химического состава [12–15]. Внешний вид керамической формы, использованной для литья образцов, представлен на рис. 2.

Химический анализ проводили на одной пробе от каждой плавки с использованием следующего оборудования: атомно-эмиссионного спектрометра, анализатора серы и углерода, анализатора кислорода и азота и анализатора водорода по ГОСТ 9853.3–96, ГОСТ 28052–97, ГОСТ 9853.3–96 и ГОСТ 24956–81.

Для микроструктурных исследований сплава ВТ40Л изготавливали шлифы в соответствии с ПИ1.2785–2009 «Металлографический анализ титановых сплавов». Определение микроструктурных параметров проводили на оптическом микроскопе [16].



Рис. 2. Внешний вид керамической формы для литья образцов

Определение пределов прочности и текучести образцов из сплава ВТ40Л проводили согласно ГОСТ 1497–84.

Испытания на многоцикловую усталость образцов из сплава ВТ40Л проводили по схеме нагружения «чистый изгиб при вращении» по ГОСТ 25.502–79.

Определение ударной вязкости осуществляли на маятниковом копре согласно ГОСТ 9454–78.

Определение твердости образцов по Бринеллю проводили на твердомере по ГОСТ 9012–59.

Результаты и обсуждение

Формирование отливок из титановых сплавов имеет ряд особенностей по сравнению с другими сплавами. Высокая активность взаимодействия расплавленного титана с атмосферными газами и иными веществами требует проведения плавки в вакууме, а также применения специальных литейных форм, изготовленных из инертных материалов. Наибольшее распространение получили графитовые, металлические и керамические формы на основе электрокорунда [17]. В данной статье рассмотрены отливки, полученные с применением керамических форм.

Необходимым условием формирования отливок из титановых сплавов с наименьшим количеством литейных и внутренних дефектов является также создание дополнительного давления при литье. Гравитационное литье (под металлостатическим напором) применимо для изготовления крупногабаритных неотчетливых деталей. Однако при таком методе следует использовать подогретые до высокой (~1000 °С) температуры формы. В таком случае поток заливаемого расплава получается сплошным, отсутствует риск разрыва потока под действием центробежных сил, что ведет к образованию литейных дефектов типа неспаев. Увеличивается также время кристаллизации и затвердевания металла, что увеличивает зоны действия прибуллей, тем самым уменьшая вероятность образования внутренних усадочных дефектов в теле отливки. Однако в конструкциях современных самолетов используется большое количество литых тонкостенных деталей небольших габаритов, которые невозможно изготовить гравитационной заливкой. Ограничивает также область применения гравитационного литья и необходимость подогревать формы до столь высокой температуры, так как процессы активного взаимодействия расплава со стенками формы усиливаются при повышении температуры. Снизить интенсивность взаимодействия можно при использовании для внутренних поверхностей форм покрытия на основе оксида иттрия. Однако применение этого способа ограничено в связи с высокой стоимостью оксида иттрия [18].

В настоящее время для изготовления ответственных отливок из титановых сплавов чаще всего используют центробежное литье с вертикальной осью вращения стола [19]. При использовании такого метода основными параметрами – помимо конструкции литниково-питающей системы, выбора прибылей, напусков и припусков, индивидуальных для каждого наименования отливок – являются температура подогрева формы, скорость вращения центробежного стола и температура заливаемого расплава.

На отливках из сплава ВТ40Л проведено исследование влияния режимов литья на структуру отливок. При исследовании варьировали температуру подогрева формы – от 100 до 200 °С, скорость вращения центробежного стола и температуру расплава при заливке. Всего исследовано четыре комбинации параметров. Результаты исследования микроструктуры показаны на рис. 3.

