

УДК 621.762

И.А. ГУСАРОВА¹, А.М. ПОТАПОВ¹, В.П. СОЛНЦЕВ², Т.А. СОЛНЦЕВА²,
К.Н. ПЕТРАШ², В.А. НАЗАРЕНКО², Г.А. ФРОЛОВ², Т.А. МАНЬКО³

¹Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное», Днепр

²Институт проблем материаловедения НАНУ, Киев

³Днепропетровский национальный университет, Днепр

РАЗРАБОТКА ПОРОШКОВОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ НИХРОМА И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЖАРОСТОЙКИХ КОНСТРУКЦИЙ ВОЗВРАЩАЕМЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Разработана технология получения дисперсно-упрочненного порошкового сплава ЮИПМ-NiCr20Ю3, определены его функциональные характеристики. Образец сплава испытан при рабочих температурах на стенде Института проблем прочности НАН Украины. Отработаны режимы пайки сплава, изготовлен макет кромки воздухозаборника из разработанного сплава. Показано, что имеющийся комплекс свойств позволяет использовать созданный сплав для аэрокосмических летательных аппаратов, многократно работающих в условиях экстремально высоких температур, развиваемых в условиях аэродинамического нагрева.

Ключевые слова: дисперсно-упрочненный нихромовый сплав, высокие температуры, летательные аппараты

Введение

Развитие ракетно-космической техники движется в направлении создания частично или полностью возвращаемых конструкций, которые предназначены для многоразового использования. Важной проблемой при эксплуатации таких изделий является обеспечение их целостности при спуске в атмосфере, так как температуры на поверхности достигают 1100-1200 °С. Наиболее теплонапряженными конструкциями возвращаемого планера многоразовых транспортно-космических систем (ТКС) являются конструкции с большими углами атаки, к которым относятся носок и передняя кромка фюзеляжа, носок крыла, рулей высоты и направления, а также кромки воздухозаборника. Установлено, что существующие конструкционные металлические материалы не могут функционировать при многократных циклах воздействия таких экстремально высоких температур, и это является одним из сдерживающих факторов создания многоразовых аэрокосмических аппаратов. С целью существенного увеличения жаростойкости сплавов была выбрана технология порошковой металлургии для разработки дисперсно-упрочненных материалов, которые способны работать при максимально высоких температурах [1, 2].

Существующие порошковые дисперсно-упрочненные сплавы на основе нихрома (PM 1000, ЮИПМ-1200) имеют высокую плотность

и недостаточный уровень физико-механических характеристик при высоких температурах, что приводит к превышению массовых ограничений для изделий ракетно-космической техники.

Целью данной работы является разработка технологии получения нового порошкового дисперсно-упрочненного сплава с более высокими удельными характеристиками в рабочем диапазоне температур до 1200 °С.

1. Постановка задачи

Известно, что одновременное введение хрома и алюминия в сплавы никеля понижает их плотность, повышает жаростойкость и приводит к возрастанию характеристик длительной жаропрочности. Однако, при этом понижается пластичность, в связи с тем, что образуется упрочняющая фаза $\gamma'(\text{Ni}_3\text{Al})$ [3]. Для сохранения требуемых свойств в допустимых пределах был разработан сплав никеля ЮИПМ-NiCr20Ю3, содержащий 20% Cr, 3% Al, 1,5% Y_2O_3 .

При отработке режимов изучали процессы уплотнения порошковых металлических смесей в стальных пресс-формах (рис.1).

Установлено, что при давлении прессования 500МПа получаются достаточно плотные заготовки. Увеличение давления позволяет еще повысить их плотность, однако это часто приводит к расслоению массивных заготовок и выходу из строя стальных пресс-форм. В связи с этим выбрано удельное давление прессования 500-600 МПа.

Основным процессом, при котором формируется необходимый комплекс свойств порошкового материала, является спекание. Изучение закономерностей уплотнения заготовок при спекании показало, что в сплаве наблюдается усадка. Максимальная относительная плотность и усадка заготовок достигаются при температурах порядка 1275 °С и относительной плотности прессовок 75,5-76,25% (рис. 2). После спекания они составляют 86,5 и 13,5% соответственно. Полученные заготовки с такой относительной плотностью имеют в своей структуре закрытую и открытую пористость.

