

УДК 669.046.516.2

С.А. Крылов¹, Е.В. Егоров¹, А.А. Макаров¹, М.А. Дружнов¹**ОСВОЕНИЕ ЛИГАТУР НА ОСНОВЕ ХРОМА
ПРИ ВЫПЛАВКЕ ЖАРОПРОЧНЫХ
НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ И СТАЛЕЙ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-13-22

Стремительный рост цен на шихтовые материалы, применяемые для выплавки жаропрочных никелевых сплавов и сталей, приводит к значительному удорожанию конечной продукции. С целью сдерживания роста цен на производимые полуфабрикаты во ФГУП «ВИАМ» совместно с металлургическими заводами отрасли проводят работы по опробованию и внедрению новых видов шихтовых материалов, способных заменить применяемые в настоящее время материалы высокой чистоты.

Рассмотрены материалы, опробованные взамен применяемых в настоящее время при выплавке сталей и сплавов с содержанием хрома, вольфрама и молибдена, производимых на отечественных предприятиях из сырья отечественного производства.

Ключевые слова: металлургия, хром, алюмотермия, лигатуры, дегазация, вакуумная индукционная выплавка, открытая дуговая выплавка, вакуумный дуговой переплав, механические свойства, металлография.

S.A. Krylov¹, E.V. Egorov¹, A.A. Makarov¹, M.A. Druzhnov¹**MASTERING CHROMIUM-BASED LIGATURES IN SMELTING
HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS AND STEELS**

The rapid rise in prices for charge materials used for smelting heat-resistant nickel alloy and steels leads to a significant rise in the cost of the final product. In order to curb the rise in prices for semi-finished products FSUE «VIAM» together with metallurgical plants of the industry, is carrying out work on testing and introducing new types of charge materials that can replace the currently used high-frequency materials.

The article discussed the materials tested instead of those currently used in the smelting of steels and alloys containing chromium, tungsten and molybdenum, produced at domestic enterprises from domestic raw materials.

Keywords: metallurgy, chromium, alumothermy, ligatures, degassing, vacuum induction smelting, open arc smelting, vacuum arc remelting, mechanical properties, metallography.

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

Применение чистых материалов при выплавке жаропрочных никелевых сплавов и специальных сталей обусловлено повышенными требованиями к эксплуатационным свойствам материалов, применяемых при создании авиационных газотурбинных двигателей, а также транспортных и стационарных газотурбинных установок, нагруженных деталей планера и шасси [1–4].

На металлургических заводах отрасли при выплавке сплавов и ряда специальных сталей для их легирования традиционно применяют чистые материалы, такие как вольфрам, молибден и хром (табл. 1), за исключением менее ответственных марок сталей, где применяют лигатуры тугоплавких элементов с железом.

Таблица 1

Пример состава металлозавалки при выплавке жаропрочных никелевых сплавов

Материал	Нормативная документация	Содержание элемента, % (по массе)
Никель первичный марки Н-1У	ГОСТ 849–2008	Основа
Хром металлический марки Х99Н1	ГОСТ 5905–2004	До 28
Вольфрам металлический	ТУ48-19-76–90	До 15
Молибден металлический марки МШ-В	ТУ48-19-102–82	До 15

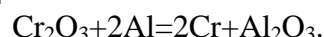
Применяемые в качестве шихтовых материалов молибденовые и вольфрамовые штабики изготавливают по многоступенчатой трудоемкой технологии, включающей следующие стадии:

- 1 – получение загрязненных концентратов, содержащих примеси других элементов;
- 2 – обжиг концентрата (для вольфрама – с предварительным выщелачиванием);
- 3 – получение чистых оксидов за счет выщелачивания аммиачной водой, получения раствора, его нейтрализации, выпаривания и проковки (гидрометаллургическое промышленное оборудование, необходимое для проведения указанных операций, в РФ практически отсутствует);
- 4 – восстановление оксидов в водороде, получение порошка металлов;
- 5 – прессование порошка с добавлением связующего в пресс-формах;
- 6 – предварительное спекание в атмосфере водорода;
- 7 – высокотемпературное спекание, в том числе с нагревом до 3000 °С и пропуском электрического тока через штабик.

