

УДК 669.017

Г. Ф. Ловшенко, д-р техн. наук, доц., Ф. Г. Ловшенко, д-р техн. наук, проф.,
З. М. Ловшенко, канд. техн. наук, доц.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изучено влияние условий механического легирования на свойства высокопрочных наноструктурных никелевых материалов с интерметаллидным и оксидным упрочнением и проведена оптимизация процесса.

Технологический процесс получения механически легированных материалов включает: подбор исходных компонентов, обработку шихты в механореакторе и получение механически легированной гранулированной композиции, отжиг композиции, изготовление полуфабрикатов горячим прессованием. Наиболее важным этапом является обработка шихты в механореакторе. Несмотря на некоторые изменения на последующих технологических этапах, фазовый состав, структура и свойства механически легированных композиций, в основном, наследуются конечным продуктом – компактным материалом. Анализ результатов исследований в этой области [1–3] позволяет установить общие закономерности формирования дисперсно-упрочненных наноструктурных механически легированных материалов, в том числе и никелевых, являющихся надежной научной базой при оптимизации технологического процесса и заключающихся в следующем.

При обработке порошковой шихты в механореакторе параллельно протекают процессы накопления дефектов кристаллического строения, вызывающие разрушение частиц, и происходит последующая сварка осколков, сопровождающаяся диффузией. Сварке предшествуют адгезия и агломерация по ювенильным поверхностям разрушаемых частиц. В результате многократно повторяющихся разрушений и сварки осколков формируется гранулированная

композиция, в которой исходные компоненты или продукты их взаимодействия связаны и равномерно распределены по объему.

На начальном этапе обработки, как правило, превалирует разрушение, в последующем – адгезия, агломерация и сварка, в результате протекания которых средний размер гранул непрерывно увеличивается. В дальнейшем между сваркой и разрушением устанавливается динамическое равновесие, размер гранул стабилизируется. Основными факторами, оказывающими влияние на приведенный процесс, являются природа обрабатываемых материалов и энергонапряженность режима обработки. Они определяют характер и развитие механически активируемых превращений, влияющих как на упрочнение композиционных частиц, так и на кинетику изменения размера гранул. В зависимости от исходного состава системы, подвергаемые механическому легированию, делятся на три группы. К первой относятся композиции, в которых механически активируемые фазовые превращения незначительны. Упрочнение в них происходит, в основном, за счет измельчения структуры основы, а также частиц легирующего компонента, и величина его относительно невелика. Во-второй получают заметное развитие механохимические превращения, вызывающие образование наноразмерных упрочняющих фаз. Эффект упрочнения композиций в этом случае

достаточно высок. Для третьей группы характерно высокое упрочнение композиций, обусловленное активно протекающими механохимическими превращениями и сочетающее, как правило, дисперсное, дисперсионное и твердорастворное.

Вышеприведенный процесс формирования гранулированных композиций в наибольшей мере характерен для второй группы. В композициях первой группы, к которым относятся системы на основе мягких и пластичных металлов, например, алюминия, меди, с небольшим количеством низкоактивных легирующих добавок, первая стадия процесса – измельчение исходных компонентов не получает развития. В этом случае сварка превалирует над разрушением и размер образовавшихся композиционных гранул в процессе обработки непрерывно увеличивается. Особенностью формирования механически легированных композиций третьей группы, к которым относятся и разрабатываемые дисперсно-упрочненные никелевые материалы, является то, что после первичной грануляции разрушение начинает превалировать над сваркой и размер гранул уменьшается, стабилизируясь на определенном этапе обработки.

Формирование структуры основы при механическом легировании происходит в результате протекания динамической рекристаллизации. На начальной стадии размола в частицах происходит увеличение дефектности кристаллического строения. В течение 1...2 ч обработки в механореакторе плотность дислокаций повышается до значений не ниже 10^{12} см⁻². Достигнув критической величины, они перестраиваются, образуя соответствующие субструктуры. При большой плотности дефектов возникают фрагментированные зерна. С увеличением степени деформации размер фрагментов уменьшается, а угол разориентировки между ними возрастает. Границы между фрагментами становятся большеугольными. Фрагментация

приводит к измельчению кристаллитов до значений, не превышающих 100 нм. Плотность дислокаций при этом уменьшается. Субмикрокристаллическая структура с большой протяженностью поверхности раздела между компонентами способствует образованию центров кристаллизации новых фаз и ускоряет процесс их формирования.