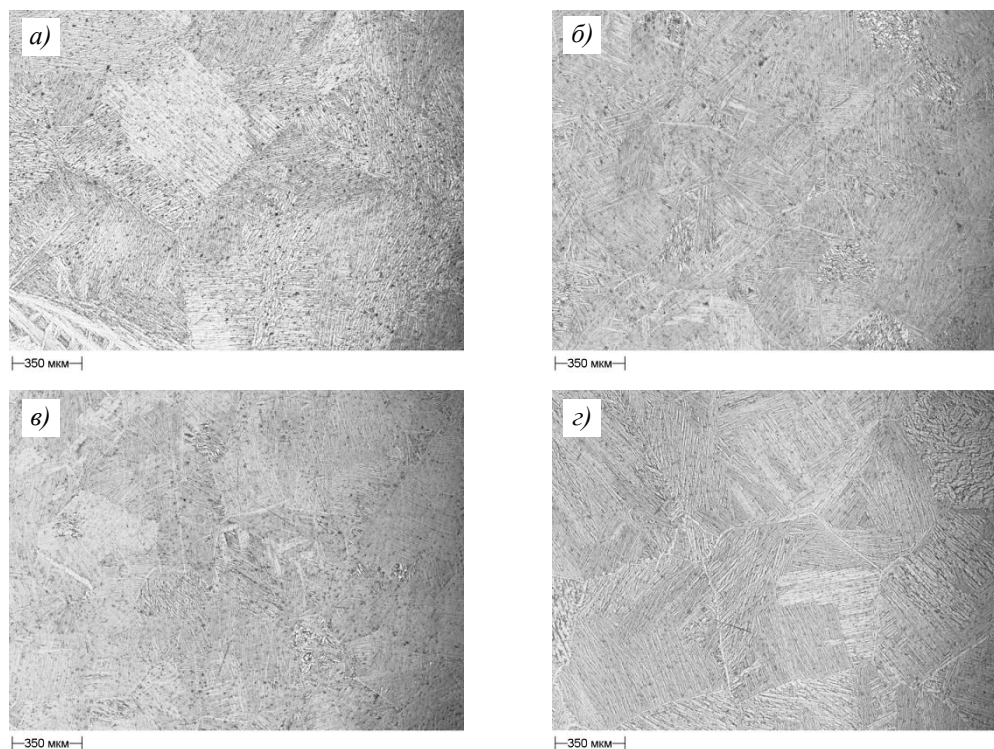


Рис. 3. Микроструктура отливок, изготовленных по различным режимам: *а* и *б* – режим № 1 и № 2 (подогрев формы до 100 °С, различные скорости вращения центробежного стола); *в* – режим № 3 (подогрев формы до 150 °С); *з* – режим № 4 (подогрев формы до 200 °С)

Металлографический анализ показал, что границы зерен четко различимы, внутризеренная морфология пластинчатая. Внутри каждой колонии пластины имеют одинаковую геометрическую ориентировку, сами колонии различно ориентированы по отношению друг к другу. Размер зерна в отливках, изготовленных по разным режимам, варьируется от 1200 до 1400 мкм. Таким образом, установлено, что различия в исследованных режимах литья не оказывают существенного влияния на микроструктуру отливок. Для каждого наименования отливки параметры литья в указанных диапазонах будут подбираться исходя геометрических, массогабаритных параметров, а также возможностей плавильно-заливочной установки.

Однако на уровень механических свойств – помимо исходной микроструктуры – существенное влияние оказывает и последующая обработка: ГИП и термическая обработка. Невысокий (по сравнению с деформируемыми сплавами) уровень механических свойств, в частности сопротивление усталости, литейных титановых сплавов обусловлен структурой литого металла, в особенности – большим размером зерна. Известно,

что измельчение зерна в сплаве ВТ5Л методом модифицирования приводит к значительному повышению сопротивления усталости. Однако процесс модифицирования сложен с технологической точки зрения, а также требует дополнительного оборудования [20]. В связи с этим разработан сплав ВТ40Л, содержащий в составе кислород и углерод в качестве модификаторов и упрочнителей. Температура ГИП отливок из сплава ВТ40Л должна быть на 20–30 °С ниже температуры полиморфного превращения для того, чтобы избежать еще большего роста зерна при переходе сплава из α - в β -область. Из литературных научно-технических данных [21] известно, что полиморфное превращение сплава ВТ40Л, легированного по верхнему пределу, происходит при температуре 980–990 °С. Однако в данном случае не все элементы в сплаве содержатся в максимальных концентрациях, поэтому для определения температуры полиморфного превращения использовали метод пробных закалок. Образцы, закаленные с различных температур, подвергали качественному рентгеноструктурному анализу (рис. 4).

