

06.5

Формирование интерметаллического покрытия Ni_3Al холодным газодинамическим напылением механически обработанной в планетарной мельнице порошковой смеси $Ni-Al$

© А.Е. Чесноков, А.В. Смирнов, В.О. Дроздов, К.А. Скороход

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия
E-mail: chae@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 9 ноября 2022 г.

В окончательной редакции 23 декабря 2022 г.

Принято к публикации 30 декабря 2022 г.

Приводятся особенности формирования интерметаллического покрытия Ni_3Al холодным газодинамическим напылением механически обработанной в планетарной мельнице и подготовленной в V -образном смесителе порошковой смеси $Ni-Al$. Показано, что коэффициент использования порошка в ~ 1.5 раза больше при получении покрытий из механически обработанной порошковой смеси компонентов Ni и Al . Последующая высокотемпературная обработка в камере печи создает условия для образования интерметаллида системы $Ni-Al$ различной стехиометрической пропорции.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, композиционные покрытия, высокоэнергетическая планетарная мельница, никель, алюминий, нитрид титана, рентгенофазовый анализ.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.06.54808.19421

В современной промышленности используются механические узлы и отдельные детали со сложной формой поверхности. При этом материалы, из которых изготавливаются детали, не всегда допускают воздействие высоких температур, поэтому восстановление поверхности и создание защитных слоев методами газотермического напыления или лазерной наплавки не представляется возможным. Методом холодного газодинамического напыления (ХГН) покрытия формируются из нерасплавленных частиц, материал которых должен быть достаточно пластичным. Частицы из материалов с высокой твердостью (керамика и твердые сплавы) при ударе с преградой не деформируются, происходит процесс эрозии поверхности [1].

В настоящее время особое внимание уделяется жаропрочным интерметаллическим сплавам, обладающим повышенной твердостью [2–4]. Поскольку напыление твердых частиц методом ХГН затруднительно, одним из способов решения отмеченной проблемы для получения композиционных покрытий, например, состава Ni_3Al является напыление порошковой смеси металлов никеля и алюминия с последующим *in situ* синтезом при его термической обработке. Подготовка напыляемой смеси может осуществляться как традиционным перемешиванием на вибростенде или в V -образном смесителе, так и с помощью высокоэнергетических аттрикторов.

Необходимо отметить, что физические и прочностные свойства сплавов в значительной степени зависят от структуры материала, в том числе от размера зерна. В работах [5,6] показана возможность управления процессами кристаллизации за счет введения наноразмерных тугоплавких частиц, что приводит к измельчению его зеренной структуры.

Целью настоящей работы является получение интерметаллидных покрытий методом холодного газодинамического напыления из порошковой смеси $Ni-Al$, в том числе с добавлением ультрадисперсных частиц нитрида титана.

В работе использовались порошок алюминия (марка АСД-1), никеля (марка ПНК) и ультрадисперсные частицы нитрида титана.

Подготовка порошковой смеси проводилась в V -образном смесителе в течение 8 h и в высокоэнергетической планетарной мельнице „Активатор-2SL“ в воздушной атмосфере со следующими параметрами обработки: масса загружаемых шаров 160 g, масса обрабатываемого материала 100 g для каждого барабана, ускорение мелющих тел $a = 117g$, время механической обработки 30 s. В качестве мелющих тел использовались стальные шары диаметром 5 mm. Характеристики частиц порошковых смесей представлены в табл. 1.

При механической обработке смеси порошков более 30 s частицы алюминия нагреваются до температуры, близкой к температуре плавления, в связи с чем помимо их налипания на поверхность мелющих тел и стенки стаканов (как и в работе [7]) наблюдается образование слоистых механических композитов, характеризующихся низкой пластичностью материала. При напылении подобного материала в качестве ускоряющего и транспортирующего газа желательнее использовать азот, а также увеличивать температуру его предварительного подогрева, однако в ряде случаев для нанесения покрытий это невозможно, в частности, из-за материала подложки.

Вид механически обработанной композиционной смеси представлен на рис. 1.

Таблица 1. Состав и вид механической обработки смеси порошков для холодного газодинамического напыления

Номер смеси	Состав смеси порошков	Вид механической обработки	Средний размер (стандартное отклонение)*, μm
1	3Ni+Al	V-образный смеситель	22.56 (17.01)
2	3Ni+Al	Планетарная мельница	38.84 (30.87)
3	3Ni+Al+1 wt.% TiN	» »	27.43 (26.48)

*Определение гистограмм объемного распределения частиц по размерам проводилось на лазерном дифракционном анализаторе LS 13 320 (Beckman Coulter).

