

УДК 669.135:621.789

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-12-19

А.Г. Евгенов, А.М. Роголев

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ КРЕМНИСТОГО МОНЕЛЯ МАРКИ ВКМ1 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СЛИТКОВ

Исследовано влияние условий кристаллизации (при отливке в медный и чугунный кокиль, чугунную изложницу) и предварительной термической обработки высокопрочного деформируемого износо- и коррозионностойкого сплава на никель-медной основе марки ВКМ1 (НМКЖМц30-4-2-1-В1) на технологическую пластичность и размер зерна в конечном полуфабрикате – прессованном прутке. Показано, что предварительный отжиг повышает технологическую пластичность, снижает усилия прессования и улучшает качество поверхности прутка, однако снижает комплекс механических свойств в прессованном прутке. Отливка исходного слитка в чугунную изложницу без предварительной термической обработки обеспечивает получение структуры с крупными выделениями эвтектических фрагментов, которые, не растворяясь полностью при нагреве под прессование, инициируют появление большего количества плоскостей скольжения при экструзии, а при закалке сдерживают рост зерна, чем обеспечивается формирование наиболее мелкозернистой структуры по сравнению с металлом, отлитым в медный кокиль.

Ключевые слова: никель-медный сплав, технологическая пластичность, износостойкость, предел прочности, твердость, коррозионная стойкость, деформация, прессование, микроструктура, γ' -фаза Ni_3Si .

An influence of conditions of crystallization (in case of chill casting and die casting) and pre-heat treatment of wrought high-strength high wear- and corrosion resistant Ni-Cu-based alloy VKM1 (NMKZHMt-30-4-2-1-VI) on ductility and grain size in finished semiproducts (extruded bar) was investigated. It was shown that pre-heat treatment reduces extrusion force, increases ductility and surface quality of bars, but reduces their mechanical properties. Casting of initial ingots into a chill mold without preliminary heat treatment results in formation of a structure with large eutectic fragments, which dissolve incompletely in the course of heating prior to extrusion. They activate formation of a large number of sliding planes during extrusion and restrain grain growth at quenching. This method provides formation of more fine-grained structure as compared to that produced by casting into a copper chill.

Key words: Ni-Cu-based alloy, ductility, wear resistance, tensile strength, hardness, corrosion resistance, deformation, extrusion, microstructure, γ' -phase Ni_3Si .

Создание новых приборных сплавов – одно из главных направлений в решении задачи разработки новых совершенных образцов авиационной техники, в особенности это касается системы управления таким сложнейшим устройством, как перспективный газотурбинный двигатель [1–3]. В системе управления газотурбинного двигателя, а также в системах управления поворотом крыльев, закрылков и т. п. применяются гидравлические насосы-регуляторы, одной из главных деталей которых являются золотниковые пары, – их бесперебойная работа определяет общую надежность агрегата и системы управления в целом. Для изготовления особо ответственных золотников используют износостойкий сплав на никель-медной основе.

Никель-медные сплавы – монели – применяются в промышленности вот уже более 100 лет [4–6]. Наиболее широкое применение они нашли в областях, где необходима высокая коррозионная стойкость как в атмосферных и морских условиях, так и в специальных средах, в частности в среде высокосернистого авиационного топлива. На основе полученного еще в 1906 году из канадской медно-никелевой руды сплава и разработанного в 30-е годы XX века отечественного аналога монеля

НМЖМц-28-2,5-1,5 в последующие годы был разработан десяток модификаций, среди которых особое место занимают кремнистые монели – это американский сплав S-monel (в последствии monel 505, в настоящее время производится только в Китае) и отечественный кремнистый монель НМКЖМц-30-4-2-1 (ВКМ). В отличие от широко распространенного американского алюминиевого монеля K500, эти сплавы в качестве основного структурообразующего элемента содержат кремний, который придает материалу высокую для цветных сплавов прочность и твердость при сохранении высокой коррозионной стойкости и обеспечивает образование, в случае применения такого материала в парах трения, специфических поверхностных оксидных пленок, повышает прочность их сцепления с основным металлом [7], что в процессе трения улучшает антифрикционные свойства сплава [8].