Высокая стойкость материалов, работающих в широком температурном интервале, верхний предел которого составляет $0,85T_{пл}$, достигается комплексным легированием, обеспечивающим сочетание твердорастворного дисперсионного, дисперсного и зернограницного упрочнения. Для получения дисперсно-упрочненных материалов на основе металлов перспективны системы «основной металл – кислородосодержащее соединение – элемент, имеющий высокое сродство с кислородом». В качестве второго компонента эффективно использование ряда оксидов, обладающих низкой термодинамической стабильностью. При обработке шихты в механореакторе в композициях происходят термодинамически разрешенные фазовые механохимические превращения, вызывающие образование твердых растворов и соединений. Окислительно-восстановительные процессы активно протекают при энергии Гиббса взаимодействия ≤ -200 кДж/моль атомов кислорода.

В материалах конструкционного назначения, имеющих относительно невысокую концентрацию легирующих компонентов, для развития механически активируемого взаимодействия между ними, по меньшей мере, один из них, как правило, легирующий металл должен обладать достаточно высокой растворимостью в основе.

Механически легированные композиции являются термодинамически неравновесными дисперсно-упрочненными системами, основа которых представляет собой неомогенный твердый раствор со структурой нанометрическо-

го типа с большой протяженностью границ зерен и субзерен, стабилизированных ультрадисперсными выделениями ($d < 5$ нм) механически синтезированных соединений. Они, как правило, относятся к промежуточным фазам, рентгеноаморфны и в зависимости от природы приводят к дисперсионному или дисперсному упрочнению. Первое обусловлено наличием интерметаллидов, второе – термодинамически стабильных оксидов. При этом роль упрочняющих фаз заключается в стабилизации границ зерен и субзерен, величина поверхности которых и определяет, в основном, степень упрочнения. Структура характеризуется следующими параметрами: размер зерен ≤ 100 нм, размер блоков ≤ 50 нм, плотность дислокаций $\leq 10^{11}$ см⁻². Во всех случаях в структуре присутствуют дисперсные включения ($d < 0,1$ мкм) исходных легирующих компонентов шихты в количестве, не превышающем 30 % от исходного.

Для стабилизации фазового состава, структуры и свойств механически легированных композиций обязательной операцией является отжиг, который может сочетаться с термомеханической обработкой. При этом протекают такие физико-химические процессы, как диффузия, рекристаллизация, растворение включений, выделение и рост новых фаз и другие, способствующие переходу системы к равновесному или близкому к нему состоянию. Это обеспечивает стабильность структуры и свойств, являющихся необходимым условием надежности и долговечности изделий, работающих в жестких температурно-силовых условиях.

Термически активируемые диффузионные процессы и фазовые превращения получают развитие в пределах зерна. Это обусловлено блокировкой наноразмерными включениями термодинамически стабильных фаз границ зерен и субзерен, являющихся препятствием (барьером) межкусталлитной диффузии, определяющим существен-

ную разницу в фазовом составе и строении соседних зерен и высокую термическую стабильность фаз, не имеющих когерентной связи с основой, в том числе и включений исходных компонентов.

Компактные материалы независимо от природы матричного металла, полученные по разработанной технологии, имеют микрокристаллический тип структуры основы с размером зерен $\leq 0,5$ мкм, разделенных на блоки $\leq 0,1$ мкм, с плотностью дислокаций, равной $10^9 \dots 10^{10}$ см⁻², концентрирующихся по границам зерен и субзерен, закрепленных термодинамически стабильными включениями оксидов размером менее 20 нм, карбидов, нитридов, интерметаллидов – не более 100 нм. Структурный и фазовый состав материалов отличается от равновесного наличием зерен и групп зерен основы с разной концентрацией легирующих компонентов в твердом растворе и отдельных включений исходных компонентов размером менее 0,1 мкм. Структура характеризуется высокой стойкостью против длительного термического воздействия при температурах, достигающих $0,85T_{пл}$ основы.