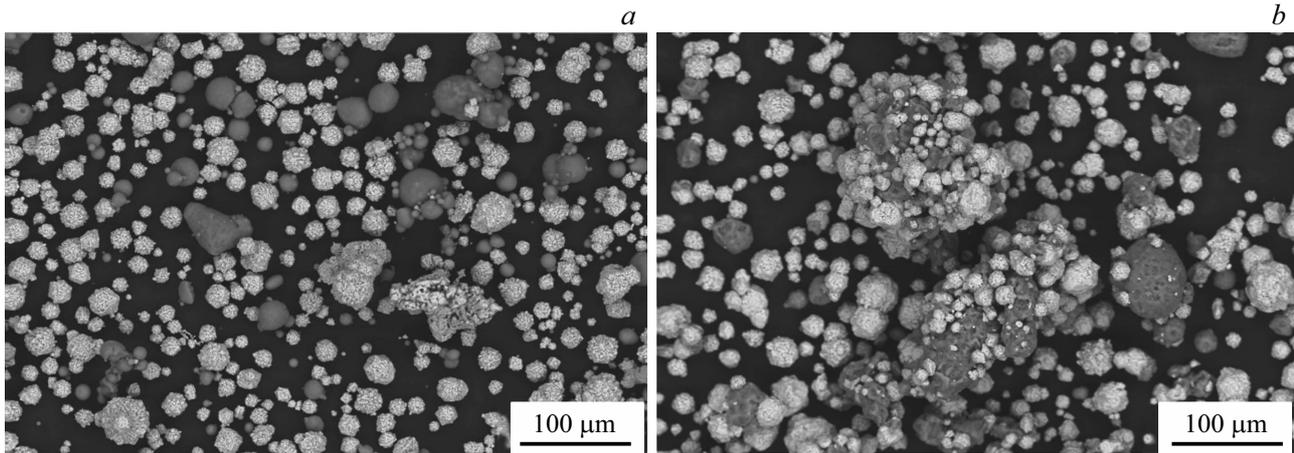


Рис. 1. Общий вид порошковой смеси никеля и алюминия после смешивания в V-образном смесителе (a) и механической обработки (b). Светлые частицы — никель, темные — алюминий.

Из рис. 1, b видно, что в механически обработанной смеси присутствуют агломераты, состоящие из множества частиц никеля и алюминия микронного размера, имеющих неплотную упаковку.

Фазовый состав подготовленных для напыления смесей и полученных из них покрытий изучался методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра D8 ADVANCE (Bruker, США) с использованием монохроматизированного $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Анализ рентгенограмм механически обработанных порошковых смесей показал, что происходит только перемешивание компонентов с образованием агломерированных частиц без химических превращений.

Напыление смесей, как и в работе [8], проводилось на экспериментальной установке ХГН высокого давления (ИТПМ СО РАН, Россия) на подложке из титана (марка VT20).

Морфология и структура образцов изучались с помощью электронного микроскопа Evo MA15 (Carl Zeiss) с использованием детектора обратнорассеянных электронов. Для количественной характеристики компонентов покрытия использовался программный пакет с открытым исходным кодом ImageJ. По десяти снимкам микрофотографий шлифов покрытий определялась суммарная площадь частиц никеля, закрепившихся в анализируемой

области, которая позволила сделать оценку его весовой доли в материале.

Термическая обработка образцов осуществлялась в муфельной вакуумной печи ПМ-1700АВ (ООО „Русуниверсал“, Челябинск, Россия). Предварительно была произведена откачка рабочей камеры до остаточного давления $p = 10^{-3}$ МПа. Образцы с покрытиями выдерживались в течение часа при температуре в рабочей камере 500°C .

Коэффициент использования порошка является одним из основных параметров, характеризующих процесс напыления покрытий. В табл. 2 приведены значения удельной массы покрытий и относительного коэффициента использования порошка, определенного как отношение массы покрытия из механически обработанного порошка к массе покрытия, полученного из исходных частиц.

На рис. 2 представлен общий вид покрытий. Структура напыленных покрытий плотная, с равномерно распределенными по объему частицами никеля.

Из этого рисунка видно, что покрытие, полученное из механически обработанной в планетарной мельнице порошковой смеси, содержит в себе большее количество частиц никеля, что подтверждает исследование элементного состава и графический анализ шлифов поперечного среза (табл. 2).