Рассматриваемый в данной работе деформируемый кремнистый монель ВКМ1 был разработан на базе литейного сплава системы Ni-30Cu-4Si-2Fe-1Mn (ВКМ), созданного еще в 1960-е годы. Этот материал предназначен для изготовления особо ответственных золотниковых деталей, работающих в парах со сталями типа

X18, ЭИ69 и др. в условиях агрессивной среды – авиационного топлива, и обладает высокой прочностью, износостойкостью и исключительной стойкостью к коррозии. Разработка нового сплава была обусловлена наличием у сплава ВКМ ряда недостатков (рассеянная газовая пористость, низкие пластические характеристики). Разработанная технология вакуумной выплавки, направленное микролегирование и модифицирование позволили значительно (в 5–10 раз) повысить пластические характеристики и ударную вязкость нового сплава, переведя его в класс деформируемых. Возможность получения такого материала в виде прессованных прутков значительно повысила его однородность и увеличила КИМ за счет получения прессованных прутков близкого к конечному размеру детали диаметра. При этом химический состав сплава ВКМ1 по основным элементам остался в пределах марки ВКМ, что упрощает его дальнейшее внедрение.

Структура сплава монель ВКМ1, как и сплава-прототипа ВКМ, в литом состоянии весьма чувствительна к условиям кристаллизации. Так, твердость литого сплава по данным работы [9] зависела от температуры разлива и от материала формы, в который проводилась отливка, т. е. от скорости кристаллизации.

При работе со сплавом ВКМ1 было отмечено, что условия кристаллизации значительно влияют на структуру не только исходного слитка, но и деформированного (прессованного) полуфабриката: при отливке сплава в медный кокиль с высокой скоростью кристаллизации структура прессованного прутка характеризовалась более крупным размером деформированного зерна по сравнению с отливкой в чугунную изложницу, для которой характерно более грубое дендритное строение. Данная работа посвящена исследованию влияния условий кристаллизации исходного слитка на размер зерна в прессованном прутке и механические свойства деформированного металла.

Методика проведения исследований

В качестве объекта исследования принят сплав ВКМ1 (деформируемый кремнистый монель). Для проведения исследований сплав, содержащий 4,15 и 4,5% Si, выплавляли в вакуумной индукционной печи УППФ-3М с разливкой в медный кокиль (масса слитка 10–11 кг) без утепляющих вставок, чугунную изложницу с керамической набивной надставкой (масса слитка 9–10 кг) и чугунный разъемный кокиль $\phi 60 \times 600$ мм. В качестве модификаторов применяли микродобавки титана, ниобия и магния. Из слитков изготовляли заготовки под деформацию размером $\phi 53 \times 60$ мм. Изучение влияния предварительной термической обработки на технологическую пластичность проводили на металле, отлитом в чугунный разъемный кокиль, так как данный кристаллизатор обеспечивает наиболее близкие условия затвердевания металла

по высоте получаемого электрода. Предварительную термическую обработку слитков, отлитых в чугунный кокиль, проводили в воздушной электропечи по режимам:

- 1: 1050°C в течение 4 ч + охлаждение на воздухе;
- 2: 1050°C в течение 4 ч + регламентированное охлаждение (до 800°C – с печью, скорость охлаждения 30°C/ч, далее – на воздухе).

Технологическую пластичность металла оценивали на стандартных образцах «менаже» в интервале температур 900–1100°C. Прессование прутка $\phi 15$ мм проводили из контейнера $\phi 55$ мм при температуре начала деформации 1000°C. Коэффициент вытяжки составил 13,44. Полученные прутки подвергали термической обработке по режиму: закалка при 1000°C в течение 4 ч + старение при 600°C в течение 4 ч с охлаждением на воздухе.

Металлографические исследования проводили на микроскопе «Axio Imager A1» фирмы Carl Zeiss. Размер деформированного зерна оценивали по ГОСТ 8233–56. Микротвердость литых и деформированных образцов определяли на микротвердомере Durascan 20. Испытания механических свойств проводили по стандартным методикам. Результаты испытаний механических свойств сопоставляли с результатами металлографического анализа. Для определения фазового состава применяли метод рентгеноструктурного анализа монокристаллов, а также метод физико-химического фазового анализа (ФХФА), основанный на электролитическом изолировании фаз в различных электролитах с последующим химическим и рентгеноструктурным анализом изолятов. Рентгеноструктурный анализ изолятов проводили на дифрактометре D/MAX-2500 (фирма Rigaku) в Си K_{α} -излучении, монохромизированном путем отражения от кристалла полиграфита в интервале углов $2\theta = 20$ –90 град. Для точного определения параметра твердого раствора эти же образцы исследовались на приборе Дрон-3 в интервале углов 140–150 град. Запись и обработку рентгенограмм производили с помощью компьютера по специальным программам.

