

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЛИТКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ ПЕРЕПЛАВОМ КОНДИЦИОННЫХ ВОЗВРАТНЫХ ОТХОДОВ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЖС26-ВИ

В. В. Клочихин¹, Н. И. Гречанюк², Ю. А. Смашнюк³,
И. Н. Гречанюк³, В. В. Наумик⁴

¹АО «Мотор Сич».

69068, г. Запорожье, просп. Машиностроителей, 15. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

²Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины.

03680, г. Киев-142, ул. Кржижановского, 3. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

³Научно-производственное предприятие «Элтехмаш».

21011, г. Винница, ул. Ватутина, 25. E-mail: vin25ebt@ukr.net

⁴Запорожский Национальный технический университет.

69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64. E-mail: naumik@zntu.edu.ua

Исследованы структура и физико-механические свойства слитков, полученных электронно-лучевым переплавом кондиционных возвратных отходов жаропрочного сплава ЖС26-ВИ. Проведена сравнительная оценка свойств сплавов, полученных из возвратных отходов, и стандартных сплавов, выплавленных из чистых шихтовых материалов в вакуумной печи способом равноосной кристаллизации. Показано, что свойства сплавов, полученных по двум вышеуказанным способам, сравнимы и соответствуют требованиям ТУ. Библиогр. 3, табл. 8, ил. 11.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; жаропрочные сплавы; возвратные отходы; структура; физико-механические свойства

Введение. Как известно, свойства металлических сплавов главным образом определяются их химическим составом и содержанием в них газов и примесей. Для рафинирования металлов и сплавов часто применяют их переплав. Материалы высокой чистоты получают путем переплава в вакууме с помощью электронного пучка. В отличие от вакуумной дуговой плавки при электронно-лучевом переплаве легко устанавливать скорость плавки и подводимую электрическую мощность независимо друг от друга, тем самым варьируя температуру материала и время его пребывания в расплавленном состоянии [1]. Исходя из этого, электронно-лучевой переплав является наиболее эффективным технологическим процессом переплава сложных по своему составу отходов сплавов с жесткими допусками по составу легирующих компонентов. К ним относятся отходы жаропрочных сплавов. В литейном производстве они представляют собой технологически неизбежный остаток исходного сплава, не вошедший в массу годных отливок. Высокая стоимость первичных жаропрочных сплавов обусловила появление тенденции использования при шихтовке плавки для литья лопаток отходов литейного производства, что позволило снизить себестоимость продукции [2].

Системные исследования по рафинированию отходов жаростойких сплавов ИС70-ВИ, ИС88У-ВИ для литья лопаток стационарных ГТД и ЖСЗДК-ВИ, ЖС26-ВИ для литья лопаток авиационных ГТД с использованием совмещенного индукционного и электронно-лучевого нагрева выполнены в работах [2, 3].

Исходными материалами для плавки при совмещенных вакуумно-индукционной плавке (ВИП) и электронно-лучевой плавке (ЭЛП) служили заготовки после переплава кондиционных отходов жаропрочных сплавов массой до 9,5 кг способом ВИП.

Режимы плавки при совмещенном электронно-лучевом нагреве следующие: температура расплава в тигле при ВИП около 2023 К, выдержка — 21 мин, обработка электронным лучом жидкого расплава в тигле — 5 мин.

Анализ полученных данных свидетельствует, что составы всех полученных образцов сплавов соответствуют установленным требованиям. Совмещенная плавка обеспечивает рафинирование сплавов от свинца, кислорода, азота. Наблюдается также тенденция снижения фосфора. В то же время в выплавленных по данной двухстадийной технологии заготовках диаметром 90 мм наблюдается повышенное содержание газов в верхних частях,

что указывает на необходимость усовершенствования процесса формирования заготовок.

Электронно-лучевой переплав с промежуточной емкостью с порционной подачей и выдержкой жидкого металла в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе обеспечивает более эффективное рафинирование от газов, легкоплавких металлических и неметаллических примесей [1], чем это происходит в фиксированном объеме расплава [2, 3]. Следует отметить, что с увеличением объема расплава степень его рафинирования при фиксированных выдержках уменьшается.

Данная работа посвящена оптимизации технологии переплава кондиционных отходов жаропрочного сплава ЖС26-ВИ с использованием технологической схемы с промежуточной емкостью.

Техника эксперимента и методики исследования. Переплав кондиционных отходов жаропрочного сплава ЖС26-ВИ проводили на промышленной электронно-лучевой установке УЭ-174 конструкции ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, модернизированной в НПП «Элтехмаш», г. Винница. Общий вид и технологическая схема установки приведены на рис. 1. В состав установки (рис. 1, б) входят: рабочая камера 1, в верхней части которой на медной водоохлаждаемой плите размещены четыре плоско-лучевых электронных нагревателя 3 мощностью по 100 кВт каждый с отдельной откачкой катодно-анодного узла. К боковой стенке рабочей камеры 1 пристыкован механизм подачи шихты под плавку (на рисунке не показан). В рабочей камере размещены два медных водоохлаждаемых тигля: прямоугольной формы с внутренними размерами 320×170×50 мм, ко-

торый в технологическом процессе используется как промежуточная емкость 6 и цилиндрический диаметром 100 мм 7, служащий непосредственно для формирования слитка. Внизу рабочей камеры на одной оси с цилиндрическим кристаллизатором пристыковано нижнюю камеру с механизмом вытягивания слитка 9. Рабочая камера оснащена двумя стробоскопическими системами для визуального контроля за ходом переплава 4.

Вакуумная система установки обеспечивает раздельную откачку с рабочей камеры и камеры пушек и оснащена насосами: диффузионным паромасляным насосом Н-400, двумя бустерными паромасляными НВ5М-400, одним НВБМ-250 и форвакуумным АВЗ-125. Средний уровень вакуума в зоне плавки $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па, камере пушек $5 \dots 6 \cdot 10^{-3}$ Па. В состав установки входят также другие узлы и механизмы, обеспечивающие ее работоспособность.

Исходными материалами для переплава служили слитки кондиционных отходов сплава ЖС26-ВИ после вакуумно-индукционного переплава диаметром 90 мм и длиной до 500 мм. Общее количество поставленного сплава 280 кг.

Усредненный химический состав слитков после вакуумно-индукционного переплава следующий, мас. %: 4,9 Cr; 8,9 Co; 0,92 Mo; 11,65 W; 5,9 Al; 0,93 Ti; 1,5 Nb; 0,98 V; 0,15 C; 0,06 Fe; 0,12 Si; 0,009 Mn; 0,007 S; 0,004 P; 0,018 B; 64,1 Ni; O и N не определяли.

Входной контроль химического состава исходных слитков проводили на мультиэлементном экспрессанализаторе состава сплавов «EXPERT-3L».