Операции по восстановлению чистых оксидов порошков в среде водорода сопряжены как с высокой стоимостью процесса, так и со взрывоопасностью, сопровождающей применение водорода высокой концентрации в больших объемах. Указанные особенности производства в первую очередь приводят к формированию высокой стоимости чистых вольфрама и молибдена.

Как указано ранее, наряду с вольфрамом и молибденом, широко применяемым легирующим элементом в жаропрочных никелевых сплавах и специальных сталях является хром.

Так, хром основных марок Х99 получают алюмотермическим методом, представляющим собой процесс восстановления оксида хрома порошком алюминия первичного, присутствующего в качестве легирующего элемента в большинстве марок жаропрочных сплавов, по реакции



Такой метод не предусматривает дополнительной защитной среды, как при производстве вольфрамового и молибденового штабиков. Процесс представляет собой внепечную выплавку и проводится на открытом воздухе (реже в установках с разрежением) под защитой флюсов. Требования к продукции, получаемой этим методом, указаны в ГОСТ 5905–2004 (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав металлического хрома серии Х99

Марка металлического хрома	Содержание элементов, % (по массе)								
	Cr (не менее)	Si	Al	Fe	С	S	P	N	Cu
Х99Н1	99	0,2	0,5	0,5	0,01	0,02	0,005	0,01	0,005
Х99Н2	99	0,2	0,2	0,5	0,03	0,02	0,01	0,02	0,008
Х99Н4	99	0,2	0,2	0,5	0,03	0,02	0,02	0,04	0,01
Х99Н5	99	0,2	0,5	0,5	0,03	0,02	0,02	0,05	0,01
Х99	99	0,2	0,5	0,5	0,03	0,02	0,02	–	0,02

От производителя к производителю могут меняться чистота исходных компонентов, технология производства, процент извлечения и, как следствие, качество продукции.

Большинство производителей как хрома алюмотермического, так и вольфрама и молибдена, не обладают собственными мощностями (гидрометаллургическими цехами) по производству компонентов и технологиями для их производства: высокочистых оксидов и доочищенных от примесей стандартных оксидов, а используют либо зарубежное сырье, либо применяют при производстве недоочищенные концентраты и оксиды [5].

Так, в ООО «Молирен» разработаны технологии получения алюмотермическим методом вольфрам- и молибден-хромовых лигатур на базе гидрометаллургического цеха (с линией по доочистке исходных компонентов) и компетенций в области пирометаллургии.

Предложенный метод сочетает как основные преимущества, так и недостатки алюмотермического метода [6]. К преимуществам можно отнести высокую производительность, низкую себестоимость технологии производства по сравнению с технологиями, предполагающими очистку в среде водорода, и, как следствие, более низкую стоимость. Недостатком технологии является более низкое рафинирование материала по сравнению с технологией получения чистых вольфрама и молибдена, в первую очередь газов – кислорода и азота.

Производимые ООО «Молирен» хромсодержащие вольфрам- и молибден-хромовые лигатуры по уровню содержания примесей соответствуют хрому серии Х99Н1, несколько уступая металлическому молибдену и вольфраму (табл. 3).

Таблица 3

Химический состав хромсодержащих лигатур и металлических молибдена и вольфрама

Марка металла	Содержание элементов, % (по массе)											
	Mo	W	Si*	Al	Fe	C	S	P	Cu	O*	N*	
												не более
МХр-00	50–65	≤0,05	0,15	2,0	0,25	0,03	0,01	0,01	0,02	0,04	0,02	
ВХр-00	≤0,05	40–65	0,15	2,0	0,25	0,03	0,01	0,01	0,02	0,04	0,02	
МШ-В	Основа	≤0,5	–	0,02	0,04	0,01	0,01	0,005	0,005	0,008	0,001	
ШВ-В	≤0,3	Основа	0,04	0,3		0,015	0,008	0,005	0,002	0,003	–	

*В настоящее время в лигатурах МХр-00 и ВХр-00 ужесточены требования по содержанию примесей: кремния ≤0,05; кислорода ≤0,004 и ≤0,015; азота ≤0,003 и ≤0,01.