Установлено, что в качестве упрочняющих фаз в механически легированных никелевых сплавах эффективны наноразмерные частицы оксидов алюминия Al_2O_3 и хрома Cr_2O_3 , образующиеся в процессе реализации технологии в результате механически и термически активируемого взаимодействия между алюминием и хромом, с одной стороны, и оксидами молибдена MoO_3 и никеля – с другой. Первый оксид (MoO_3) вводился в исходную шихту в качестве поставщика кислорода, а вторые (оксиды никеля) во всех случаях находились в шихте как продукт взаимодействия никеля с кислородом, содержание которого в порошке никеля, являющегося основой композиций, составляло 0,2 %. Оптимизация состава исходной шихты, результаты которой приведены в [1–3], показала, что высоким комплексом механических

свойств обладают материалы, изготовленные из композиций, состоящих из порошков «Ni – 3 % Al», «Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO₃».

Целью работы являлась оптимизация процесса получения механически легированных гранулированных композиций на основе порошковых систем Ni–Al и Ni–Al–MoO₃ для производства высокопрочных наноструктурных дисперсно-упрочненных никелевых материалов.

Методика механического легирования, применяемое оборудование и приборы

В качестве исходных компонентов для изготовления сплавов служили стандартные порошки никеля ПНК-ОТ2 (ГОСТ 9722-79), алюминия ПА4 (ГОСТ 6058-73) и оксида молибдена (MoO₃, ч. д. а.). Исследование выполнено на двух материалах оптимального состава [3–6], получаемых из шихты, состоящей из порошков: Ni – 3 % Al; Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO₃. Параметрами оптимизации являлись механические свойства компактных материалов – пределы прочности при растяжении при 20, 800 и 1000 °С, а также относительное удлинение.

Реакционное механическое легирование осуществлялось в механореакторе на основе вибратора гирационного типа с четырьмя камерами объемом 1 дм³ каждая из стали 12Х18Н9Т с изолированным рабочим пространством. Рабочими телами служили шары диаметром 9,525 мм из стали ШХ15СГ твердостью HRC62. Радиус круговых колебаний составлял 5 мм. Круговая частота колебаний бесступенчато регулировалась в пределах 22...29 с⁻¹, что приводило к изменению ускорения рабочих тел от 100 до 160 м·с⁻². Степень заполнения рабочей камеры шарами составляла 80 %.

Гранулированная композиция, полученная реакционным механическим легированием, подвергалась холодному

брикетированию в стальной пресс-форме методом двухстороннего прессования до плотности 70...75 % от теоретической. Брикет, обладающие достаточной прочностью и неразрушающиеся при переработке, получались прессованием композиции, насыпанной в контейнер из технического железа с толщиной стенки 0,2...0,3 мм.

Отжиг брикетов осуществлялся в аргоне. Термическая обработка брикетов из механически легированной композиции первого состава проводилась при 900 °С, второго – при 1000 °С. Продолжительность отжига составляла 4 ч.

Полуфабрикаты получались горячей экструзией спеченных брикетов, нагретых до 1100 °С. Коэффициент вытяжки при экструзии равнялся 20. Температура нагрева матрицы ограничивалась теплостойкостью материала пресс-формы и составляла 600 °С. Детали пресс-формы для экструзии – матрица, фильера, пуансон изготавливались из стали 3Х2В8Ф и подвергались термической обработке, заключающейся в закалке с температуры 1100 °С и отпуске при 650 °С. Скорость истечения материала составляла 0,15 м·с⁻¹. Продуктом экструзии являлся прутки диаметром 12 мм.

Определение механических свойств проводилось на машине «INSTRON» на пропорциональных цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 4,0 и 5,0 мм с начальной расчетной длиной 20 и 25 мм соответственно.

Оптимизация процесса механического легирования осуществлялась в два этапа. На первом – с целью определения граничных значений факторов, являющихся необходимыми данными для оптимизации технологии, методом однофакторного эксперимента исследовано влияние условий обработки на механические свойства материалов; на втором – с использованием математического планирования экспериментов (метод Бокса-Уилсона) найдена и описана область оптимума.