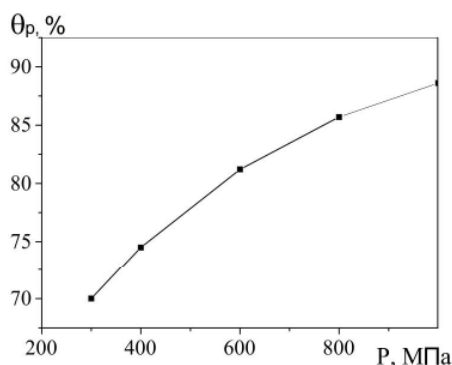


Рис. 1. Зависимость относительной плотности прессовок θ_p от давления прессования P в стальных пресс-формах с двухсторонним приложением нагрузки

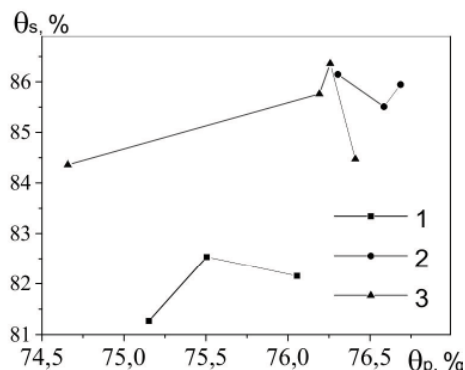


Рис. 2. Зависимость относительной плотности заготовок при спекании θ_s от исходной плотности прессовок θ_p при температурах спекания: 1 - 1250 °С; 2 - 1275 °С; 3 - 1300 °С

2. Прокатка заготовок

Поскольку получить заготовки нужной плотности пропорционально увеличивая давление прессования не удастся, то для повышения плотности необходимо введение операции допрессовки или прокатки. Использование допрессовки на крупных образцах нецелесообразно, поскольку идет повышенный износ пресс-формы. В связи с этим предпочтительным процессом является прокатка.

Наличие открытой пористости не позволяет нагревать материал под прокатку в открытой

атмосфере воздуха. При нагреве на воздухе при температуре свыше 1000 °С происходит насыщение структуры кислородом, что приводит к охрупчиванию заготовок. Для использования горячей прокатки необходимо, чтобы пористость в образце была закрытой, что наблюдается при относительной плотности образцов больше 90%. Вследствие этого на начальном этапе была использована холодная прокатка.

При холодной прокатке степень обжатия материала спеченных заготовок зависит от их высоты. Заготовки высотой 36 мм допускают степень обжатия не более 10% по высоте. При обжатии более 12% наблюдается образование макроскопических трещин в средней части образца, параллельных поверхности обжатия (рис. 3). Поскольку образцы после спекания имеют переменную плотность по сечению с максимальной пористостью в данной зоне. На образцах меньшей высоты и с плотностью более 90% разрушение происходит только при степенях обжатия более 30%.



Рис. 3. Вид заготовки, подвергнутой обжатию при прокатке более 10%

Исследование микроструктуры образцов, подвергнутых предельной деформации, показало возникновение большого количества плоских микроскопических трещин (рис. 4). Процесс разрушения материала идет по всему объему, поэтому в зависимости от размеров заготовки, вида прокатного оборудования, диаметра валков, скорости прокатки устанавливается оптимальная величина обжатия заготовки как после спекания, так и после последующих отжигов.

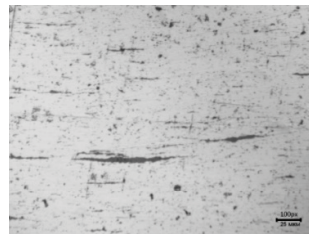


Рис. 4. Микроструктура материала, подвергнутого обжатию при прокатке более 30%

На последующих стадиях прокатки на заготовках с закрытой пористостью была опробована горячая прокатка. Экспериментальные исследования показали, что горячая прокатка приводит к развитию образовавшихся трещин (рис. 5).