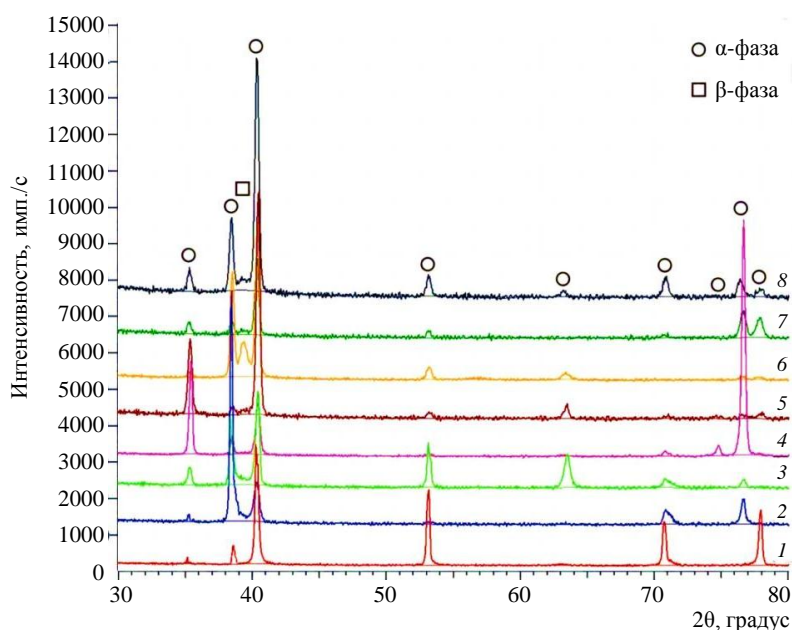


Рис. 4. Результаты качественного рентгеноструктурного анализа образцов после закалки с температур: 960 (1), 970 (2), 980 (3), 990 (4), 1000 (5), 1020 (6), 1050 (7) и 1070 °С (8)

Установлено, что температура полиморфного превращения находится в интервале значений 1000–1020 °С. Исходя из экспериментальных и литературных научно-технических данных выбрано два режима ГИП – при температурах от 940 до 970 °С.

Титановые сплавы псевдо- α -класса, к которым относится сплав ВТ40Л, подвергают отжигу для снятия внутренних напряжений и достижения необходимого уровня свойств. Отжиг проводят при температуре выше начала рекристаллизации, но ниже полиморфного превращения. Исходя из этого, выбран режим термической обработки с нагревом до 700 °С.

Таким образом, получили четыре комбинации обработок отливок: ГИП1 при 970 °С, ГИП1 + ТО, ГИП2 при 940 °С и ГИП2 + ТО.

Для исследования влияния выбранных режимов обработок на структуру и свойства сплава ВТ40Л выплавлены специальные цилиндрические заготовки под образцы, которые обработаны по четырем выбранным режимам. После чего из них изготовлены образцы для определения механических свойств при комнатной температуре (пределы прочности и текучести, многоцикловая усталость, ударная вязкость, твердость) и изучения структуры. На рис. 5 представлены средние значения предела прочности при растяжении образцов, обработанных по различным режимам.

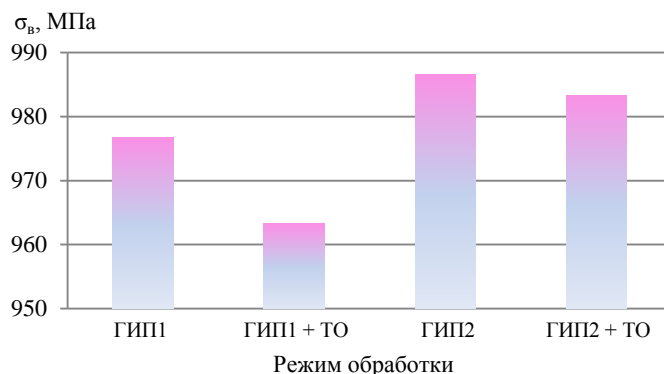


Рис. 5. Средние значения предела прочности при растяжении отливок из сплава ВТ40Л в зависимости от режимов обработки

Уровень предела прочности можно рассчитать через упрочняющий молибденовый [Mo]_{eq} и алюминиевый [Al]_{eq} эквиваленты по формуле [22]

$$\sigma_B = \sigma_B^{Ti} + 60[Al]_{eq} + 50[Mo]_{eq},$$

где σ_B^{Ti} – предел прочности чистого титана (235 МПа); [Al]_{eq} – алюминиевый эквивалент для сплава ВТ40Л, равный 11,02; [Mo]_{eq} – молибденовый эквивалент для сплава ВТ40Л, равный ~1,8.