Результаты исследования и их обсуждение

Обработка вышеприведенных порошковых композиций обеспечивает формирование материалов, основа которых состоит из зерен размером $\leq 0,5$ мкм, разделенных на блоки величиной $\leq 0,1$ мкм, с границами, стабилизированными образовавшимися в процессе реализации технологии наноразмерными включениями оксидов и интерметал-

лидов. В материалах, получаемых из шихты, содержащей оксид молибдена MoO_3 , основной упрочняющей фазой является оксид алюминия Al_2O_3 . При отсутствии в исходной порошковой смеси MoO_3 упрочнение обусловлено, прежде всего, наличием алюминидов Ni_3Al [3–6]. Влияние основных факторов обработки шихты в механореакторе на механические свойства материалов приведено на рис. 1.

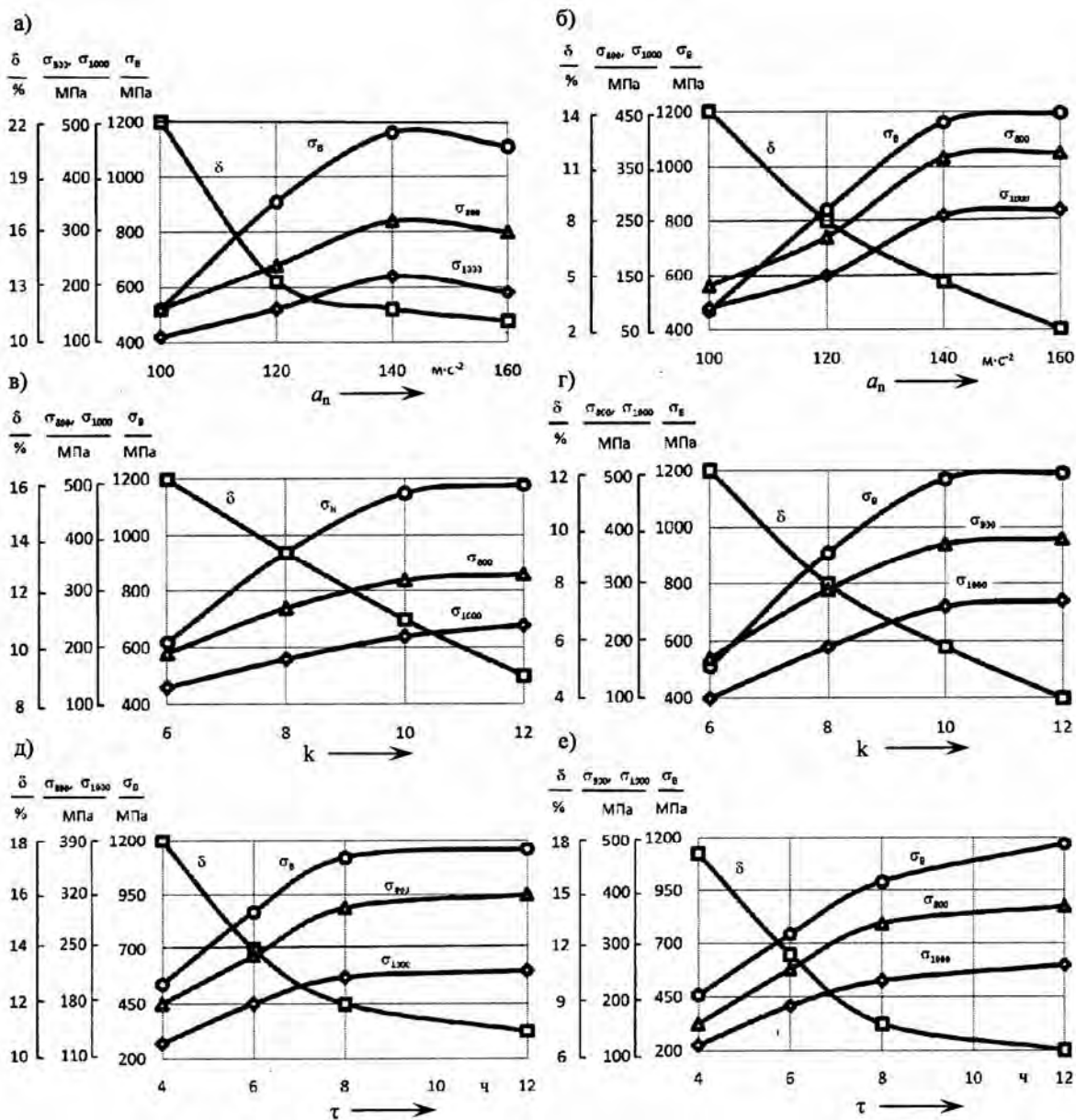


Рис. 1. Влияние условий механического легирования на свойства материалов: а, в, д – $\text{Ni} - 3\% \text{Al}$; б, г, е – $\text{Ni} - 1,5\% \text{Al} - 3,5\% \text{MoO}_3$

При исследовании влияния на свойства материалов одного из факторов другие имели постоянное значение, находящееся в области оптимума. При этом как для одного, так и для другого материала ускорение рабочих тел равнялось $140 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$, а отношение объемов рабочих тел и шихты – 10. Продолжительность обработки в механореакторе шихты Ni – 3 % Al составляла 8 ч; Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO_3 – 12 ч.

Кинетика и полнота протекания механически активируемых превращений, определяющих свойства материалов, зависят от энергонапряженности режима механического легирования, под которой понимается мощность, затрачиваемая на единицу массы обрабатываемой шихты, а также продолжительности обработки. Для ряда систем в определенном интервале значений энергонапряженности режима обработки, превышающих пороговое, установлена прямо пропорциональная зависимость между этим фактором и скоростью механохимических превращений [7]. Факторами, влияющими на энергонапряженность механореактора вибрационного типа, являются амплитуда и частота колебаний помольной камеры, определяющие нормальное ускорение размалываемых тел, отношение объемов рабочих тел и обрабатываемой шихты и степень заполнения помольной камеры рабочими телами.