По результатам внедрения технологии производства и начала серийного производства вольфрам- и молибден-хромовых лигатур установлено, что экономический эффект по снижению стоимости на 1 кг чистого компонента (W, Mo) в лигатуре составил ~(1,5–2) долл., по сравнению с чистыми элементами, т. е. ~2000 долл. с тонны. Таким образом, при потребностях металлургических заводов в 6000–10000 кг вольфрама и молибдена в месяц экономия может составлять до 15–20 млн руб. в год.

Помимо низкой себестоимости положительный экономический эффект оказывает более низкая температура плавления лигатур по сравнению с чистыми тугоплавкими W и Mo (рис. 1), что ведет к существенному снижению затрат на электроэнергию, сокращению времени выплавки, обеспечивает быстрое расплавление и равномерное распределение элементов в расплаве [7]. Содержание вольфрама в лигатуре 40–65% (по массе), молибдена 50–65% (по массе) (рис. 1).

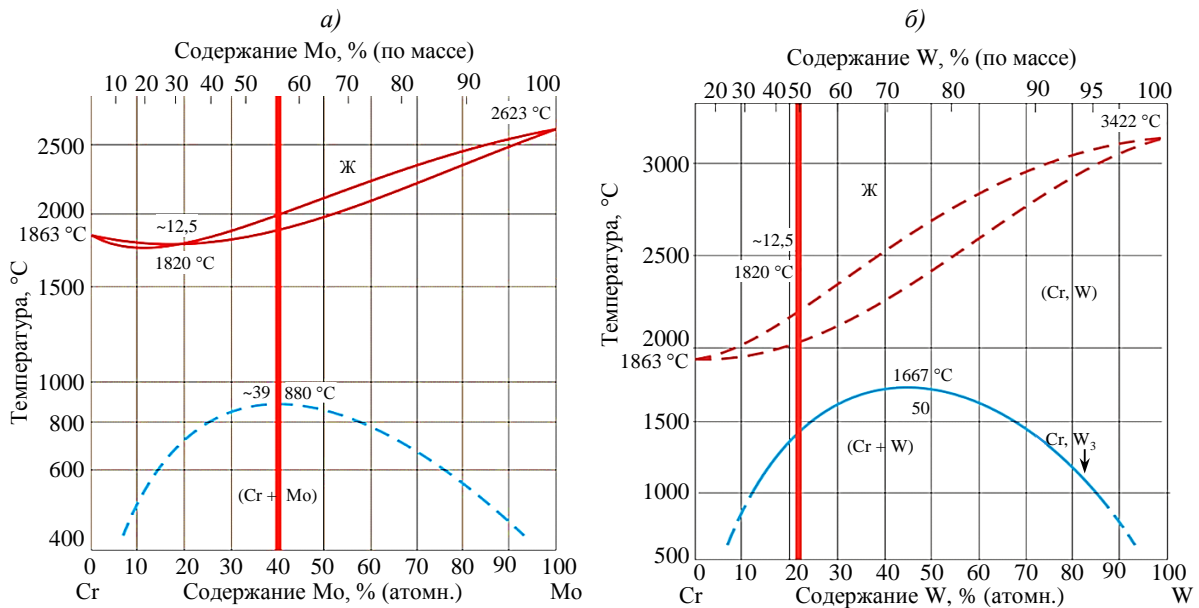


Рис. 1. Содержание молибдена в молибден-хромовой (а) и вольфрама в вольфрам-хромовой (б) лигатурах и температура плавления лигатуры

С целью освоения новых лигатур на основе хрома при выплавке жаропрочных никелевых сплавов и сталей проведено опробование указанных лигатур в условиях производств металлургических заводов отрасли – при выплавке как в открытых, так и в вакуумных печах.