Для сплава ВТ40Л расчетный предел прочности приблизительно равен 986 МПа, что соответствует результатам проведенных натурных испытаний.

На рис. 6 представлены средние значения других механических свойств отливок из сплава ВТ40Л, исследованных в данной работе.

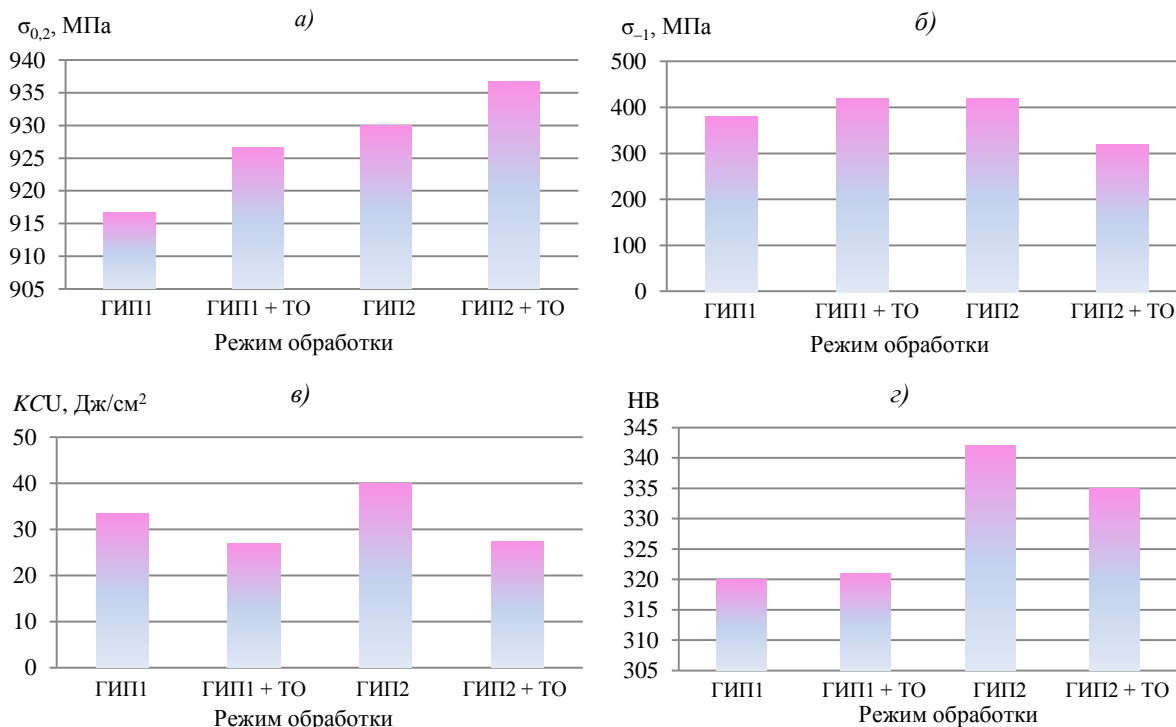


Рис. 6. Средние значения при комнатной температуре предела текучести (а), предела выносливости на базе $N = 2 \cdot 10^7$ циклов (б), ударной вязкости (в) и твердости по Бринеллю (з) для отливок из сплава ВТ40Л в зависимости от режимов обработки

По результатам металлографического анализа (рис. 7) установлено, что характер микроструктуры образцов после всех видов обработки не претерпевает существенных изменений. Однако средний размер зерна изменяется.