Результаты исследований и их обсуждение

Микроструктуры слитков, отлитых в чугунную изложницу, медный и чугунный кокили, приведены на рис. 1. Видно, что для сплава, отлитого в чугунную изложницу, характерно грубое дендритное строение, оси дендритов массивны, в межосных участках имеются крупные эвтектические выделения неправильной формы (светлые включения), что объясняется низкой скоростью затвердевания при разливке в такой кристаллизатор. При отливке сплава в медный кокиль отмечено наличие рассеянных дефектов усадочного происхождения, сосредоточенных в основном вдоль оси слитка; появление рыхлот зафиксировано уже на высоте 120–140 мм от донной части слитка.

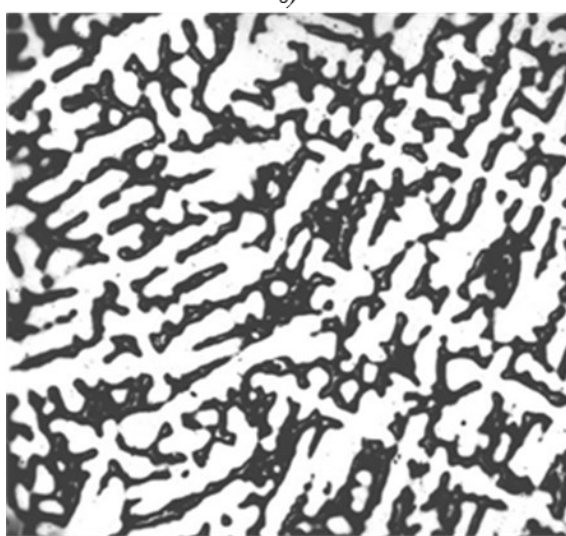
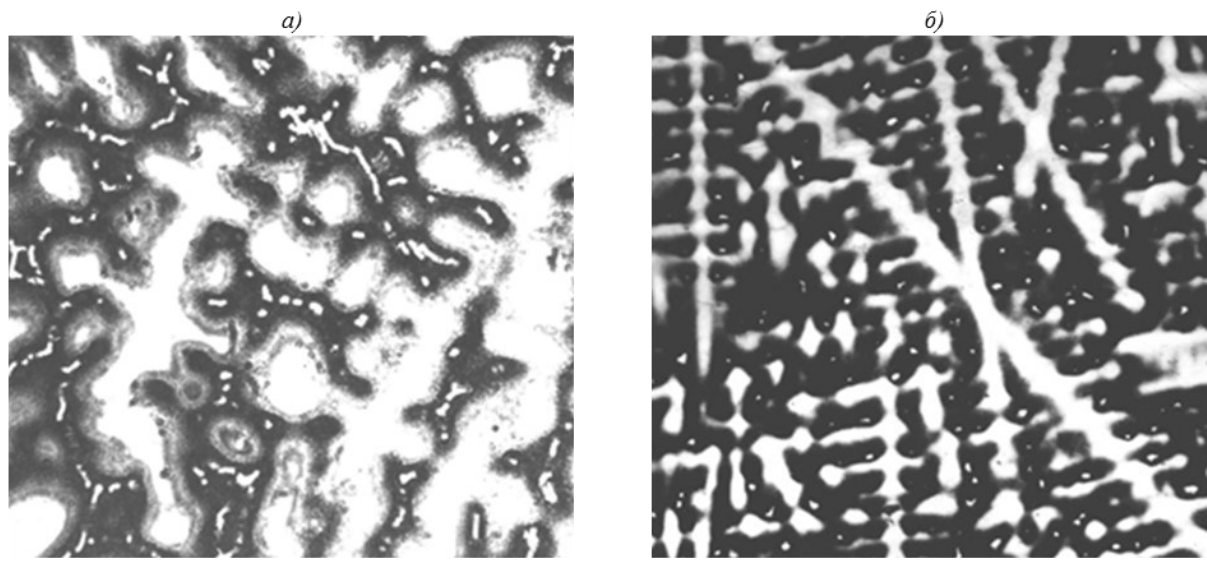


Рис. 1. Микроструктура ($\times 100$) слитков, отлитых в чугунную изложницу (а), медный кокиль (б), чугунный кокиль (в)