Работа выполнена в рамках комплексного научного направления 10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [2].

Материалы и методы

Для исследования выбраны лигатуры марок МХр-00 и ВХр-00 производства ООО «Молирен». Определение примесного состава лигатур марок МХр-и ВХр-00 проводили на масс-спектрометре iCAPQe. Состав основных элементов лигатур определяли на атомно-эмиссионном анализаторе Agilent 5100 IPC-OES, содержание газовых примесей – на газовых анализаторах Лесо CS-600 (углерод, сера) и Лесо ТС-600 (кислород, азот).

Опробование лигатур проводили на мощностях предприятий ФГУП «ВИАМ», ЧФ ПАО «Уралкуз» и АО МЗ «Электросталь» на сталях и сплавах, выплавленных по серийным технологиям, включающим выплавку в открытых дуговых, плазменных, индукционных и вакуумных печах; вакуумный дуговой переплав (при необходимости); деформацию и изготовление полуфабрикатов и образцов. Все технологические процессы выполняли в соответствии с действующей на предприятиях нормативно-технической документацией.

Для выплавки лигатур выбраны следующие марки сплавов:

Сплав	Применяемая лигатура
ЭП708-ВД	МХр-00, ВХр-00
ЭП202-ВД	МХр-00, ВХр-00
ЭИ698-ВД	МХр-00
ЭП742-ИД	МХр-00

При расчете металлозавалки определяли потребность в «свежих» шихтовых материалах (лигатурах) таким образом, чтобы они обеспечивали расчетное содержание вольфрама и молибдена. Доводку до целевого содержания хрома при дошихтовке тугоплавких элементов (при необходимости в процессе выплавки) проводили «чистыми» хромом, вольфрамом и молибденом.

Исследуемый сортament – прутки диаметром от 14 до 210 мм.

Макроструктуру металла кованных прутков и поковок 15 плавок контролировали на поперечных темплетах методом травления в подогретом растворе соляной и азотной кислот.

Механические свойства при комнатной температуре и длительную прочность металла опытных плавок контролировали на продольных образцах, изготовленных из перекованных проб.

Сравнительный анализ механических свойств опытных и серийных плавок производили по результатам испытаний продольных образцов, изготовленных из проб.

Микроструктуру горячедеформированных прутков из сталей и сплавов исследовали на оптическом микроскопе AXIO Imager A1 на шлифах, вырезанных из прутков диаметром от 14 и 210 мм в продольном направлении. Травление проводили электролитическим методом.

Контроль на загрязненность неметаллическими включениями проводили на оптическом микроскопе Leica с цифровой камерой VEC-335 по ГОСТ 1778–70, вариант Ш4 (поле зрения при увеличении $\times 100$, продольное направление), по следующим видам: точечные и строчечные оксиды, нитриды и карбонитриды.

Испытания при растяжении и на длительную прочность проводили на цилиндрических образцах с рабочей частью диаметром $d=5$ мм и длиной $l=5d$ по ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 10145–81 соответственно.

Предел прочности при растяжении при температуре 20 °С определяли на испытательных машинах Zwick/Roell Z400 и ИР-5113 по ГОСТ 1497–84.

Результаты и обсуждение

Перед опробованием лигатур в условиях металлургических заводов отрасли во ФГУП «ВИАМ» проведена арбитражная оценка содержания примесей в лигатурах ВХр-00 и МХр-00. Проведенный химический анализ показал наличие примесей цветных металлов (As, Sn, Sb, Pb, Bi, Cd и некоторых других) в диапазоне от 0,00001 до 0,0005% (по массе), что находится на уровне требований как к алюмотермическому хрому, так и к чистым вольфраму и молибдену [8]. Содержание остальных элементов представлено в табл. 4.