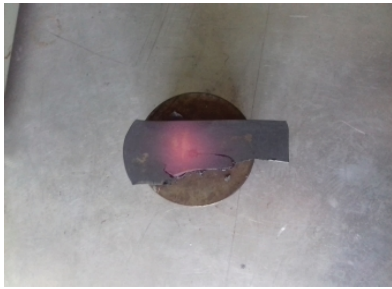


Рис. 5. Вид заготовки, подвергнутой обжатию более 10% в процессе горячей прокатки при 1100 °С

Проведенные исследования показали, что необходимые параметры прокатанных образцов получаются при холодной прокатке со степенями обжатия не более 10% и последующего снятия наклепа путем отжига при температуре не менее 1200 °С. Отжиг на начальной стадии при наличии в материале открытой пористости необходимо проводить в защитной атмосфере (инертные газы или вакуум). На последующих стадиях допускается проводить отжиг и на воздухе. Образцы после охлаждения на воздухе имеют черный цвет, обусловленный образованием на поверхности шпинели, которая препятствует дальнейшей прокатке. Поскольку в вакууме при нагреве шпинель распадается и на поверхности остается чистый оксид хрома, целесообразно использовать отжиг в вакуумной печи на всех стадиях прокатки.

После спекания или отжига в вакуумной печи в течение двух часов образцы охлаждаются на воздухе с образованием в процессе закалки твердого раствора. Рентгенографические исследования подтверждают структуру идеального твердого раствора (рис. 6).

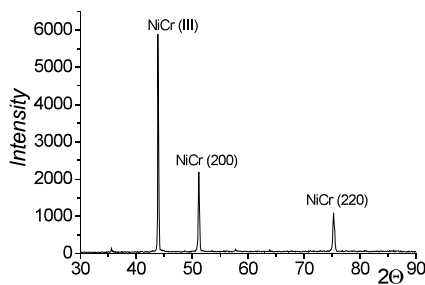


Рис. 6. Рентгенограмма сплава ЮИПМ-NiCr20Ю3

С помощью экспериментов определены следующие режимы прокатки сплава ЮИПМ-NiCr20Ю3 на стане ДУО 500 при комнатной температуре: 5 циклов – прокатка вдоль образца, деформация за проход 2-3%, последний цикл прокатки – в поперечном направлении. Промежуточные отжиги при 1200 °С в течение

2 часов в вакуумной печи после каждого цикла прокатки.

После трех циклов холодной прокатки с промежуточными отжигами при 1200 °С пористость уменьшается до 7,3-7,4%. При последующих циклах прокатки пористость еще уменьшается, и необходимая пористость менее 3% достигается после пятого цикла. При этом плотность сплава составляет 7450-7500 кг/м³.

2. Физико-механические характеристики сплавов нихрома

На полученных образцах были определены физико-механические характеристики сплава ЮИПМ-NiCr20Ю3 в диапазоне температур 20-1200 °С (табл. 1). Установлено, что предел прочности сплава при растяжении при комнатных температурах составляет 1020 МПа. Его удельная прочность при этих температурах превышает данный параметр ранее разработанного сплава ЮИПМ-1200 в полтора раза, а при повышенных температурах более чем в два раза.

Таблица 1

Физико-механические характеристики сплавов нихрома

Характеристика	T, °C	ЮИПМ-1200	ЮИПМ-NiCr20Al3
Плотность		8300	7900
Предел прочности при растяжении, σ_B , МПа / МПа/кг	20	738/0,09	1020/0,13
	800	237/0,03	542/0,07
	1100	45	-
	1200	-	40
Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	20	364	624
	800	228	457
	1100	40	-
	1200	-	35
Относительное удлинение, δ , %	20	36,5	21
	800	36,7	18,1
	1100	32,8	18
	1200	-	18
Относительное сужение, ψ , %	20	34,2	22
	800	32,6	19
	1100	19,0	-
	1200	-	20

3. Высокотемпературные испытания сплава и измерение макро- и микротвердости

Для проверки работоспособности созданного сплава в условиях, имитирующих эксплуатационные, было проведено экспериментальное определение газотермической и механической стойкости материала в условиях воздействия высокотемпературного газового потока на газодинамическом стенде Института проблем

прочности НАН Украины. На рисунках 7, 8 представлены испытательные камеры газодинамического стенда и испытуемый образец.