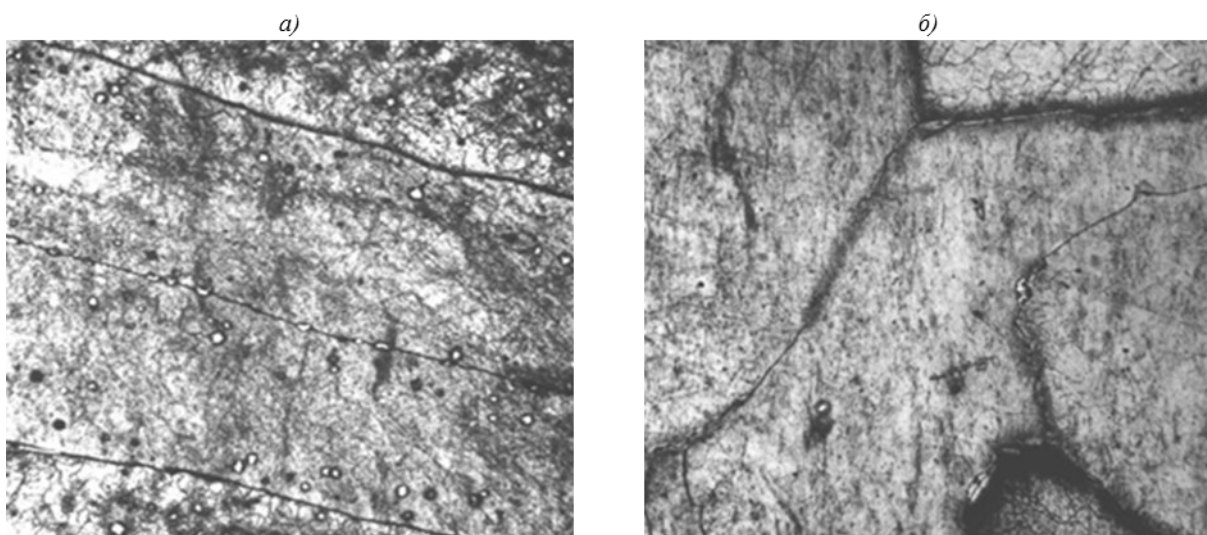


Рис. 2. Микроструктура ($\times 100$) сплава ВКМ1, отлитого в чугунный кокиль, после отжига по режимам 1 (а) и 2 (б)

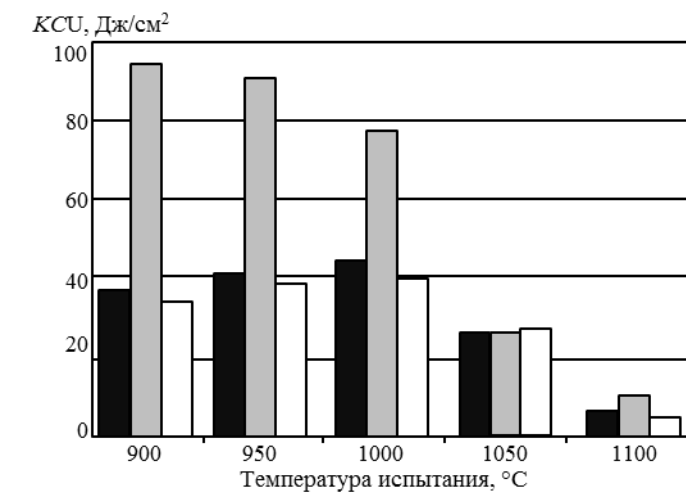


Рис. 3. Технологическая пластичность литого (■) и отожженного по режимам 1 (▣) и 2 (□) металла