Мощность, потребляемая вибрационным механореактором [8], находится из выражения

$$N = aM_c\omega^3r,$$

где a – величина, характеризующая положение центра тяжести размалываемой нагрузки; M_c – полная масса шаровой загрузки; ω – частота круговых колебаний; r – радиус колебаний.

Рассчитанная по уравнению $a_n = (2\pi\omega)^2r$ частота колебаний, необходимая для достижения заданного ускорения рабочих тел, находящегося в интервале $100\ldots160 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$, при котором получают развитие механохимические

превращения, при радиусе круговых колебаний, равном 5 мм, изменяется в пределах $22\ldots29 \text{ с}^{-1}$.

При оптимальной степени заполнения помольной камеры рабочими телами, обеспечивающей максимальное значение ударного нагружения и его частоту и не зависящей от состава обрабатываемых композиций, равной 80 % от ее объема, с увеличением ускорения рабочих тел со 100 до 160 с^{-2} значение ударного воздействия на 1 мм поверхности помольной камеры изменяется в пределах 6...12 МПа – по зависимости, близкой к линейной. Влияние данного фактора на частоту нагружения описывается кривой с максимумом. Наибольшая величина этого параметра, равная $5\ldots6 \text{ с}^{-1}$, наблюдается при ускорении $140\ldots160 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$.

Анализ результатов по исследованию влияния условий обработки шихты в механореакторе на свойства (см. рис. 1) позволяет сделать вывод, что значения факторов, обеспечивающих получение материалов, однозначно превосходящих по прочности аналоги, могут изменяться в пределах: ускорение рабочих тел – $130\ldots150 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$, отношение объемов рабочих тел и шихты – 8...12, продолжительность обработки – 6...12 ч. Причем для достижения максимальной прочности материала (Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO_3), упрочненного синтезирующимся в процессе реализации технологии оксидом алюминия, по сравнению с материалом (Ni – 3 % Al), упрочненного алюминидом никеля, энергонапряженность режима обработки или ее продолжительность должны быть больше.