На первом этапе переплава необходимое количество слитков помещали в камеру бокового механизма подачи шихтовых материалов и сплавляли в

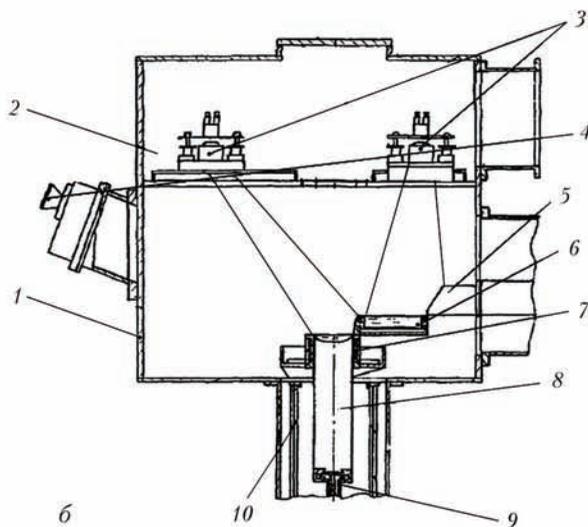
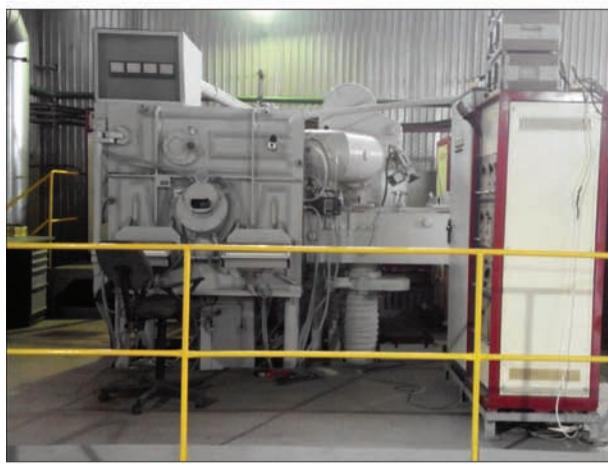


Рис. 1. Общий вид (а) и схема установки УЭ-174 (б): 1 — рабочая камера; 2 — камера пушек; 3 — электронные пушки; 4 — смотровая система; 5 — шихтовая заготовка; 6 — промежуточная емкость; 7 — медный водоохлаждаемый тигель (кристаллизатор); 8 — выплавленный слиток; 9 — поддон для формирования и вытягивания слитка; 10 — теплоотражающий экран

Таблица 1. Химический состав заготовки-отливки диаметром 97 мм, полученной из возврата сплава ЖС26-ВИ способом ЭЛП, мас. %

Место отбора пробы	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Fe
Верх	0,137	4,70	8,96	11,50	6,10	1,02	1,00	0,06
Середина	0,129	4,94	9,03	11,53	5,74	0,90	1,00	0,06
Низ	0,132	4,94	9,03	11,53	5,74	0,90	1,00	0,06
ТУ1-92-177-91	0,12...0,17	4,3...5,3	8,7...9,3	11,2...12,0	5,6...6,1	0,8...1,2	0,8...1,2	≤0,5

Окончание табл. 1

Место отбора пробы	Nb	V	Ni	Si	Mn	S	P	O ₂	N ₂
Верх	1,43	0,90	Основа	<0,2	<0,3	0,003	0,003	0,00068	0,00109
Середина	1,64	0,91	->-	<0,2	<0,3	0,003	0,003	0,00070	0,00106
Низ	1,64	0,91	->-	<0,2	<0,3	0,003	0,003	0,00074	0,00105
ТУ1-92-177-91	1,4...1,8	0,8...1,2	->-	≤0,2	≤0,3	≤0,005	≤0,010	≤0,002	≤0,002

промежуточную емкость. При проведении плавки одновременно были задействованы три электронно-лучевых нагревателя. Одним из них сплавляли исходные слитки (ток луча 2,2...2,4 А), двумя другими с помощью разверток (ток луча 0,8...0,9 А) поддерживали постоянный уровень жидкой ванны в промежуточной емкости глубиной 3...5 мм. Таким образом, при постоянной подаче слитков в зону плавки одновременно происходили наполнение и плавная кристаллизация жидкого металла в промежуточной емкости. Слябы размерами 320×170×50 мм формировали в течение 25...30 мин.

Рафинирование сплава происходило вследствие фракционной дистилляции легкоплавких примесей, обезгаживания и удаления неметаллических включений. Полученные слябы извлекали из промежуточной емкости. На поверхности закристаллизованной ванны визуально наблюдали мелкие шлаковые включения и пленки, образованные вследствие всплытия оксидных включений при затвердевании сплава. Толщина пленок не превышала 50...70 мкм. Комплексный химический и рентгенофазовый анализ позволили определить их состав на поверхности сплава ЖС26-ВИ после первичного электронно-лучевого переплава и он следующий, мас. %: 96,45 Al₂O₃; 0,62 Y₂O₃; 0,51 Cr₂O₃; 0,27 La₂O₃; 0,8 NiO; 0,29 TiO₂; 0,4 Cr₂O₃; 0,3 Co₃O₄.

Анализ химического состава оксидов однозначно указывает на факт взаимодействия жидкого металла и формы при ее заливке, в состав которой преимущественно входит оксид алюминия.

Для удаления шлаковых включений и оксидных пленок поверхность сляба последовательно подвергали шлифованию и химическому травлению.

Таким образом было получено 12 заготовок в виде слябов массой более 20 кг каждый. Заготовки помещали в камеру бокового механизма пода-

чи шихтовых материалов и повторно сплавляли в промежуточную емкость. Сформированные заготовки второго переплава также подвергали шлифованию и химическому травлению.

На третьем этапе переработки заготовки сплавляли в промежуточную емкость и осуществляли выдержку жидкой ванны с незначительным перегревом (30...50 °С) в течение 8...12 мин для интенсификации процесса рафинирования с последующим сливом жидкого металла в водоохлаждаемый кристаллизатор диаметром 100 мм. Осуществляли порционный слив металла на поверхность жидкой ванны высотой 20...25 мм с выдержкой в жидком состоянии 2...3 мин. С использованием трехэтапной переработки получено 9 слитков длиной 390...488 мм, массой 23,0...31,3 кг. Чистой диаметр слитков после проточки составлял 94,5...97,5 мм.

Структуру, химический, фазовый состав, механические и жаропрочные свойства полученных материалов определяли по методикам принятия в АО «Мотор-Сич», г. Запорожье, Украина.