Рис. 7. Камеры газодинамического стенда

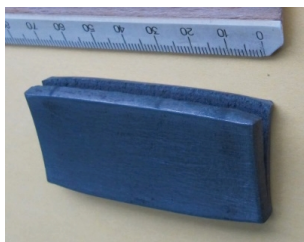


Рис. 8. Образец сплава перед испытаниями

Материал испытывали при максимальных тепловых нагрузках планера, реализующихся на кромках воздухозаборника. На рисунке 9 показано изменение температуры газового потока (1) и материала образца-свидетеля кромки (2) при проведении испытаний, а также температуры газового потока при штатных условиях эксплуатации материала (3). На рисунке 10 показано изменение температуры на образце-свидетеле и образце из порошкового сплава в цикле теплового нагружения при испытаниях.

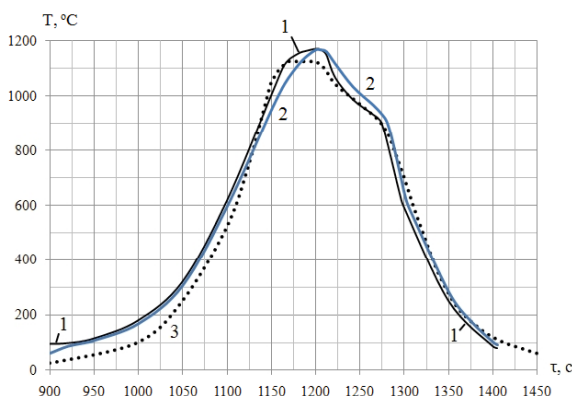


Рис. 9. Изменение температуры при испытаниях: 1 – газового потока; 2 – кромки образца-свидетеля; 3 – газового потока при эксплуатации

После двух циклов испытаний с максимальной температурой 1150 °С изменения геометрических размеров и эрозионного уноса не выявлено.

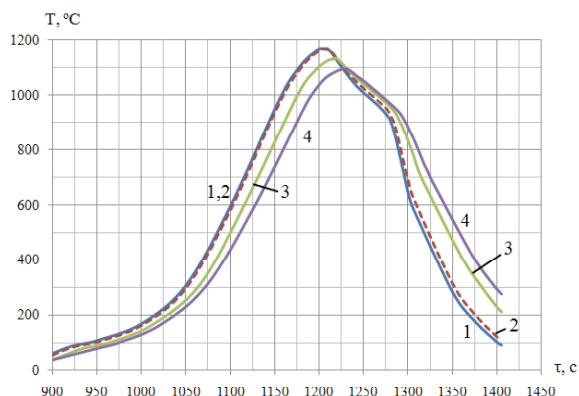


Рис. 10. Изменение температуры на образце-свидетеле (1 – кромка; 2 – удаление 3 мм от кромки; 3 – тыльная часть) и образце из порошкового сплава (4) при испытаниях

С целью исследования влияния высокотемпературного газового потока на механические свойства сплава определяли изменение макро- и микротвердости до и после испытаний.

Для определения макротвердости применяли портативный твердомер COMPUTEST SC производства фирмы ERNST (Швейцария). Измерения твердости производили по Роквеллу по шкале С(HRC). Нагрузка на алмазный индентор, изготовленный в виде конуса с углом при вершине 100°, составляла 49 Н (табл. 2).

Таблица 2

Значения макротвердости по Роквеллу

Твердость по Роквеллу, шкала HRC							
До испытаний				После испытаний			
1	2	3	среднее	1	2	3	среднее
35,7	36,1	35,3	35,7	32,4	34,1	33,9	33,4

После испытаний отмечено незначительное снижение значения твердости (33,4 HRC) по сравнению со значениями твердости до испытаний (35,7 HRC), которое составляет 6-7%.

Измерения микротвердости проводили на приборе ПМТ-3 на микрошлифах при 500^x вдавливанием алмазной четырехгранной пирамидки с углом в вершине 136° при нагрузке 100 г и получали отпечаток.