Таблица 4

Содержание основных легирующих элементов и примесей в арбитражных пробах лигатур МХр-00 и ВХр-00

Лигатура	Содержание элементов, % (по массе)										
	Cr	Mo	W	Al	C	S	O	N	Cu	Fe	Si
МХр-00	Основа	56,7	–	2,61	0,023	0,0026	0,010	0,019	0,0047	0,16	0,12
ВХр-00	Основа	–	44,5	0,90	0,010	0,0012	0,012	0,019	0,0002	0,085	0,16

Оценивали: усвоение легирующих элементов; содержание газов, примесей и неметаллических включений, а также микроструктуру сплавов, в сравнении с серийно применяемыми материалами. Расчет усвоения легирующих элементов (в %) проводили по формуле

$$K = \frac{n_{\text{факт}}}{n_{\text{расч}}} \cdot 100 \%,$$

где $n_{\text{расч}}$, $n_{\text{факт}}$ – содержание легирующего элемента расчетное и фактическое соответственно.

По результатам предоставленных для обработки поплавочных статистических данных построена усредненная диаграмма усвоения легирующих элементов в зависимости от способа их введения: чистыми шихтовыми материалами и совместным введением лигатуры с чистыми материалами [9, 10]. Проведен расчет усвоения каждого из легирующих элементов в каждой из плавков и рассчитано среднее значение усвоения (рис. 2). Из полученной диаграммы видно, что разница в процентном усвоении легирующих элементов не превышает 1% и находится на одном уровне для обоих способов введения.

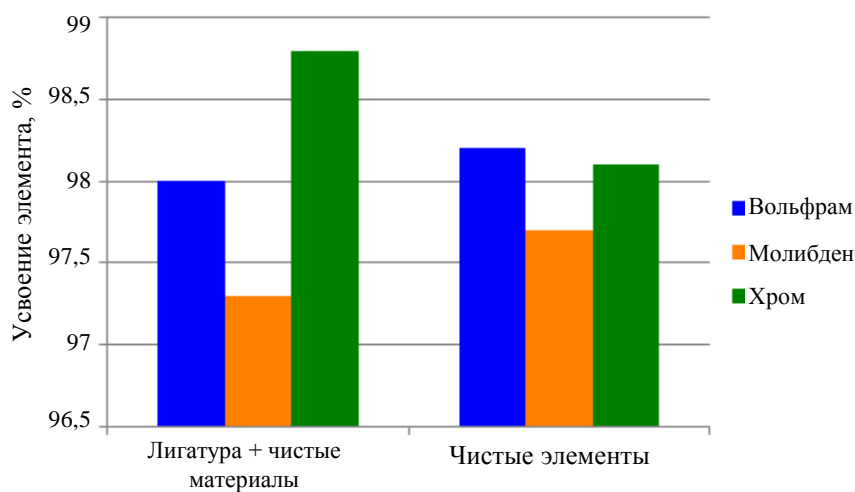


Рис. 2. Усвоение вольфрама, молибдена и хрома в зависимости от способа их введения

При обработке данных не обнаружено существенного различия в степени усвоения в зависимости от способа выплавки в открытых дуговых, плазменных, индукционных или вакуумных печах [10]. Процент усвоения при выплавке в открытых дуговых печах снижался для обоих способов введения легирующих элементов и незначительно повышался при выплавке в вакуумных печах.

Содержание примесей кремния, железа, фосфора находится на уровне содержания в серийном металле и обеспечивает требования, предъявляемые к сплавам ЭП708-ВД, ЭП202-ВД, ЭИ698-ВД и ЭП742-ИД. При выплавке сплава ЭИ698-ВД отмечено более низкое содержание мышьяка, чем в серийном металле, содержание остальных элементов (Sn, Sb, Pb, Bi) находится на уровне содержания в серийном металле (табл. 5).