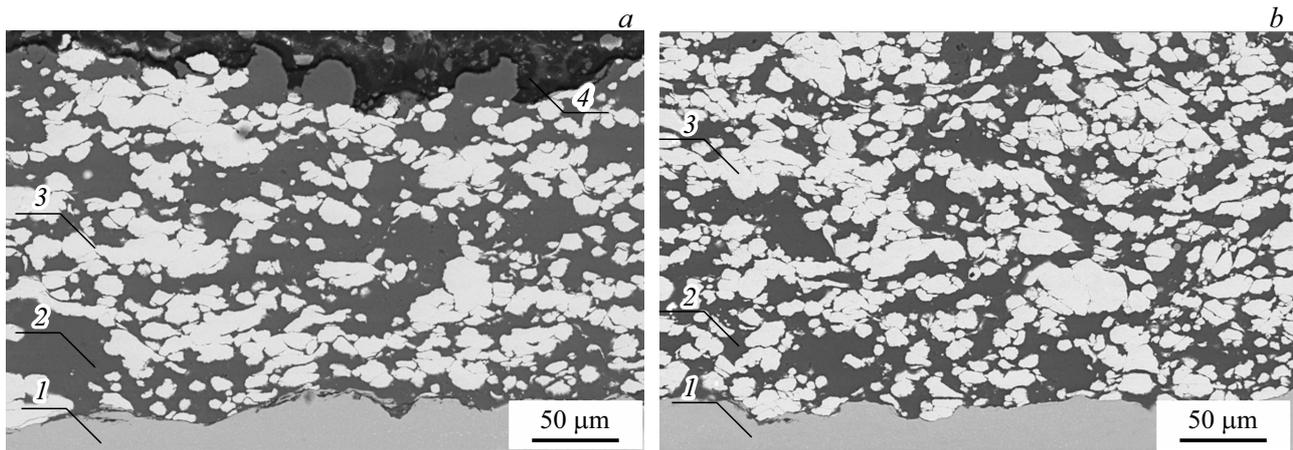


Рис. 2. Микрофотографии шлифа поперечного среза покрытий. *a* — смесь № 1, *b* — смесь № 2. 1 — подложка, 2 — алюминий, 3 — никель, 4 — смола.

Таблица 2. Характеристики покрытий

Номер смеси	Удельная масса покрытия, kg/m^2	Коэффициент использования порошка	Доля никеля, wt.%	
			Анализ фотографий шлифов	Элементный анализ
1	1.56	1	70.1	68.8
2	2.55	1.63	76.8	75.5
3	2.37	1.52	77.2	75.9

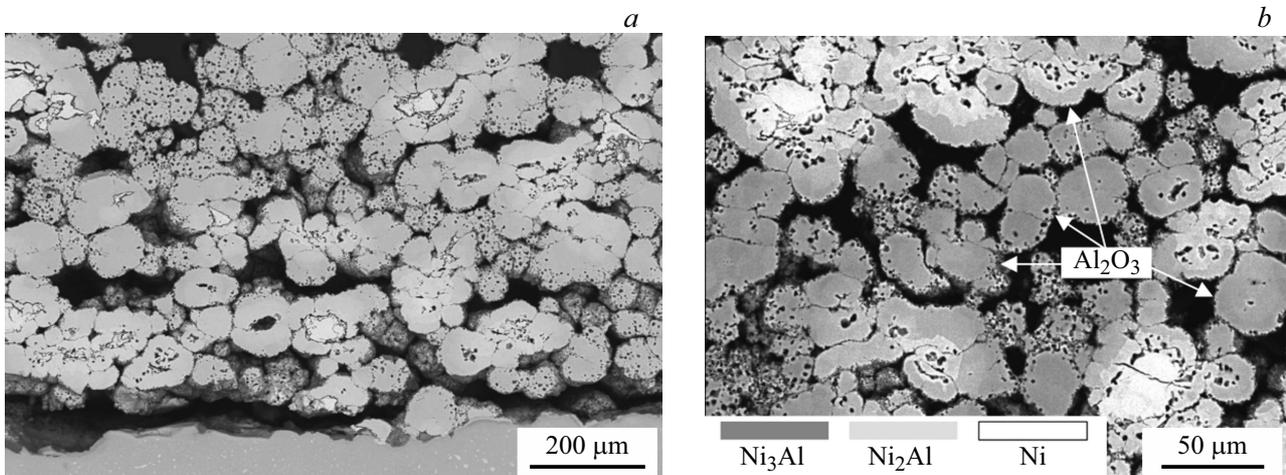


Рис. 3. Микрофотографии шлифа поперечного среза термически обработанных покрытий при различном увеличении. *a* — смесь № 1, *b* — смесь № 2.