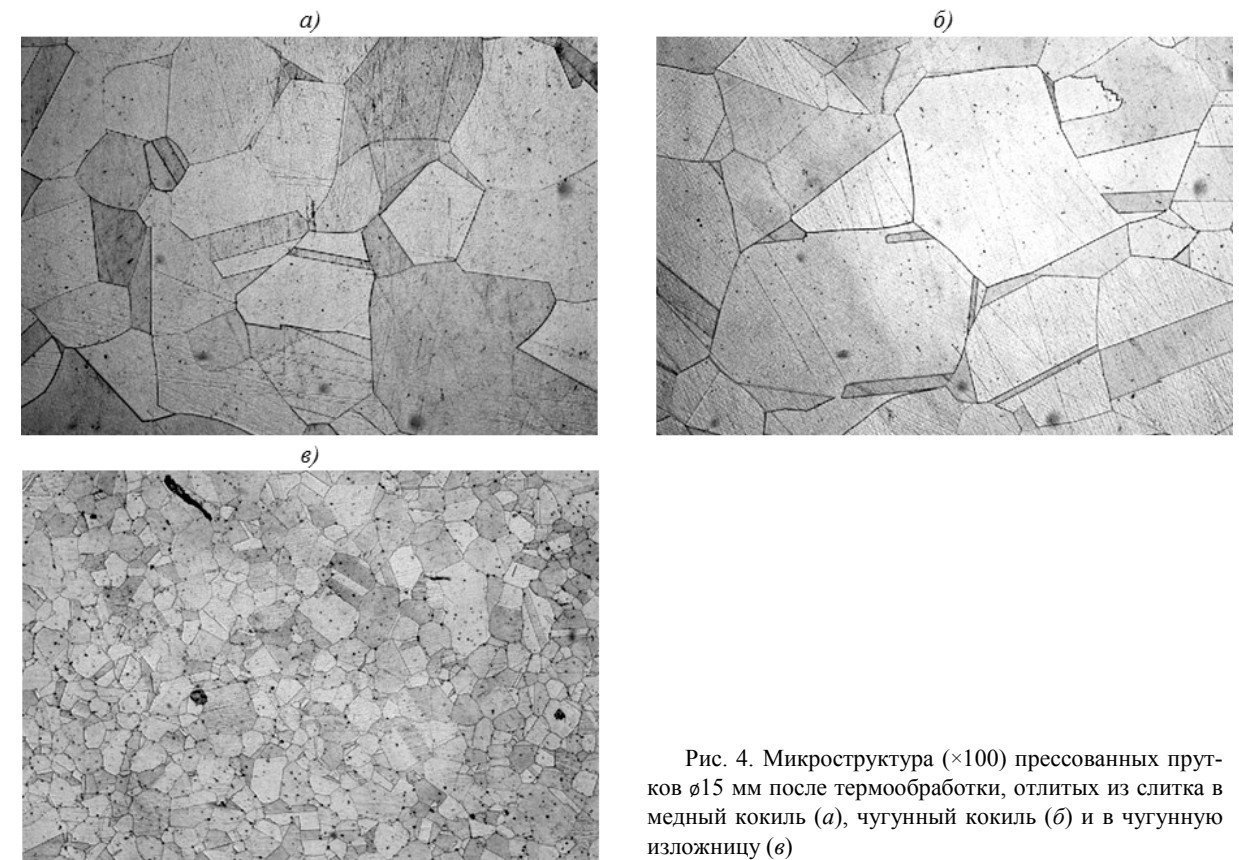


Рис. 4. Микроструктура ($\times 100$) прессованных прутков $\phi 15$ мм после термообработки, отлитых из слитка в медный кокиль (а), чугунный кокиль (б) и в чугунную изложницу (в)