Рис. 2. Внешний вид поверхности заготовки-отливки диаметром 97 мм, полученной из возврата сплава ЖС26-ВИ способом ЭЛП: I — верхняя часть заготовки; II — средняя; III — нижняя

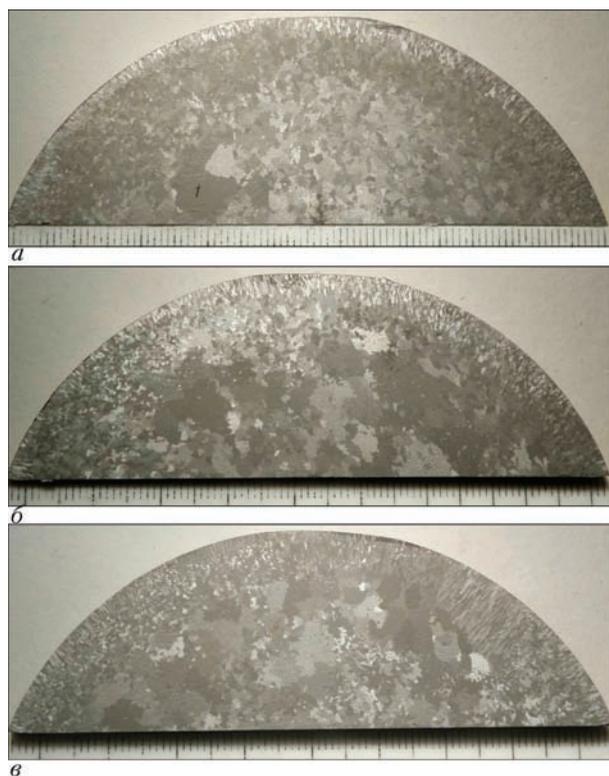


Рис. 3. Макроструктура в поперечном сечении заготовки диаметром 97 мм, полученной из возврата сплава ЖС26-ВИ способом ЭЛП: а — верх; б — середина; в — низ

Обсуждение результатов исследований. Для исследований выбрана прутковая заготовка после токарной обработки диаметром 97 мм (плавка Н2).

Химический состав поступившей заготовки, удовлетворительный и отвечает требованиям ТУ1-92-177-91 (табл. 1).

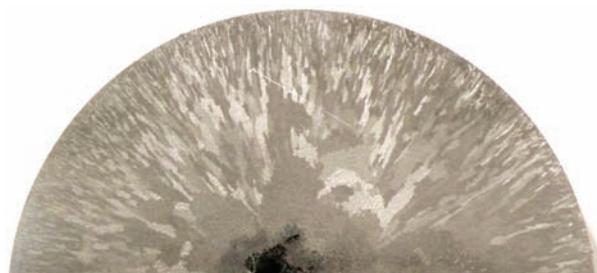


Рис. 4. Макроструктура в поперечном сечении средней части заготовки диаметром 80 мм из сплава ЖС26-ВИ

Поверхность заготовки-отливки чистая с наличием единичных лунок (рис. 2). На торцах заготовок имеются следы зачистки усадочных раковин и незначительные лунки.

Макроструктура в поперечном сечении верхней, средней и нижней частей заготовки, полученной из возврата сплава ЖС26-ВИ способом ЭЛП, представлена на рис. 3.

В структуре поступивших на исследование фрагментов заготовок-отливок наблюдаются кристаллизационные зоны мелких подкорковых, столбчатых и равноосных кристаллов.

Усадочная раковина, осевая усадочная рыхлота и пористость в центральной зоне исследуемых макротемплетов не выявлены.

Сравнительное исследование макроструктурного состояния материала проводили на исходной заготовке диаметром 80 мм из сплава ЖС26-ВИ (плавка 9Н6021/Н211) производства ОАО «СМКомпания» (г. Ступино), полученной в вакуумной печи способом равноосной кристаллизации.

Таблица 2. Параметры макроструктуры заготовки-отливки диаметром 97 мм (плавка Н2), полученной из возврата сплава ЖС26-ВИ способом ЭЛП и исходной заготовки 9Н6021/Н211

Исследуемая заготовка-отливка	Место отбора пробы	Размер кристаллизационных зон кристаллов, мм			Размер макрозерна, мм
		мелких подкорковых	столбчатых	равноосных	
ЭЛП	Верх	0,5...1,0	3...10	~ 78	0,75...5,0
	Середина	0,5...1,0	3...8	~ 78	0,3...5,0
	Низ	0,5...1,0	3...12	~ 78	0,3...4,0
9Н6021/Н211	Середина	1,5...2,0	14...18	44...52	3,0...5,0

Таблица 3. Размеры структурных составляющих в заготовке диаметром 97 мм из сплава ЖС26-ВИ

Место вырезки микрошлифа	Место замера	Размер структурных составляющих, мкм			Размер микропор, мкм (не более)	Расстояние между осями дендритов 2-го порядка, мкм
		эвтектика ($\gamma-\gamma'$)	карбиды типа MeC	оксиды (не более)		
Верх	Край	5...25	1,5...16	18	34	20...45
	Центр	10...56	2...23	19	44	40...65
Середина	Край	6...22	1,5...11	12	34	25...45
	Центр	10...40	2...14	21	46	45...60
Низ	Край	3...10	1,5...10	14	21	16...42
	Центр	5...40	2...8	24	30	34...53

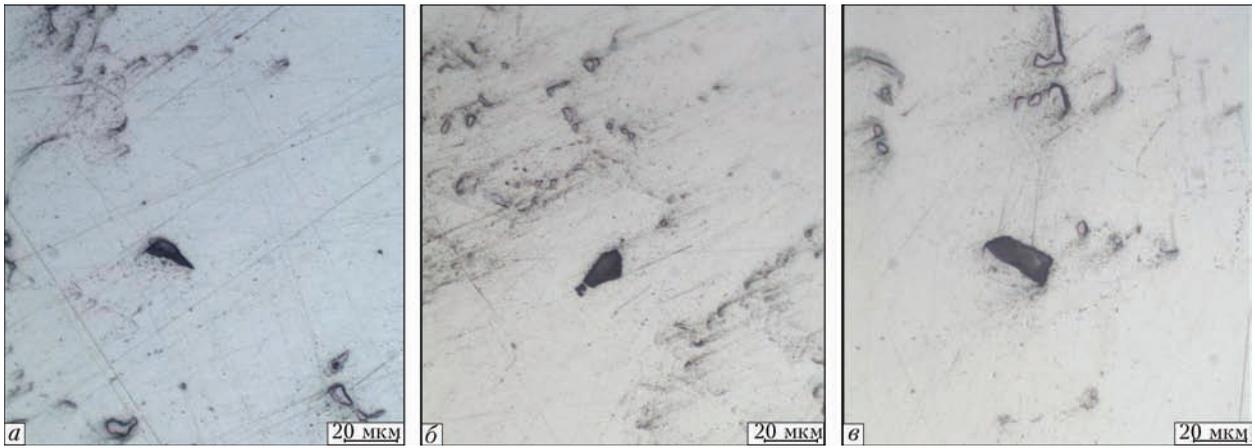


Рис. 5. Оксидные включения в прутковой заготовке диаметром 97 мм, полученной из возврата сплава ЖС26-ВИ способом ЭЛП: *a* — верх; *b* — середина; *c* — низ

В структуре заготовки-отливки плавки 9Н6021/Н211 производства «СМК» наблюдали аналогичные кристаллизационные зоны. Кроме того следует отметить, что в центральной зоне макротемплета, вырезанного из средней части прутковой заготовки,

имеется усадочная раковина диаметром до 15 мм, а также осевая усадочная рыхлота (рис. 4).