Таблица 5

Содержание примесей в опытном и серийном металле сплава ЭИ698-ВД

Металл	Содержание элементов*, % (по массе)				
	Si	Pb	Sn	Sb	As
Серийный	<u>0,20–0,36</u> 0,27	<u>0,00010–0,00076</u> 0,00028	<u>0,00015–0,00048</u> 0,00031	<u>0,00010–0,00027</u> 0,00013	<u>0,00020–0,00090</u> 0,00041
Опытный	<u>0,23–0,27</u> 0,24	<u>0,00014–0,00029</u> 0,00019	<u>0,00025–0,00039</u> 0,00034	<u>0,00010–0,00022</u> 0,00014	<u>0,00020–0,00034</u> 0,00021

*В числителе – минимальное и максимальное значение, в знаменателе – среднее.

Исследование содержания газов ([N], [O]) в металле серийно производимых сплавов ЭП708-ВД, ЭП202-ВД, ЭИ698-ВД и ЭП742-ИД показало, что в экспериментальных плавках, выплавленных с применением вольфрамовой и молибденовой лигатур, содержание газов находится на уровне средних значений их содержания в серийно производимом металле, что представлено на диаграммах (рис. 3) [11].

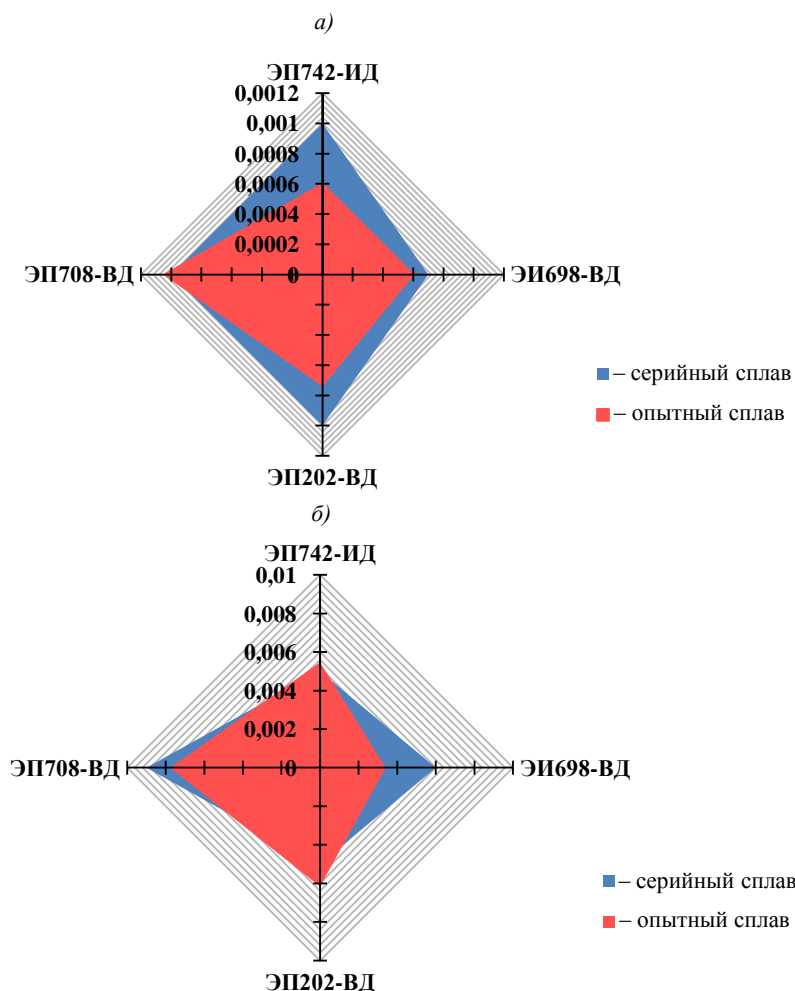


Рис. 3. Содержание (в % (по массе)) кислорода (а) и азота (б) в сплавах, выплавленных с применением вольфрам- и молибден-хромовых лигатур

Следует отметить, что основное влияние на механические свойства сплавов оказывает не само количество, содержащихся в металле газовых примесей, а образуемые ими соединения – неметаллические включения, их объемная доля, форма и распределение [12]. При оценке качества металла из прутков сталей и сплавов изготавливали образцы в продольном направлении и на них оценивали присутствие точечных и строчечных оксидов, сульфидов и нитридов. Влияние неметаллических включений особенно проявляется в нагруженных узлах – дисках турбин и компрессоров, силовых кольцах и других деталях, работающих при температурах до 800 °С.