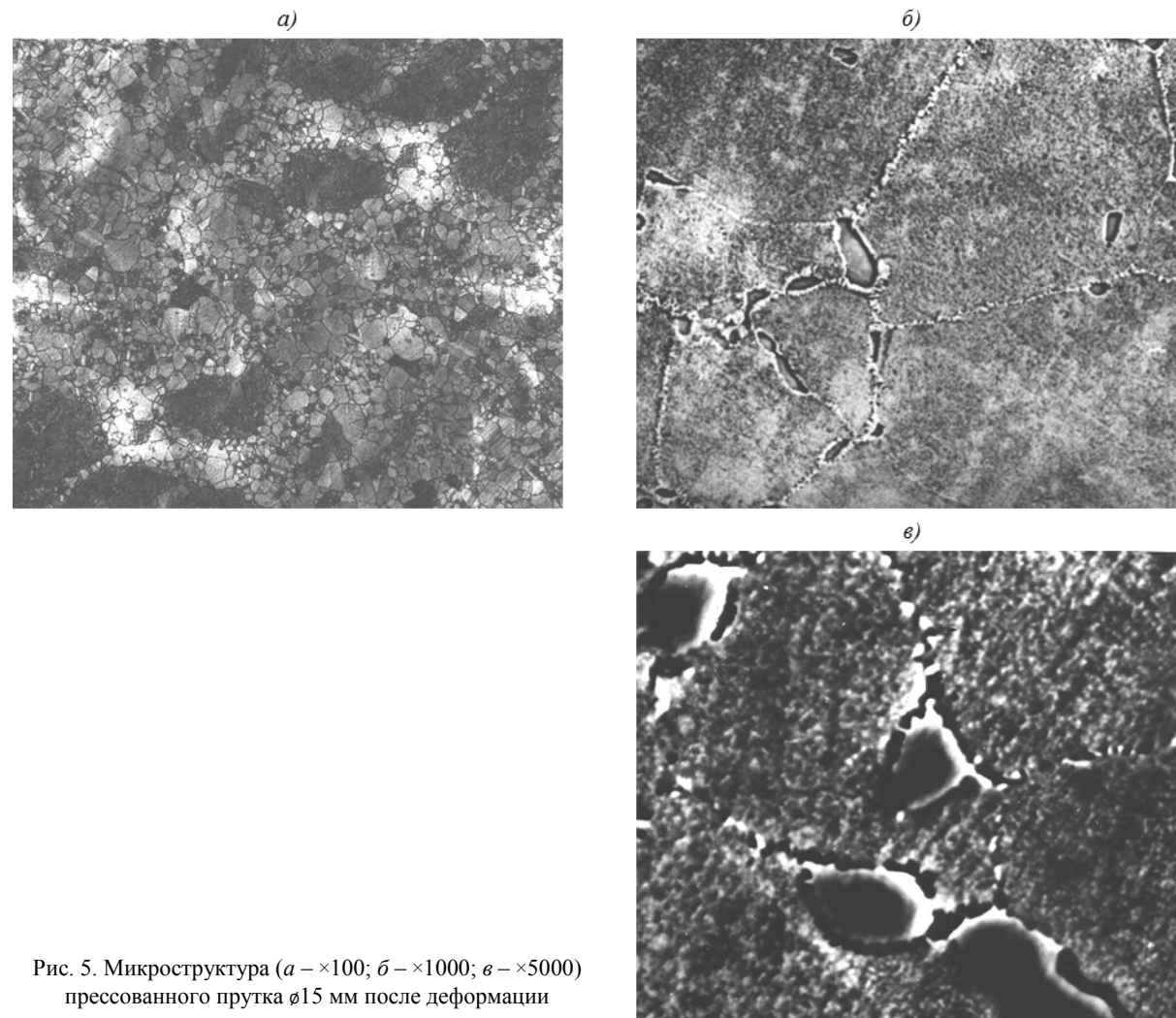


Рис. 5. Микроструктура (а – ×100; б – ×1000; в – ×5000) прессованного прутка Ø15 мм после деформации

Таблица 1
Параметры γ-твердого раствора литого металла

Режим термообработки	Параметры γ-твердого раствора, нм
В литом состоянии	0,3562
При 1050°C в течение 4 ч + охлаждение:	
на воздухе	0,3566
при 30°C в течение 1 ч	0,3563

Таблица 2

Состав твердого раствора и эвтектических включений в сплаве ВКМ1 в прессованном прутке

Место анализа	Содержание элементов, % (атомн.)									Микротвердость HV
	Ni	Cu	Fe	Mn	Ti	Si	Nb	Mg	V	
Твердый раствор	59,15	31,71	4,47	1,19	0,12	2,33	0,06	0,73	0,12	370–400
Фрагменты эвтектики	79,04	1,23	0,86	0,32	H/o*	11,60	H/o*	6,70	0,12	580–620

* Элемент не обнаружен.

Таблица 3

Механические свойства прессованных прутков Ø15 мм, полученных из слитков сплава ВКМ1

Способ отливки исходного слитка	σ _в	σ _{0,2}	δ	ψ	КСУ, кДж/м ²	НВ
	МПа		%			
В медный кокиль	1115–1245	955–1040	12,0–16,2	19,8–23,2	410–780	350
В чугунную изложницу	1220–1240	1030–1060	15,2–18,0	26,0–29,5	720–765	363
В чугунную изложницу + отжиг по режиму 1	1150–1220	975–1030	12,8–14,5	14,9–22,5	510–640	363

Кристаллизация в медном кокиле приводит к формированию более тонкой структуры, оси дендритов первого порядка имеют большую протяженность вследствие интенсивного теплоотвода. Оси второго порядка слабо развиты. Выделения второй (эвтектической) фазы в межосных участках – дисперсные и распределены более равномерно.

Чугунный разъемный кокиль также обеспечивает формирование тонкой структуры с мелкими выделениями эвтектической составляющей, что вызвано главным образом малым диаметром кокиля и, следовательно, интенсивным теплоотводом. Аналогично отливке в медный кристаллизатор слиток поражен усадочными дефектами, сосредоточенными в основном вдоль продольной оси.

Отжиг с охлаждением на воздухе (режим 1) приводит к растворению дендритов, появлению четких границ зерен, сохраняющих преимущественную ориентацию дендритов (рис. 2, а). Отжиг с регламентированным охлаждением (режим 2) приводит к более полному растворению эвтектической составляющей и к частичной сфероидизации зерен. Такой режим термической обработки должен обеспечивать в литом металле состояние, наиболее близкое к равновесному, так как способствует более полному протеканию диффузионных процессов при замедленном охлаждении (рис. 2, б).