Результаты замера параметров макроструктуры исследуемых заготовок приведены в табл. 2.

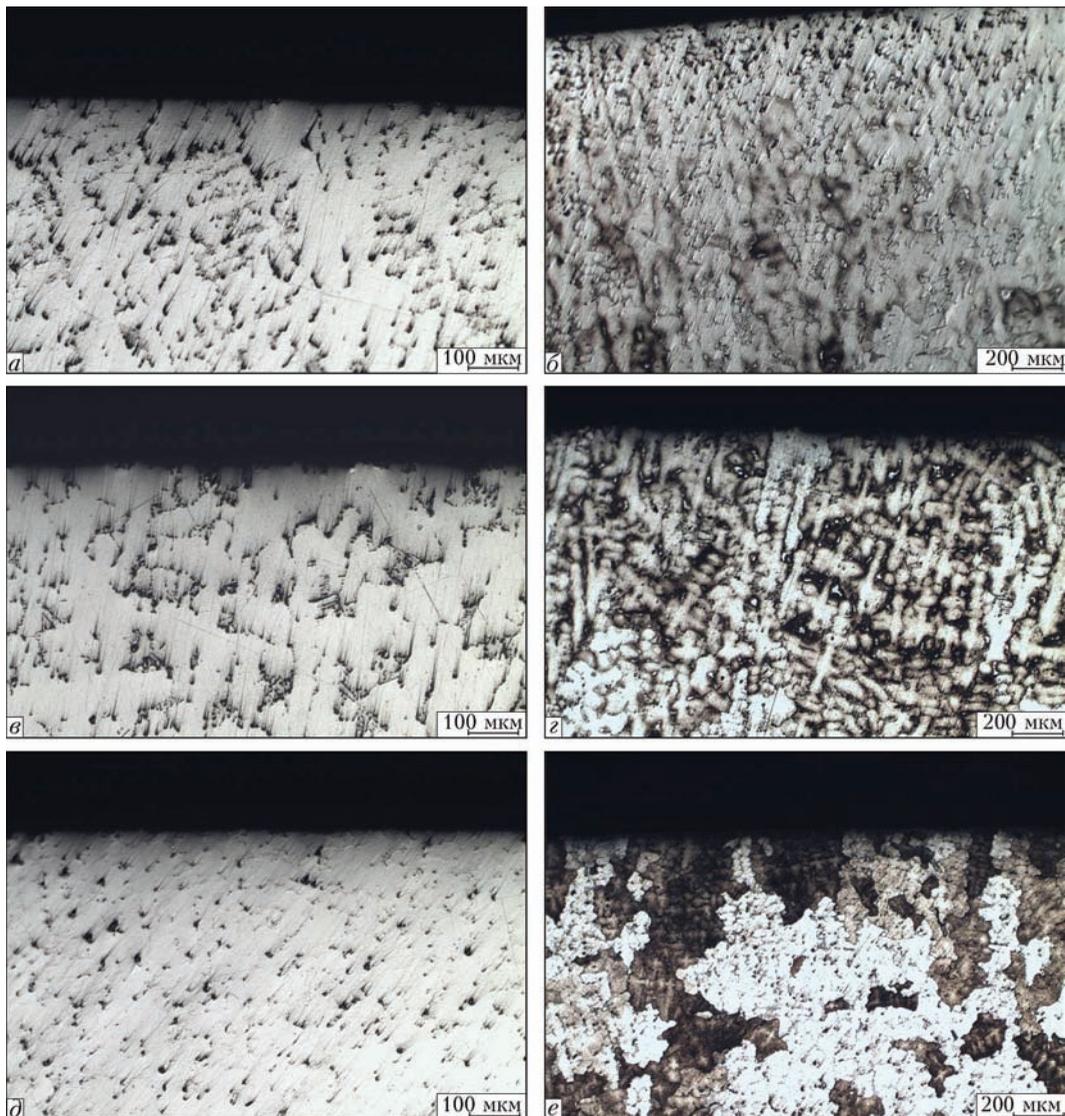


Рис. 6. Микроструктура в верхней (*a, б*), средней (*в, г*) и нижней (*д, е*) частях краевой зоны заготовки диаметром 97 мм, полученной из возврата сплава ЖС26-ВИ способом ЭЛП: *a, в, д* — до травления; *б, г, е* — после травления