Анализ табл. 2 показывает преимущество использования механической обработки в планетарной мельнице порошковой смеси перед ее напылением: в ~ 1.5 раза возрастает коэффициент использования порошка, поскольку напыление покрытий осуществляется агломерированными частицами с остаточной пористостью. Аналогичные результаты были получены в работе [9]. Наблюдается увеличение весового содержания никеля в материале покрытия по сравнению с его содержанием

в покрытии, полученном из порошковой смеси № 1 (табл. 2). Однако в полученном материале покрытия содержание никеля недостаточно для полной реакции всех компонентов смеси.

На рис. 3, *a* представлен шлиф термически обработанных покрытий, структура которых содержит распределенную по объему материала пористость, обусловленную диффузией алюминия в объем никелевых частиц. Протекание *in situ* синтеза в микрообъемах сопровожда-

ется появлением новых химических соединений, таких как NiAl, Ni₃Al и Al₂O₃, что подтверждено результатами рентгенофазового анализа.

Согласно данным энергодисперсионного анализа, в покрытии присутствуют частицы с градиентным фазовым составом. Частицы могут содержать крупные ламеллы Ni, которые находятся, как правило, в центре. В средней части частицы из-за недостаточного содержания алюминия формируется соединение NiAl, в приповерхностном слое — интерметаллид Ni₃Al, на поверхности частицы образуется тонкая пленка оксида алюминия, которая имеет более высокую температуру плавления и является диффузионным барьером алюминия (рис. 3, б).

Таким образом, использование механической обработки в планетарной мельнице порошковой смеси состава Ni–Al перед ее напылением позволяет увеличить в ~ 1.5 раза коэффициент использования порошка и увеличить весовое содержание никеля в материале покрытия. Для полного превращения материала покрытия в интерметаллид необходимо проводить термическую обработку образцов в рабочей камере печи в атмосфере инертного газа (аргона), а также увеличивать температуру и время выдержки.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2023 гг. (проект АААА-А17-117030610124-0) с использованием оборудования Центра коллективного пользования „Механика“ (Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, V. Fomin, *Cold spray technology* (Elsevier Science, 2006). DOI: 10.1016/B978-0-08-045155-8.X5000-5
- [2] В.Е. Овчаренко, Е.Н. Боянгин, Неорган. материалы, **52** (7), 787 (2016). DOI: 10.7868/S0002337X16070125 [V.E. Ovcharenko, E.N. Boyangin, *Inorg. Mater.*, **52** (7), 729 (2016). DOI: 10.1134/S0020168516070128].
- [3] К.Б. Поварова, О.А. Базылева, А.А. Дроздов, Н.К. Казанская, А.Е. Морозов, М.А. Самсонова, *Материаловедение*, № 4, 39 (2011).
- [4] Э.В. Галиева, *Твердофазное соединение интерметаллидного сплава на основе Ni₃Al и жаропрочного никелевого сплава с использованием сверхпластической деформации*, канд. дис. (ИПСМ РАН, Уфа, 2021).
- [5] А.Н. Черепанов, В.О. Дроздов, В.И. Мали, А.Г. Маликова, А.М. Оришич, *ФММ*, **122** (3), 323 (2021). DOI: 10.31857/S0015323021030037 [A.N. Cherepanov, V.O. Drozdov, V.I. Mali, A.G. Malikova, A.M. Orishich, *Phys. Metals Metallogr.*, **122**, 301 (2021). DOI: 10.1134/S0031918X21030030].
- [6] В.Е. Овчаренко, Г. Лю, Е.Н. Боянгин, в сб. *VI Международ. науч.-практ. конф. „Инновационные технологии и экономика в машиностроении“* (ТПУ, Томск, 2015), с. 134. <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C30/030.pdf>
- [7] С.Г. Вадченко, Е.В. Суворова, Н.И. Мухина, И.Д. Ковалев, *Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*, № 1, 4 (2020). DOI: 10.17073/1997-308X-2020-4-10
- [8] А.Е. Чесноков, А.В. Смирнов, В.Ф. Косарев, С.В. Клинков, В.С. Шикалов, *Письма в ЖТФ*, **48** (13), 42 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.13.52744.1923
- [9] А.Е. Чесноков, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, А.В. Смирнов, В.С. Шикалов, *ПМТФ*, **63** (1), 57 (2022). DOI: 10.15372/PMTF20220108 [A.E. Chesnokov, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, A.V. Smirnov, V.S. Shikalov, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **63**, 47 (2022). DOI: 10.1134/S0021894422010084].