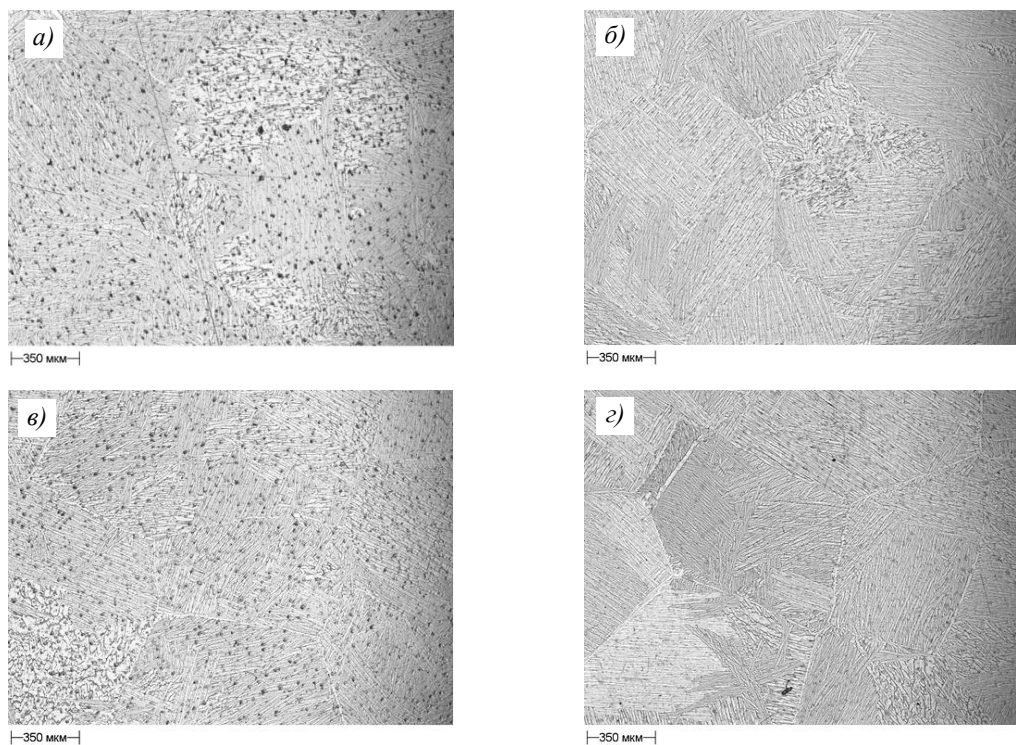


Рис. 7. Микроструктура образцов из сплава ВТ40Л после обработки по режимам ГИП1 (а), ГИП1 + ТО (б), ГИП2 (в) и ГИП2 + ТО (г)

Средний размер зерна образцов из сплава ВТ40Л после обработки по различным режимам:

Обработка	ГИП1	ГИП1 + ТО	ГИП2	ГИП2 + ТО
Размер зерна, мкм	910	1195	1067	1208

По результатам исследований установлено, что наилучший комплекс свойств (по средним значениям) достигается при ГИП-обработке по режиму 2 без термической обработки: предел прочности 990 МПа, предел текучести 930 МПа, предел выносливости 420 МПа, ударная вязкость 40 Дж/см². При этом не наблюдается заметного роста среднего размера зерна. Согласно литературным научно-техническим данным [8, 23] механические свойства большинства серийных литейных сплавов, например таких, как ВТ5Л, ВТ6Л и ВТ21Л, находятся на более низком уровне.

Однако, согласно литературным научно-техническим данным [4] и [21], прочностные характеристики сплава ВТ40Л достигают значений 1030 МПа или более. Поэтому для продолжения эксперимента изготовили партию цилиндрических отливок со скорректированным химическим составом – увеличенным практически до верхнего предела содержанием кремния и углерода, обеспечивающих дисперсионное упрочнение. По результатам испытания данных отливок, подвергнутых ГИП по режиму 2 без термической обработки, установлено, что среднее значение предела прочности при растяжении составляет 1038 МПа и соответствует литературным научно-техническим данным [4, 21], а также расчетным значениям, выполненным с учетом корректировки химического состава.

Заключения

Исследовано влияние режимов литья на структуру отливок из сплава ВТ40Л. Установлено, что в исследованных диапазонах температура подогрева литейной керамической формы, а также температура расплава при заливке, существенного влияния на структуру полученных отливок не оказывают. Скорость вращения центробежного стола преимущественно влияет на формирование литейных дефектов типа неслитин.