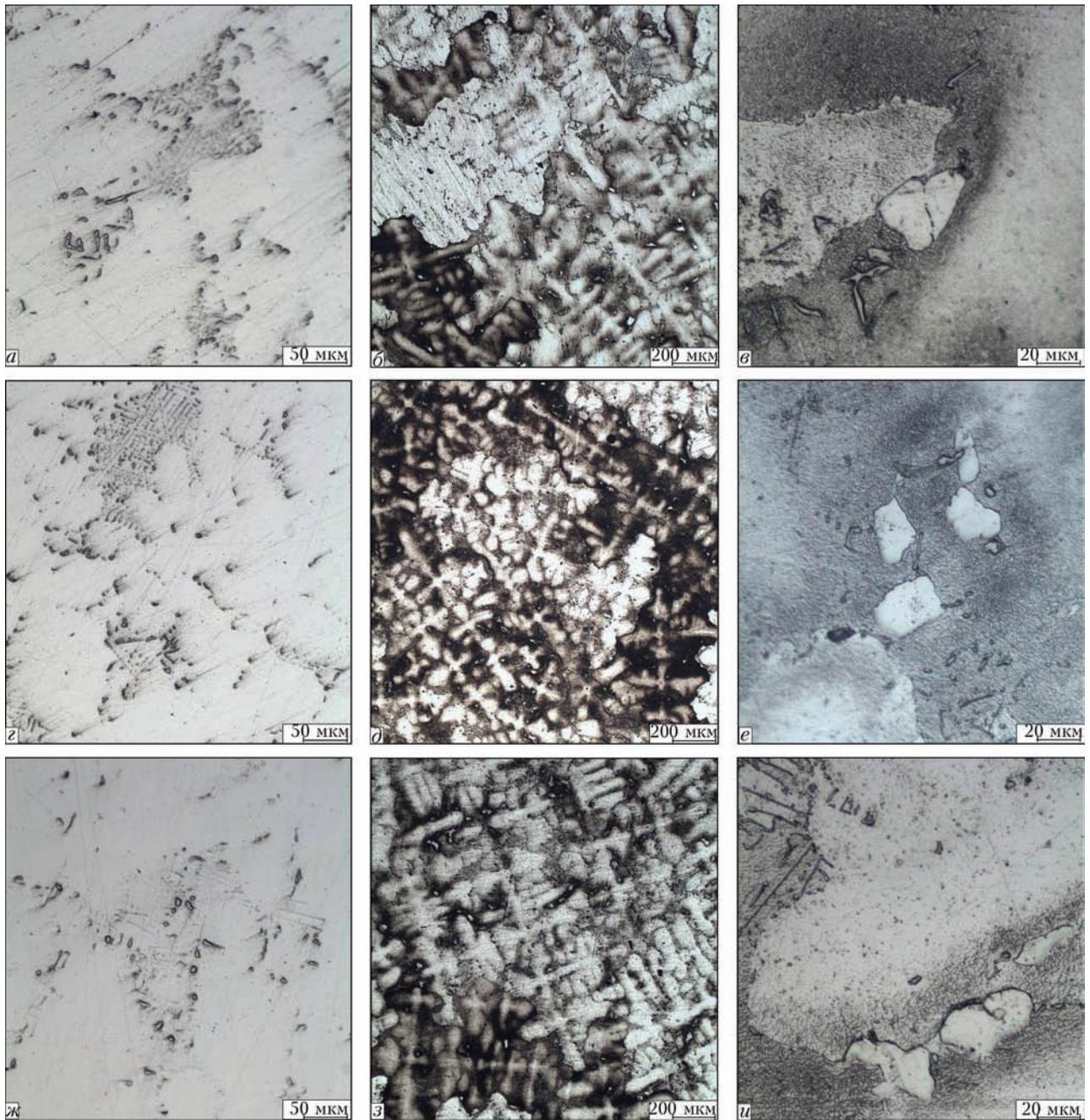


Рис. 7. Микроструктура в верхней (а-в); средней (з-е); нижней (ж-и) частях центральной зоны заготовки диаметром 97 мм, полученной из возврата сплава ЖС26-ВИ способом ЭЛП: а, з, ж — до травления; б, в, д, е, з, и — после травления

При металлографическом исследовании в материале заготовки диаметром 97 мм (ЭЛП) загрязнений металла в виде плен, грубых шлаковых включений и их скоплений не обнаружено. Размер редко встречающихся оксидов достигает 24 мкм (табл. 3, рис. 5).

Микроструктура представляет собой γ -твердый раствор с наличием интерметаллидной γ' -фазы, эвтектической (γ - γ')-фазы, карбидов, карбонитридов и соответствует литому состоянию сплава ЖС26-ВИ (рис. 6, 7).

Расстояние между осями дендритов 2-го порядка в краевой зоне (столбчатых кристаллов) примерно в 2 раза меньше, чем в центре заготовки-отливки и

уменьшается по высоте заготовки от верхней части к нижней (табл. 3). При этом следует отметить, что изменение размеров усадочной микропористости аналогично изменению расстояния между осями дендритов 2-го порядка (табл. 3, рис. 8).

При исследовании заготовок-отливок диаметром 80 мм из сплава ЖС26-ВИ производства «СМК» установлено, что размеры оксидных включений не превышали 30, а микропор — 50 мкм (при наличии в центральной зоне усадочных рыхлоты и раковины).

Для определения механических и жаропрочных свойств из прутковой заготовки диаметром 97 мм, полученной из возвратных отходов сплава