Технологическая пластичность металла, отожженного по режиму 2, осталась на уровне литого металла, в то время как режим отжига 1 привел почти к двукратному повышению технологической пластичности (рис. 3).

Исследование фазового состава литого и термообработанного по режимам 1 и 2 металла показало, что в литом состоянии сплав отличается многофазностью, что является следствием ликвационной неоднородности. Обнаружены фазы Ni₃Si (структура L1₂, a=0,352 нм) и NiSi₂ (C1, a=0,543 нм), а также метастабильные фазы Ni₃Si с моноклинной и Ni₅Si₂ (Ni₃₁Si₁₂) с тригональной структурами. Нагрев при 1050°C в течение 4 ч способствует растворению метастабильных фаз и выделению фаз на основе соединений Ni₃Si и NiSi₂ по реакции Ni₃₁Si₁₂ → 10Ni₃Si + NiSi₂. При этом изменяется параметр γ-твердого раствора (табл. 1), что свидетельствует о перераспределении легирующих элементов между фазами.

Таким образом повышение технологической пластичности отожженного с охлаждением на воздухе металла связано в основном с растворением более хрупкой дендритной структуры. Пониженная технологическая пластичность отожженного металла с регламентированным охлаждением обусловлена интенсивным протеканием дисперсионного твердения, связанного с образованием силицидных фаз Ni₃Si (куб.) и NiSi₂. Более подробная информация о фазовом составе сплава ВКМ1 приведена в работах [10–12].

Предварительный отжиг по режиму 1 способствовал снижению усилий при прессовании и повышению качества поверхности прессованных прутков.

Микроструктура прессованных прутков после полной термической обработки представлена на рис. 4. Несмотря на более тонкую структуру исходного слитка, отлитого в медный кокиль, в прессованном состоянии микроструктура сплава, отлитого в медный и чугунный кокиль, практически не отличается. В обоих случаях структура крупнозернистая, размер зерна 2–3 балла. Для прутка, полученного из слитка, отлитого в чугунную изложницу, характерно более мелкое зерно 5–6 балла. Исследование прессованного прутка в состоянии непосредственно после деформации (без термообработки, рис. 5) показало наличие по границам зерен глобулярных (или неправильной формы) частиц богатой кремнием и магнием фазы (эвтектики), имеющей следующий состав (табл. 2). Очевидно, что процессы диффузии при нагреве заготовок под прессование в течение 2 ч недостаточно интенсивны для полного растворения фрагментов эвтектики, что подтверждается данными работы [9], в которой частицы эвтектики в литом сплаве ВКМ были обнаружены и после двукратного нагрева под закалку, что соответствует температуре прессования сплава ВКМ1.

Фрагменты эвтектики, имеющие высокую твердость (микротвердость эвтектических частиц в литом сплаве составляет в среднем 600 HV при средней микротвердости зерна деформированного металла 370–400 HV), дробятся при прессовании, приобретая более округлую форму, и, очевидно, инициируют появление новых плоскостей скольжения, что способствует получению более мелкозернистой структуры после закалки. Подобен эффект отмечается при деформации жаропрочных никелевых сплавов, подвергаемых предварительной термической обработке для коагуляции частиц γ'-фазы, что показано в источниках [13–17]. В дальнейшем, при термической обработке деформированного металла, эвтектические глобулы, расположенные по границам зерна, сдерживают его (зерна) рост, что способствует сохранению мелкозернистой структуры после закалки.

Определение механических свойств прессованных прутков, полученных из слитков по трем вариантам выплавки, показало, что вариант с отливкой слитка в чугунную изложницу имеет более стабильные значения как по пластическим характеристикам и ударной вязкости, так и по прочности (табл. 3). Предварительный отжиг снижает комплекс механических свойств сплава при сохранении высокой твердости.

В случае получения отливок с разливкой в медный кокиль необходимо отметить, что дефекты в виде рыхлот и усадочных пор в исходном слитке при прессовании часто наследуются в деформированном металле в виде надрывов и не-

сплошностей, расположенных вдоль оси прутка. При исследовании макрошлифов прутков, полученных из слитков, отлитых в чугунную изложницу, подобных дефектов отмечено не было.