Полученные значения микротвердости приведены в табл. 3. Микротвердость составляет 3 ГПа. Изменение значений микротвердости после испытаний составляет 6-7% и практически находится в пределах разброса данных, что обусловлено частичным прохождением процессов снятия наклепа после деформационного упрочнения.

Анализ результатов показывает, что незначительное снижение микротвердости и макротвердости (6-7%) свидетельствует о сохранении проч-

ностных свойств материала после двукратного воздействия высокотемпературного газового потока. Таким образом материал показал требуемую термостойкость в высокотемпературном газовом потоке и может быть использован для изготовления жаростойких конструкций планера ТКС.

Таблица 3

Значения микротвердости			
Микротвердость, Н _ц , ГПа			
До испытаний		После испытаний	
2,69; 2,69;	сред- нее	2,82; 2,82;	сред- нее
2,96; 3,45;		2,89; 2,89;	
3,11; 2,96;		2,89; 2,89;	
3,19; 3,45;		2,89; 2,82;	
3,03; 3,03		3,11; 2,25	
		2,83	

Анализ результатов показывает, что незначительное снижение микротвердости и макротвердости (6-7%) свидетельствует о сохранении прочностных свойств материала после двукратного воздействия высокотемпературного газового потока. Таким образом материал показал требуемую термостойкость в высокотемпературном газовом потоке и может быть использован для изготовления жаростойких конструкций планера ТКС.

4. Изготовление макета воздухозаборника прямоточного воздушно-реактивного двигателя

Отработка технологии изготовления проводилась для фрагмента кромки воздухозаборника прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) планера ТКС (рис. 11).

Для получения заготовки требуемых размеров был разработан метод терморреакционной пайки, так как дисперсно-упрочненные сплавы имеют не удовлетворительную свариваемость.

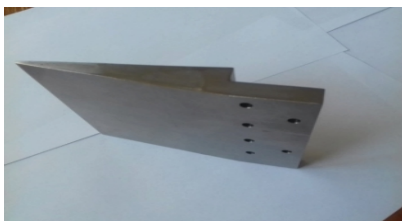


Рис. 11. Макет кромки воздухозаборника из сплава ЮИПМ-NiCr20Ю3

При пайке сплава с применением алюминиевой фольги толщиной 13 мкм проявился нелинейный характер терморреакционного взаимодействия (рис. 12) – на поверхности видно образование пространственно организованных структур, по-видимому, обусловленных нелинейным законом взаимодействия. Соединение образцов некачественное. Увеличение толщины фольги до 50 мкм приводит к образованию на

поверхности одного из сопряженных образцов слоя тугоплавкого интерметаллида NiAl (рис. 13), что подтверждается рентгенографическим анализом.



Рис. 12. Поверхность образцов ЮИПМ-NiCr20Ю3 в области пайки при 1300 °С алюминием

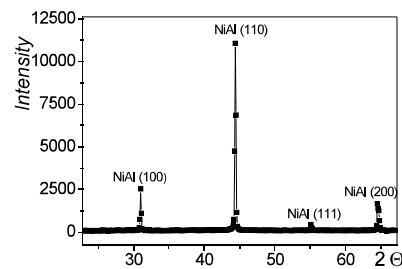


Рис. 13. Рентгенограмма зоны пайки алюминием

Это соединение образуется за счет высоких скоростей его синтеза и кристаллизации [4]. Введение в припой титана позволило увеличить продолжительность существования жидкой фазы и прочность соединения. Наблюдается мощное проявление действия капиллярных сил, что приводит к сдвигу соединяемых образцов (рис. 14). Оптимизация припоя позволила установить состав, который при 1300 °С образует прочное соединение и кристаллизуется в процессе получасовой выдержки при этой температуре.



Рис. 14. Паяные образцы нихрома с 20% Cr, 3% Al, 1.5% Y₂O₃

Припой требуемого состава получался прокаткой прессовок из соответствующих порошков. Все компоненты порошкового припоя являются основными легирующими металлами при разработке нихромовых сплавов.

После пайки образцы подвергались прокатке с обжатием 20%. При этом разрушения образцов и образования трещин не происходило. На рисунке 15 видна мелкозернистая микроструктура зоны пайки.