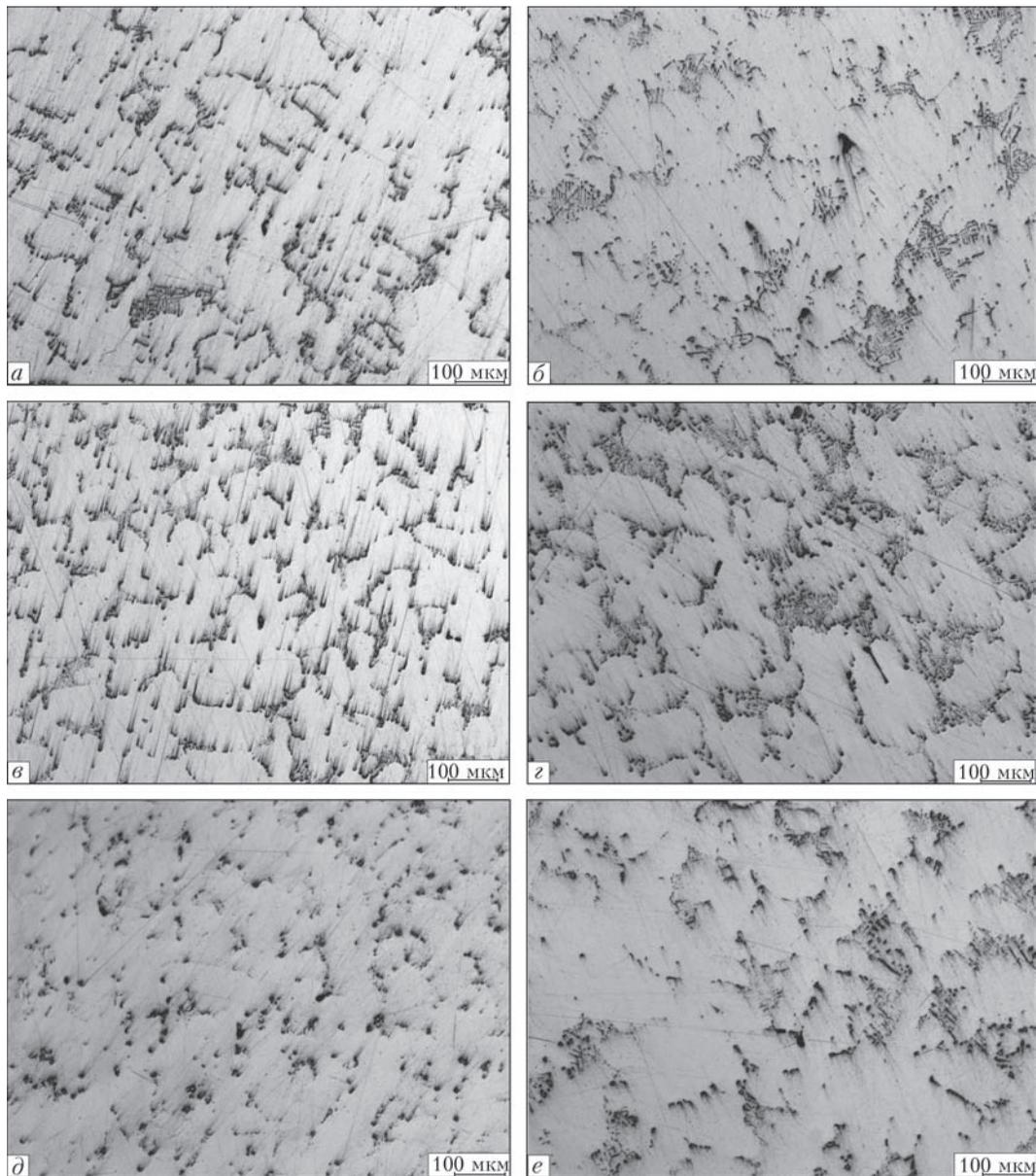


Рис. 8. Микропористость в краевой (*a, б, d*) и центральной (*б, z, e*) зонах заготовки диаметром 97 мм, полученной из возврата сплава ЖС26-ВИ способом ЭЛП: *a, б* — верх; *б, z* — середина; *d, e* — низ

ЖС26-ВИ способом ЭЛП, отлиты образцы (диаметр 15 мм; длина 135 мм) методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВНК).

Химический состав образцов, полученных согласно Паспорту №П-В-008-2013, представлен в табл. 4.

Образцы с индивидуальными номерами 9753, 9754, 9755, 9756, 9757, 9758, 9774, 9775 и 9776 (вариант 1) отлиты из 100%-ного сплава ЖС26-ВИ (плавка Н2), полученного из возвратных отходов способом ЭЛП, а 9813, 9814, 9815, 9816, 9818, 9819, 9820, 9821, 9822, 9823 и 9824 (вариант 2) — из 50%-ного сплава ЖС26-ВИ (плавка Н2), полученного из возвратных отходов сплава ЖС26-ВИ способом ЭЛП и 50%-ного сплава ЖС26-ВИ производства «СМК».

Для сравнения в табл. 4 представлен химический состав образцов из сплава ЖС26-ВИ (плавка 9Н6021/Н211) производства ОАО «СМКкомпания» (вариант 3).

Из результатов, приведенных в табл. 4, видно, что химический состав образцов из сплава ЖС26-ВИ (ВНК) (варианты 1 и 2), а также полученных из материала прутковых заготовок производства «СМК» (вариант 3), удовлетворительный, отвечает требованиям ТУ и находится на одном уровне.

На стартовых конусах образцов с монокристаллической структурой, отлитых методом ВНК, определяли кристаллографическую ориентацию (КГО).

Результаты замеров отклонения направления [001] от оси Z в угловых градусах представлены в табл. 5 (вариант 1) и 6 (вариант 2).

Т а б л и ц а 4. Химический состав образцов из сплава ЖС26-ВИ диаметром 15 мм, полученных методом направленной кристаллизации, мас. %

Способ получения сплава	Номер образца	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Fe	Nb
Вариант 1	9776	0,13	4,52	9,00	11,73	5,92	0,98	1,00	<0,5	1,40
Вариант 2	9824	0,13	4,72	8,96	11,65	5,92	0,93	0,98	<0,5	1,42
Вариант 3		0,16	4,86	8,77	11,74	5,85	0,91	0,91	<0,5	1,42
Нормы ТУ1-92-177-91		0,12...0,17	4,3...5,3	8,7...9,3	11,2...12,0	5,6...6,1	0,8...1,2	0,8...1,2	≤ 0,5	1,4...1,8

Окончание табл. 4

Способ получения сплава	Номер образца	V	Ni	Si	Mn	S	P	O ₂	N ₂
Вариант 1	9776	0,91	Основа	<0,2	<0,3	0,003	0,003	0,00072	0,00116
Вариант 2	9824	0,91	-»-	<0,2	<0,3	0,003	0,003	0,00097	0,00117
Вариант 3		0,91	-»-	<0,2	<0,3	0,003	0,003	-	-
Нормы ТУ1-92-177-91		0,8...1,2	-»-	≤0,2	≤0,3	≤0,005	≤0,010	≤0,002	≤0,002

Из данных, приведенных в табл. 5, 6 видно, что отклонение направления [001] от оси Z соответствует требованиям ТУ и составляет в образцах, отлитых из:

100%-ного сплава ЭЛП — 0,3...4,3 угл. град.;

50%-ного сплава ЭЛП + 50%-ного сплава производства «СМК» — 0...6,8 угл. град.

Механические и жаропрочные свойства определяли согласно 18Т-ТУ-197 на нетермообработанных образцах согласно вариантам 1 и 2, а также после термообработки по стандартному режиму (гомогенизация при температуре 1265 ± 10 °С в течение 1 ч 15 мин., вакуум — 1·10⁻⁴ мм рт. ст.).

Результаты механических испытаний и на длительную прочность приведены в табл. 7.

Из представленных данных видно, что механические и жаропрочные свойства образцов из сплава ЖС26-ВИ (варианты 1 и 2), а также полученных из материала прутковых заготовок производства «СМК» (вариант 3), удовлетворительные, отвечают требованиям ТУ и находятся примерно на одном уровне.

Установлено, что термическая обработка по стандартному режиму способствует некоторому

повышению как механических, так и жаропрочных свойств, а также получению более стабильных результатов, что обусловлено повышением структурной однородности сплава.

На рис. 9 показана структура изломов, полученных при испытании образцов на растяжение, отлитых из сплава ЖС26-ВИ по 1-му и 2-му вариантам. Установлено, что изломы характеризуются дендритным строением, разрушение в процессе испытания произошло по кристаллографической плоскости [001].

Микроструктура монокристаллических образцов (диаметр 15 мм; длина 135 мм), полученных из материала заготовки диаметром 97 мм из ЖС26-ВИ, отлитых по 1-му и 2-му вариантам, после термообработки отличается большей однородностью и наличием небольшого количества выделений эвтектической (γ-γ')-фазы (вследствие ее практически полного растворения в γ-твердом растворе в процессе термической обработки при температуре 1265 °С) по сравнению с литым состоянием сплава ЖС26-ВИ.