Таким образом, было установлено, что применение предварительного отжига с охлаждением на воздухе способствует повышению технологической пластичности литого металла, снижению усилий при прессовании и повышению качества поверхности прессованных прутков. Однако полученные из такого металла прессованные прутки обладают более низкими механическими свойствами, что связано с растворением грубых эвтектических выделений, присутствующих в металле, отлитом в чугунную изложницу. Крупные выделения эвтектики в межосных участках при заливке в чугунную изложницу при прессовании играют положительную роль: при кратковременном нагреве под прессование (1–2 ч) при температурах 1000°C они не могут быть полностью растворены и при прессовании инициируют появление дополнительных плоскостей скольжения, что измельчает зерно деформированного металла, а при последующей термообработке, располагаясь по границам зерна, сдерживает его рост. При этом плотный слиток, получаемый при отливке в чугунную изложницу, обеспечивает получение бездефектного по макроструктуре деформированного металла. Применение предварительного гомогенизирующего отжига может быть рекомендовано при получении прутков с более высокими коэффициентами вытяжки или при недостаточном усилии прессового оборудования.

Выводы

Применение предварительного гомогенизирующего отжига с охлаждением на воздухе способствует повышению технологической пластичности литого металла, снижению усилий при прессовании и повышению качества поверхности прессованных прутков, однако приводит к снижению комплекса свойств деформированного металла (по сравнению с металлом без предварительного отжига) и может быть рекомендовано только для получения прутков с более высокими коэффициентами вытяжки или при работе на прессах с меньшим усилием.

Показано, что применительно к получению прессованных прутков из никель-медного сплава ВКМ1 наилучший комплекс механических свойств и мелкозернистую структуру (5–6 балла) деформированного металла обеспечивает отливка исходного слитка в чугунную изложницу без предварительной термической обработки.

Установлено, что грубые фрагменты эвтектики, не растворенные при нагреве под прессование и имеющие высокую микротвердость, инициируют появление дополнительных плоскостей скольжения, что способствует получению мелкозернистой структуры. Те же частицы, располагаясь по границам деформированного зерна, сдерживают его рост в процессе последующей термической обработки.

Макродефекты (рыхлоты, усадочные поры, вызванные недостаточной подпиткой при интенсивном теплоотводе при литье в медный кокиль) литого металла могут наследоваться в прессованном прутке в виде надрывов и несплошностей, расположенных вдоль оси прутка. Получение плотных слитков при литье в чугунный кокиль исключает появление подобных дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии 2012. №3. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и технологических покрытий //Авиационные материалы и технологии 2012. №3. С. 19–36.
4. Shoemaker L.E., Smith G.P. A century of monel metal: 1906–2006 //JOM. 2006. V. 58. №9. P. 22–26.
5. Copper alloy for heat exchanger tube: pat. 2451604 EP; опубл. 05.16.2012.
6. Cu–Ni–Si–Co Copper alloy for electronic material and process for producing same: pat. 2554693 EP; опубл. 02.06.2013.
7. Чатынян Л.А. Новые износостойкие жаропрочные сплавы для узлов трения //Теория трения и износа и проблемы стандартизации. Брянск: Приокское кн. изд-во. 1978. С. 314–325.
8. Чатынян Л.А., Лашко Н.Ф. и др. Влияние кремния на износостойкость никелевых жаропрочных сплавов типа ВЖЛ-2 при трении в условиях высоких температур //Машиноведение. 1976. №4. С. 32–39.
9. Вовк М.П., Горбунов А.Н., Кестнер О.Е. Кремнистый медноникелевый сплав для золотниковых пар прецизионной топливной аппаратуры //В сб.: Материалы для деталей трения. М.: ОНТИ. 1966. С. 10–20.
10. Евгенов А.Г., Калицев В.А., Роголев А.М. Влияние условий кристаллизации слитков кремнистого монеля ВКМ1 на структуру прессованных полуфабрикатов //Металлург. 2013. №8. С. 77–81.
11. Лукин В.И., Евгенов А.Г., Морозова Г.И., Калицев В.А. Новый деформируемый сплав системы Ni–Cu–Si–Fe–Mn (кремнистый монель) //Технология машиностроения. 2006. №6. С. 5–7.
12. Евгенов А.Г., Морозова Г.И., Лукин В.И. Особенности фазовых превращений в сплаве системы Ni–Cu–Si–Fe–Mn //МиТОМ. 2006. №8. С. 36–39.

13. Герасимов Д.Е., Разуваев Е.В. Производство деформированных полуфабрикатов из современных и перспективных жаропрочных никелевых сплавов //В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. Технология производства авиационных металлических материалов. М.: ВИАМ. 2002. С. 125–132.
14. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 129–141.
15. 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. №3. С. 52–57.
16. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей. //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 129–141.
17. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Новый жаропрочный никелевый сплав для дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) //Материаловедение. 2012. №7. С. 24–28.