Так, качественная оценка неметаллических включений в сплаве ЭП742-ИД соответствует ГОСТ 1778–70, а содержание таких включений оценено нулевым баллом [13].

Для количественной оценки доли неметаллических включений (табл. 6) проводили обработку изображений с помощью программы ImageJ с открытым исходным кодом путем бинаризации и последующего обсчета, т. е. перевода изображения из

монокромного цвета в черные и белые тона для качественного подсчета фазовых составляющих (неметаллических включений) в структуре матрицы.

Таблица 6

**Объемная доля неметаллических включений
в жаропрочных сплавах с применением лигатур и без них**

Сплав		Объемная доля неметаллических включений, %					СКО*
ЭП742-ИД	с лигатурами	0,17	0,2	0,13	0,16	0,13	4,83
	без лигатур	0,15	0,17	0,21	0,18	0,15	4,80
ЭИ698-ВД	с лигатурами	0,14	0,18	0,17	0,16	0,21	4,78
	без лигатур	0,19	0,22	0,17	0,21	0,18	4,81

*Среднее квадратическое отклонение.

На рис. 4 представлены изображения структуры сплавов ЭП742-ИД и ЭИ698-ВД, выплавленных как с использованием новых лигатур, так и без них. Видно, что сплавы с применением лигатур и без них имеют абсолютно схожую структуру [14]. Размер многих зерен составляет 250 мкм. Зерна аустенита разделены малоугловыми границами.

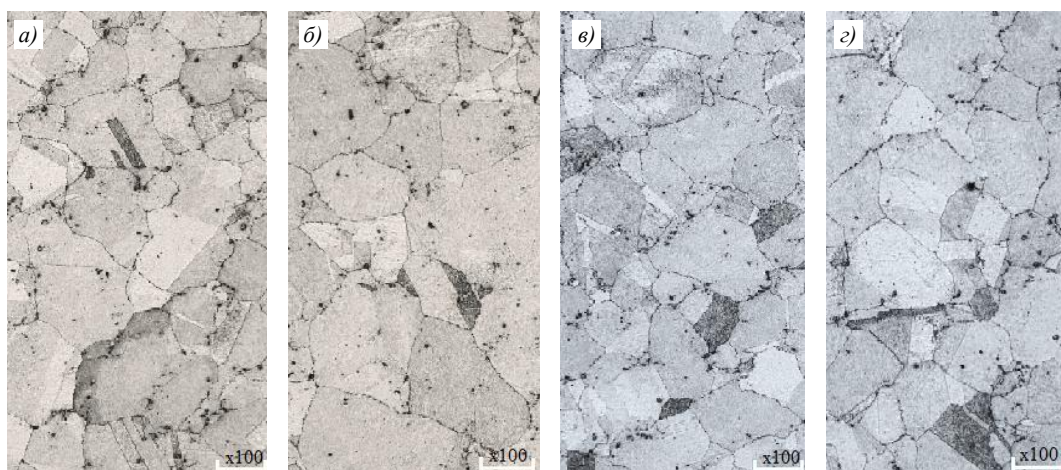


Рис. 4. Микроструктура сплавов ЭП742-ИД (а, в) и ЭИ698-ВД (б, г), выплавленных по серийной технологии (а, б) и с введением молибден- и вольфрам-хромовых лигатур (в, г).

Оценку влияния содержания газов и примесей на длительную прочность проводили при испытании по ГОСТ 10145–81 образцов с надрезом и без надреза, при этом с максимально предусмотренной по ТУ нагрузкой (табл. 7), в том числе при повышенных температурах испытаний (650 и 750 °С).