Т а б л и ц а 5. КГО образцов, отлитых из 100%-ного сплава ЖС26-ВИ, полученного из возвратных отходов способом ЭЛП

№ п/п	Номер образца	Отклонение направления [001] от оси Z, угл. град.	№ п/п	Номер образца	Отклонение направления [001] от оси Z, угл. град.
1	9753	4,2	6	9758	2,9
2	9754	3,0	7	9774	0,3
3	9755	0,7	8	9775	2,8
4	9756	1,7	9	9776	4,3
5	9757	2,4			
Нормы ТУ		≤ 20	Нормы ТУ		≤ 20

Т а б л и ц а 6. КГО образцов, отлитых из 50%-ного сплава ЖС26-ВИ, полученного из возвратных отходов сплава ЖС26-ВИ способом ЭЛП и 50%-ного сплава ЖС26-ВИ производства «СМК»

№ п/п	Номер образца	Отклонение направления [001] от оси Z, угл. град.	№ п/п	Номер образца	Отклонение направления [001] от оси Z, угл. град.
1	9813	1,9	7	9820	3,6
2	9814	6,8	8	9821	1,3
3	9815	1,3	9	9822	2,5
4	9816	0	10	9823	1,7
5	9818	2,2	11	9824	4,3
6	9819	2,4			
Нормы ТУ		≤ 20	Нормы ТУ		≤ 20

Т а б л и ц а 7. Механические и жаропрочные свойства образцов, полученных из сплава ЖС26-ВИ

Получение образцов	Состояние материала	Номер образца	Механические свойства при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$			Время до разрушения ($T_{исп} = 975\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 26\text{ кГс/мм}^2$), ч
			σ_b , кГс/мм ²	δ , %	ψ , %	
Вариант 1	Без термообработки	9775	94,4	11,2	12,4	72 ²⁰
		9776	102,3	8,8	10,4	72 ⁵⁰
	После термообработки	9754	116,6	8,4	15,4	98 ⁰⁰
		9757	114,2	9,2	12,0	76 ³⁰
		9758	100,4	8,0	13,5	95 ³⁰
Вариант 2	Без термообработки	9814	96,7	10,0	10,4	78 ⁵⁰
		9824	99,5	10,0	11,3	72 ²⁰
	После термообработки	9816	117,7	8,0	13,1	74 ⁰⁰
		9820	109,1	10,8	13,1	76 ⁰⁰
		9822	104,5	8,4	12,0	87 ⁰⁰
Вариант 3	После термообработки	4966 (КГО = 0,7°)	101,1	8,0	–	89 ⁰⁰
Нормы 18Т-ТУ-197; 18Т-ТУ-165; 436ТУ-6; 317ТУ-2; 222ТУ-20			$\geq 90,0$	$\geq 6,0$	–	$\geq 40,0$



Рис. 9. Структура изломов образцов из сплава ЖС26-ВИ после испытания на растяжение, отлитых по вариантам 1 (а) и 2 (б)

Карбиды MeC выделяются как в виде дискретных глобулярных частиц, так и пластин сложной формы, располагающихся преимущественно в междендритных пространствах и по границам зерен.

Размеры структурных составляющих в термообработанных монокристаллических образцах диаметром 15 мм из сплава ЖС26-ВИ (варианты 1 и 2) представлены в табл. 8.

Микроструктурное исследование показало, что в материале образцов, полученных по варианту 1, сформировалась структура с более крупной дендритной ячейкой в сравнении со сплавом, полученным по варианту 2 (рис. 10). При этом расстояние между осями дендритов 2-го порядка в образцах, отлитых по варианту 1, приблизительно в 2,8 раза больше, чем в образцах варианта 2. Примерно такое же соотношение наблюдается в

Т а б л и ц а 8. Размеры структурных составляющих в монокристаллических образцах из сплава ЖС26-ВИ

Получение образцов	Размер структурных составляющих, мкм		Размер микропор, мкм (не более)	Расстояние между осями дендритов, мкм	
	эвтектики ($\gamma-\gamma'$)	карбидов типа MeC		1-го порядка	2-го порядка
Вариант 1	10...92	2...12 (пластинчатых — до 43)	127	185...350	80...105
Вариант 2	7...11 (редко)	1...6 (пластинчатых — до 23)	38	120...245	25...40

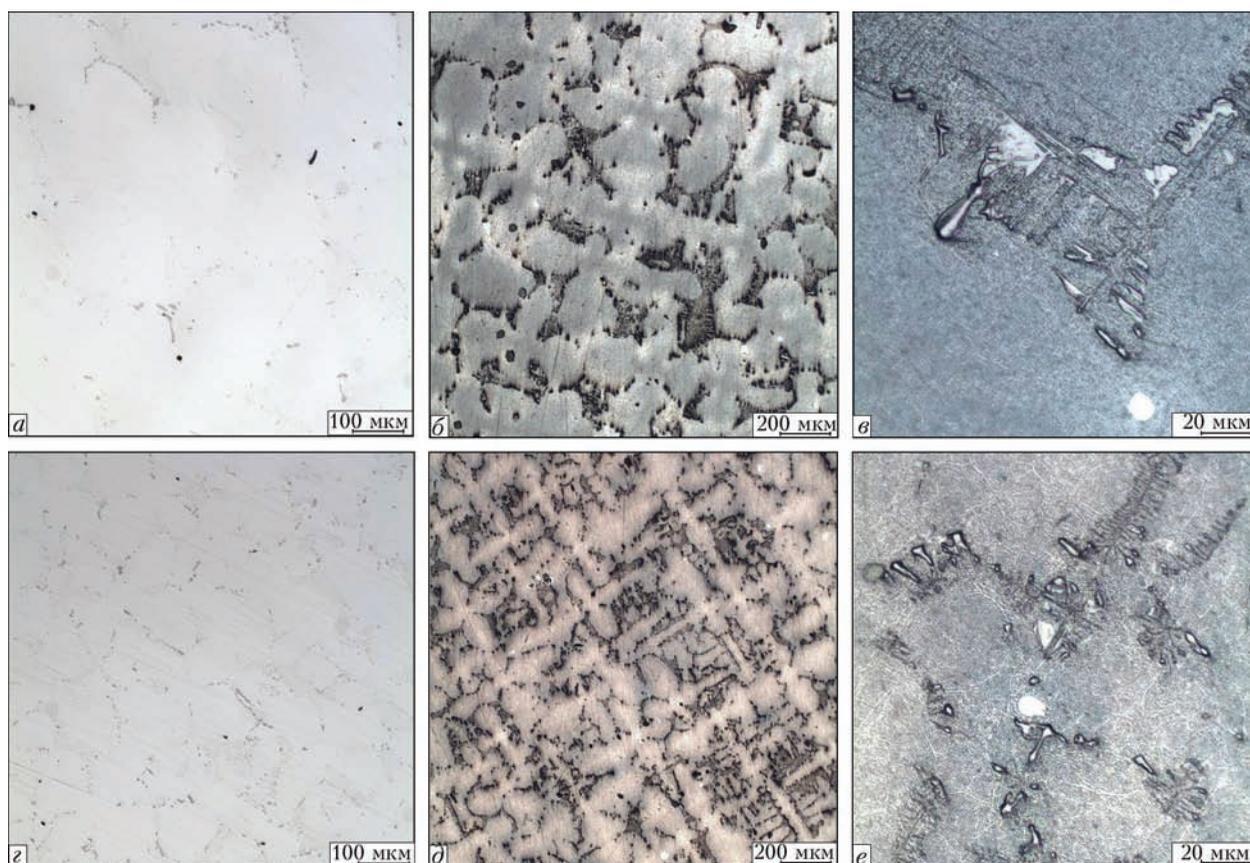


Рис. 10. Микроструктура термообработанных по стандартному режиму монокристаллических образцов из сплава ЖС26-ВИ, отлитых по вариантам 1 (а, б, в) и 2 (з, д, е)