Рис. 15. Микроструктура зоны пайки.
Увеличение 1000^X

Мехобработка сплава ЮИПМ-NiCr20Ю3 проводилась на заготовках, отожженных при температуре 1250 °С в течение 2 часов. Контроль качества отжига осуществляется путем измерения твердости по Роквеллу шкала С. Величина твердости должна быть практически равна нулю. Фрезерование ведется твердосплавными фрезами на режимах, предназначенных для резания нержавеющей стали. В результате механической обработки получен макет кромки воздухозаборника (рис. 11).

Заключение

Таким образом, разработан новый дисперсно-упрочненный порошковый сплав ЮИПМ-NiCr20Ю3 с плотностью 7900 м³/кг и прочностью при комнатной температуре 1020 МПа, а при 800 °С – 542 МПа. Сплав имеет достаточную пластичность, что позволяет его обрабатывать давлением, и паяется при температуре 1300 °С припоем, компоненты которого явля-

ются основными упрочнителями нихромовых сплавов. Из сплава ЮИПМ-NiCr20Ю3 изготовлен технологический макет фрагмента кромки воздухо-заборника прямооточного воздушно-реактивного двигателя.

Имеющийся комплекс свойств позволяет использовать этот сплав в жаропрочных конструкциях изделий ракетно-космической техники, многократно работающих в условиях экстремально высоких температур.

Литература

1. Шульга А.В. Структура и свойства быстрозакаленных нержавеющей сталей [Текст] // Сб. трудов. Научная сессия МИФИ-2001. – М.: –2001. –Т.9. –С.79-80.
2. Шульга А.В. Поведение бора и углерода в жаропрочных сложнолегированных никелевых сплавах [Текст] // Сб. трудов. Научная сессия МИФИ-2003. –М.: –2003. –Т.9. –С.151-154.
3. Коломышев П.Т. Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов [Текст]. – М.: Металлургия. –1991. – 237 с.
4. Солнцев В.П. Термокинетика реакционных процессов, инициированных контактным плавлением в порошковых металлических смесях на основе никеля с алюминием [Текст] / В.П. Солнцев, В.В. Скороход, К.М. Петраш, Т.А. Солнцева // Адгезия расплавов и пайка материалов, 2014.–№ 47.– С. 25-34.

Поступила в редакцию 24.05.2017 г.

І.О. Гусарова, О.М. Потапов, В.П. Солнцев, Т.О. Солнцева, К.Н. Петраш, В.А. Назаренко, Г.О. Фролов, Т.А. Манько. Розробка порошкового сплаву на основі ніхрома і технології виготовлення жаростійких конструкцій аерокосмічних апаратів, що повертаються

Розроблено технологію отримання дисперсно-зміцненого порошкового сплаву ЮИПМ-NiCr20Ю3, визначено його функціональні характеристики. Зразок сплаву випробуваний при робочих температурах на стенді Інституту проблем міцності НАН України. Відпрацьовано режими пайки сплаву, виготовлено макет кромки повітрозабірника з розробленого сплаву. Показано, що наявний комплекс властивостей дозволяє використовувати створений сплав для аерокосмічних літальних апаратів, які багаторазово працюють в умовах екстремально високих температур, що розвиваються в умовах аеродинамічного нагріву.

Ключові слова: дисперсно-зміцнений ніхромовий сплав, високі температури, літальні апарати.

I.A. Gusarova, A.M. Potapov, V.P. Solntsev, T.A. Solntseva, K.N. Petrash, V.A. Nazarenko, G.A. Frolov, T.A. Manko. Nickel-based powder alloys and the technology of heat-resistant structures of returned aerospacecrafts development

The technology of obtaining the dispersed-hardened powder alloy YUIPM-NiCr20Cu3 is developed, its functional characteristics are determined. The alloy sample was tested at operating temperatures at the Institute of Strength Problems stand of the National Academy of Sciences of Ukraine. The modes of alloy soldering have been worked out, the mock-up of the air intake edge from the developed alloy has been prepared. It is shown that the existing complex of properties makes it possible to use the created alloy for aerospace aircraft, which repeatedly operate under extremely high temperatures, developed under aerodynamic heating conditions.