Таблица 7

**Средние значения длительной прочности для сплава ЭП742-ИД,
выплавленного с применением молибден-хромовой лигатуры**

Тип образца	Температура испытания, °С	Напряжение, МПа	Длительная прочность – время до разрушения, ч
Без надреза	650	834	423
	650	834	399
	750	539	132
С надрезом*	650	834	>388
	650	834	>288
	650	834	>288

*Образцы сняты без разрушения.

Для исследования прочностных свойств выбран сплав ЭП742-ИД, выплавленный с использованием молибден-хромовой лигатуры. На данном сплаве время до разрушения (долговечность) под действием заданного напряжения и нормы времени, устанавливаемой стандартом или техническими условиями, составляет не менее 100 ч при 650 °С и не менее 50 ч при 750 °С соответственно.

Испытания на длительную прочность показали, что сплав ЭП742-ИД, выплавленный с использованием молибден-хромовой лигатуры, полностью соответствует данным требованиям на всех образцах – как на гладких, так и с надрезом (образцы с надрезом сняты с испытаний без разрушения) [15]. Значения длительной прочности находятся на одном уровне со значениями серийного сплава.

Заключения

В работе проведены исследования по выявлению неметаллических включений в жаропрочных сплавах ЭП742-ИД и ЭИ698-ВД, показана их качественная и количественная оценка. Установлено, что объемная доля включений в сплавах с применением лигатур сопоставима с объемной долей включений в сплавах, выплавленных без применения лигатур.

Рассмотрена микроструктура сплавов и экспериментально доказано, что использование хромовых лигатур никак не повлияло на размер зерен и общую морфологию структур полученных слитков.

Проведенные исследования подтвердили, что сплавы, полученные с применением молибден- и вольфрам-хромовых лигатур в жаропрочных сплавах, по своим свойствам и механическим характеристикам полностью соответствуют требованиям стандартов и находятся на одном уровне со значениями для выпускаемых серийных сплавов, а с точки зрения экономических показателей даже превосходят их.

Благодарности

Авторы выражают благодарность заместителю генерального директора ООО «Молирен» Р.А. Джамалдинову за существенный вклад при проведении работ и оформлении данной статьи.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационное развитие – важнейший приоритет государства // *Металлы Евразии*. 2010. №2. С. 6–11.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // *Крылья Родины*. 2012. №3–4. С. 34–38.
4. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Каблов Д.Е. Высокоэффективные технологии и современное оборудование для производства шихтовых заготовок из литейных жаропрочных сплавов // *Металлург*. 2012. №5. С. 26–30.
5. Zachery C.L. A computational investigation of the effect of alloying elements on the thermodynamic and diffusion properties of FCC Ni alloys with application on the creep rate of dilute Ni-X alloys: PhD Degree. Pennsylvania University, 2012. P. 163–165.
6. Волков А.М., Карашаев М.М., Бакрадзе М.М., Пустынников Т.О. Альтернативные технологии повышения механических свойств гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2019. №8 (80). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-3-8.

7. Базылева О.А., Оспенникова О.Г., Аргинбаева Э.Г., Летникова Е.Ю., Шестаков А.В. Тенденции развития интерметаллидных сплавов на основе никеля // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 104–115. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104-115.
8. Крылов С.А., Щербаков А.И., Макаров А.А., Тонышева О.А. Снижение содержания неметаллических включений в коррозионностойкой азотсодержащей стали // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2017. №5 (53). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-1-1.
9. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
10. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 36–52.
11. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 52–57.
12. Jeandin M., Bienvenu Y., Kounty J.L. Liquid phase sintering of nickel base superalloys // *Superalloys*. 1984. No. 87. P. 467–476.
13. Орыщенко А.С. Жаростойкие жаропрочные сплавы. СПб.: Наука, 2011. 189 с.
14. Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении: учеб. пособие: в 2 ч. М.: МИСИС, 1979. Ч. 2. 67 с.
15. Choren J.A., Heinrich S.M., Silver-Thorn M.B. Young's modulus and volume porosity relationships for additive manufacturing applications // *Journal of Materials Science*. 2013. Vol. 48. P. 5103–5112.