Исследованы свойства отливок из сплава ВТ40Л после проведения ГИП и термической обработки по различным режимам. Установлено, что наилучший комплекс свойств достигается после ГИП при температуре 940 °С: предел прочности 990 МПа, предел текучести 930 МПа, предел выносливости 420 МПа, ударная вязкость 40 Дж/см².

Среднее значение предела прочности при растяжении, полученное после проведения корректировки химического состава – увеличения содержания кремния и углерода в пределах паспортных значений – повысилось и составило 1038 МПа.

Уровень механических свойств, получаемый на отливках из сплава ВТ40Л по выбранному режиму, позволяет рекомендовать его для применения в авиационной промышленности.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
4. Тарасенко Е.Н., Проходцева Л.В., Рудаков А.Г. Высокопрочный экономнолегированный титановый сплав с повышенной долговечностью для точного фасонного литья // Авиационные материалы и технологии. 2005. № 2. С. 37–42.
5. Путырский С.В., Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Крохина В.А. Исследование влияния различных режимов термической обработки на свойства полуфабрикатов и сварных соединений сплава ВТ22М // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-3-10.
6. Крохина В.А., Путырский С.В., Грибков М.С. Исследование структуры и механических свойств сварных соединений из титанового сплава ВТ22М // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-52-62.
7. Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Панин П.В., Новак А.В. Технологическая пластичность, структура и фазовый состав опытного титанового орто-сплава, содержащего 13 % (по массе) алюминия // Труды ВИАМ. 2015. № 12 (36). Ст. 08. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 08.09.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-8-8.
8. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС; МАТИ, 2009. 520 с.
9. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевых сплава МЛ19 в литом и термообработанном состояниях // Авиационные материалы и технологии 2020. № 2 (59). С. 17–24. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.09.2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
10. Panin P.V., Zavadov A.V., Lukina E.A. Effect of thermal exposure on microstructure evolution and mechanical properties of cast beta-solidifying TiAl-based alloy doped with Gd // Intermetallics. 2022. Vol. 145. Art. 107534. DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107534.
11. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 7–17.

12. Макушина М.А., Кочетков А.С., Виноградов И.Д. Статистическая оценка однородности химического состава слитков вакуумно-дугового переплава из экономнолегированного титанового сплава ВТ40Л // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.09.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11- 27-36.
13. Кочетков А.С., Панин П.В., Ночовная Н.А., Макушина М.А. Исследование химической неоднородности слитков бета-затвердевающего TiAl-сплава вариативного состава // Металлург. 2020. № 9. С. 93–100.
14. Дуюнова В.А., Оглодков М.С., Путырский С.В., Кочетков А.С., Зуева О.В. Современные технологии выплавки слитков титановых сплавов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
15. Добаткин В.И., Аношкин Н.Ф., Андреев А.Л., Бочвар Г.А., Мусатов М.И., Тетюхин В.В., Чистяков Е.П. Слитки титановых сплавов. М.: Металлургия. 1966. 287 с.
16. Панин П.В., Ночовная Н.А., Каблов Д.Е., Алексеев Е.Б., Ширяев А.А., Новак А.В. Практическое руководство по металлографии сплавов на основе титана и его интерметаллидов: учебное пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2020. 200 с.
17. Белов В.Д., Фадеев А.В., Иващенко А.И., Бельтюкова С.О. Вакуумная плавка и производство фасонных отливок из титана и титановых сплавов. М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. 107 с.
18. Братухин А.Г., Бибииков Е.Л., Глазунов С.Г. и др. Производство фасонных отливок из титановых сплавов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ВИЛС, 1998. 293 с.
19. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд., с изм. и доп. М.: ВИАМ, 2019. 316 с.
20. Сергеев В.В., Галицкий Н.В., Киселев В.П., Козлов В.М. Металлургия титана. М.: Металлургия, 1971. 320 с.
21. Ясинский К.К., Тарасенко Е.Н. Новый высокопрочный литейный титановый сплав ВТ40Л // Авиационные материалы и технологии. 2007. № 1. С. 58–60.
22. Колачев Б.А., Елисеев Ю.С., Братухин А.Г., Талалаев В.Д. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники. М.: МАИ, 2001. 412 с.
23. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2010. Т. 6: Титановые сплавы. 96 с.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Report XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 24.
2. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
3. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
4. Tarasenko E.N., Prokhodtseva L.V., Rudakov A.G. High-strength economically alloyed titanium alloy with increased durability for precision shaped casting. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2005, no. 2, pp. 37–42.
5. Putyrskiy S.V., Yakovlev A.L., Nochovnaya N.A., Krokhnina V.A. Research of different heat treatment modes influence on properties of semi-finished products and welded joints from titanium alloy ВТ22М. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-3-10.
6. Krokhnina V.A., Putyrskiy S.V., Gribkov M.S. Analysis of structure and mechanical properties of welded joint from titanium alloy ВТ22М. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 08, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-52-62. (дата обращения: 08.09.2023).
7. Alekseev E.B., Nochovnaya N.A., Panin P.V., Novak A.V. Technological plasticity, structure and phase composition of a pilot titanium ortho alloy with 13 wt. pct. aluminum. *Trudy VIAM*, 2015, no. 12, paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 08, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-8-8.

8. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanium alloys. Composition, structure, properties: reference book*. Moscow: VILS; MATI, 2009, 520 p.
9. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
10. Panin P.V., Zavodov A.V., Lukina E.A. Effect of thermal exposure on microstructure evolution and mechanical properties of cast beta-solidifying TiAl-based alloy doped with Gd. *Intermetallics*, 2022, vol. 145, art. 107534. DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107534.
11. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
12. Makushina M.A., Kochetkov A.S., Vinogradov I.D. Statistical evaluation of the homogeneity of the chemical composition of vacuum-arc remelting ingots from economic alloy titanium VT40L. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 08, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11- 27-36.
13. Kochetkov A.S., Panin P.V., Nochovnaya N.A., Makushina M.A. Study of chemical heterogeneity of beta-hardening TiAl alloy ingots of variable composition. *Metallurg*, 2020, no. 9, pp. 93–100.
14. Duyunova V.A., Oglodkov M.S., Putyrskiy S.V., Kochetkov A.S., Zueva O.V. Modern technologies for melting titanium alloy ingots (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 08, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-30-40.
15. Dobatkin V.I., Anoshkin N.F., Andreev A.L., Bochvar G.A., Musatov M.I., Tetyukhin V.V., Chistyakov E.P. *Ingots of titanium alloys*. Moscow: Metallurgiy, 1966, 287 p.
16. Panin P.V., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryaev A.A., Novak A.V. *Practical guide to metallography of alloys based on titanium and its intermetallic compounds: textbook*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, 200 p.
17. Belov V.D., Fadeev A.V., Ivashchenko A.I., Beltyukova S.O. *Vacuum melting and production of shaped castings from titanium and thianium alloys*. Moscow: Publ. House of MISiS, 2013, 107 p.
18. Bratukhin A.G., Bibikov E.L., Glazunov S.G. et al. *Production of shaped castings from titanium alloys*. 2nd ed., rev. and add. Moscow: VILS, 1998, 293 p.
19. Nochovnaya N.A., Bazyleva O.A., Kablov D.E., Panin P.V. *Intermetallic alloys based on titanium and nickel*. Ed. E.N. Kablov. 2nd ed. Moscow: VIAM, 2019, 316 p.
20. Sergeev V.V., Galitsky N.V., Kiselev V.P., Kozlov V.M. *Titanium metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1971, 320 p.
21. Yasinsky K.K., Tarasenko E.N. New high-strength cast titanium alloy VT40L. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2007, no. 1, pp. 58–60.
22. Kolachev B.A., Eliseev Yu.S., Bratukhin A.G., Talalaev V.D. *Titanium alloys in the design and production of aircraft engines and aerospace equipment*. Moscow: MAI, 2001, 412 p.
23. *Aviation materials: reference book in 13 vols*. Ed. E.N. Kablov. 7th ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2010, vol. 6: Titanium alloys, 96 p.

Информация об авторах

Макушина Марина Александровна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кочетков Алексей Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Виноградов Илья Дмитриевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Marina A. Makushina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey S. Kochetkov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya D. Vinogradov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 14.09.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.09.2023.
The article was submitted 14.09.2023; approved and accepted for publication after reviewing 15.09.2023.