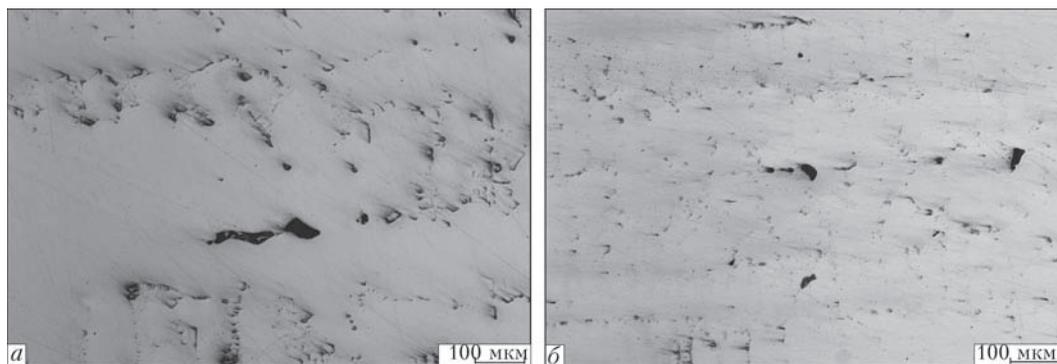


Рис. 11. Усадочная микропористость в образцах из сплава ЖС26-ВИ, отлитых по вариантам 1 (а) и 2 (б)

изменении размеров структурных составляющих и микропор (рис. 11, табл. 8).

Выводы

1. Качество материала заготовки-отливки диаметром 97 мм (плавка Н2), полученной из кондиционных возвратных отходов сплава ЖС26-ВИ способом электронно-лучевого переплава на ООО НПП «Элтехмаш», удовлетворительное и соответствует требованиям технических условий.

2. В материале исследуемой заготовки диаметром 97 мм загрязнения металла в виде плен, грубых шлаковых включений и их скоплений не

обнаружены. Размер встречающихся оксидов не превышает 24 мкм.

3. Механические и жаропрочные свойства образцов из сплава ЖС26-ВИ (ЭЛП: варианты 1 и 2), а также полученных из материала прутковых заготовок производства «СМК», удовлетворительные, отвечают требованиям ТУ и находятся примерно на одном уровне.

Список литературы

1. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. (1980) *Электронно-лучевая технология*. Москва, Энергия.
2. Ладохин С. В. (ред.) (2007) *Электронно-лучевая плавка в литейном производстве*. Киев, Сталь.
3. Аникин Ю. Ф., Добкина Ю. Г., Клочихин В. В. и др. (2002) Совмещенная индукционная и электронно-лучевая

плавка литейных отходов сплавов ЖСЗДК и ЖС26-ВИ. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **2**, 43–49.

References

1. Shiller, Z., Gajzig, U., Pantser, Z. (1980) *Electron beam technology*. Moscow, Energiya [in Russian].
2. (2007) *Electron beam technology*. Ed. by S.V. Ladokhin. Kiev, Stal [in Russian].
3. Anikin, Yu.F., Dobkina, Yu.G., Ladokhin, S.V. et al. (2002) Combined induction and electron beam melting of casting production wastes of heat-resistant alloys ZhS3DK and ZhS26-VI. *Advances in Electrometallurgy*, **2**, 37–43.

**СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ЗЛИТКІВ, ОТРИМАНИХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ ПЕРЕПЛАВОМ
КОНДИЦІЙНИХ ЗВОРОТНИХ ВІДХОДІВ ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ ЖС26-ВИ**

В. В. Ключихин¹, М. І. Гречанюк², Ю. О. Смашнюк³, І. М. Гречанюк³, В. В. Наумік⁴

¹АТ «Мотор Січ».

69068, м. Запоріжжя, просп. Машинобудівників, 15. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

03680, м. Київ-142, вул. Кржижанівського, 3. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

³Науково-виробниче підприємство «Елтехмаш».

21011, м. Вінниця, вул. Ватутіна, 25. E-mail: vin25ebt@ukr.net

⁴Запорізький Національний технічний університет.

69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64. E-mail: naumik@zntu.edu.ua

Досліджено структуру та фізико-механічні властивості злитків, отриманих електронно-променевим переплавом кондиційних зворотних відходів жароміцного сплаву ЖС26-ВИ. Проведена порівняльна оцінка властивостей сплавів, отриманих із зворотних відходів, і стандартних сплавів, виплавлених з чистих шихтових матеріалів у вакуумній печі способом рівноосної кристалізації. Показано, що властивості сплавів, отриманих за двома вищезазначеними способами, можна порівняти і вони відповідають вимогам ТУ. Бібліогр. 3, табл. 8, іл. 11.

Ключові слова: електронно-променева плавка; жароміцні сплави; зворотні відходи; структура; фізико-механічні властивості

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF INGOTS, PRODUCED BY ELECTRON BEAM REMELTING OF CONDITIONED
RETURN WASTES OF HEAT-RESISTANT ALLOY ZhS26-VI**

V.V. Klochikhin¹, N.I. Grechanyuk², Yu.A. Smashnyuk³, I.N. Grechanyuk³, V.V. Naumik⁴

¹JSC «Motor Sich».

15 Mashinostroitelej Ave., 69068, Zaporozhye, Ukraine. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

²I.N. Frantsevich Institute of Problems of Materials Science.

3 Krzhyzhanovsky Str., 03680, Kiev-142, Ukraine. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

³Scientific-Production Enterprise «Eltechmash».

25 Vatutin Str., 21011, Vinnitsa, Ukraine. E-mail: vin25ebt@ukr.net

⁴Zaporozhye National Technical University.

64 Zhukovsky Str., 69063, Zaporozhye, Ukraine. E-mail: naumik@zntu.edu.ua

Structure and physical-mechanical properties of ingots, produced by electron beam remelting of conditioned return wastes of heat-resistant alloy ZhS26-VI were studied. The comparative evaluation of properties of alloys, produced of return wastes, and standard alloys, melted of pure charge materials in vacuum furnace by the method of equiaxial crystallization is given. It is shown that the properties of alloys, produced by two above-mentioned methods, are comparable and in appliance with the specification requirements, 3 Ref., 8 Tables, 11 Fig.

Key words: electron beam melting; heat-resistant alloys; return wastes; structure; physical-mechanical properties

Поступила 03.07.2017