Полученные данные явились основой для установления граничных значений ускорения рабочих тел и отношения объемов рабочих тел и шихты при механическом легировании для описания области оптимума. При этом продолжительность обработки шихт состава Ni – 3 % Al и Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO_3 составляла 8 и 12 ч соответственно. Матрица планирования и результаты

эксперимента представлены в табл. 1. Средние значения параметров оптимизации – пределы прочности при 20 °С ($\bar{y}_1$) и 1000 °С ($\bar{y}_2$), приведенные в матрице планирования, получены по результатам двух параллельных опытов.

В результате статистической обработки экспериментальных данных (табл. 2 и 3) получены математические модели, адекватно представляющие эксперимент.

Табл. 1. Матрица планирования и результаты эксперимента при описании области оптимума

Характеристика	Фиктивная переменная	Фактор					Материал			
		основной		производный			Ni – 3 % Al		Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO ₃	
		a _и , м·с ⁻²	k							
Основной уровень Интервал варьирования (I) Верхний уровень Нижний уровень		140	10				Параметры оптимизации			
		20	2				σ _в , МПа	σ ¹⁰⁰⁰ , МПа	σ _в , МПа	σ ¹⁰⁰⁰ , МПа
		160	12							
		120	8							
Код	x ₀	x ₁	x ₂	x ₁ x ₂	x ₁ ¹ = x ₁ ² – 2/3	x ₂ ¹ = x ₂ ² – 2/3	ȳ ₁ ¹	ȳ ₁ ²	ȳ ₂ ¹	ȳ ₂ ²
Опыты										
1	+1	-1	-1	+1	+1/3	+1/3	590	100	530	110
2	+1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3	880	190	880	200
3	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3	1070	200	1130	250
4	+1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3	850	170	850	220
5	+1	+1	0	0	+1/3	-2/3	1110	190	1190	270
6	+1	-1	0	0	+1/3	-2/3	910	160	840	170
7	+1	0	+1	0	-2/3	+1/3	1170	240	1190	270
8	+1	0	-1	0	-2/3	+1/3	940	180	910	190
9	+1	0	0	0	-2/3	-2/3	1160	220	1170	260

Для материала состава Ni – 3 % Al:

– предел прочности при растяжении (σ_B , МПа)

$$y_1^1 = 1186 + 109x_1 + 124x_2 - 26x_1x_2 - 188x_1^2 - 143x_2^2; \quad (1)$$

– предел прочности при растяжении при 1000 °С (σ_B^{1000} , МПа)

$$y_2^1 = 220 + 19x_1 + 30x_2 - 15x_1x_2 - 45x_1^2 - 11x_2^2. \quad (2)$$

Для материала состава Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO₃:

– предел прочности при растяжении (σ_B , МПа)

$$y_1^2 = 1192 + 150x_1 + 152x_2 - 20x_1x_2 - 190x_1^2 - 152x_2^2; \quad (3)$$

– предел прочности при растяжении при 1000 °С (σ_B^{1000} , МПа)

$$y_2^2 = 259 + 43x_1 + 33x_2 - 15x_1x_2 - 37x_1^2 - 27x_2^2. \quad (4)$$

Графическая интерпретация математических моделей представлена на рис. 2 и 3.

Анализ результатов математического моделирования показывает, что оптимальные значения основных факторов механического легирования, обеспечивающих максимальную прочность материалов (σ_B и σ_B^{1000}), полученных из шихт составов Ni – 3 % Al и Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO₃, подвергнутых обработке в механореакторе в течение 8 и 12 ч соответственно, близки. Величина ускорения рабочих тел находится в пределах 140...150 м·с⁻². Отношение объемов рабочих тел и шихты составляет 10...12. При этом материалы, полученные из шихты по оптимальному режиму, по прочности не менее чем в 1,5 раза превосходят аналоги, но уступают последним по пластично-

сти. Относительное удлинение у материала, упрочненного интерметаллидом

(Ni_3Al), превышает 10 %, а оксидом (Al_2O_3) – 5 %.

Табл. 2. Результаты статистической обработки экспериментальных данных при описании области оптимума (материал – Ni – 3 % Al)

Параметры	Фактор							
	b_0'	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}	Δb_0
σ_B , МПа	965	1186	109	124	-26	-188	-143	± 30
σ^{1000} , МПа	183	220	19	30	-15	-45	-11	± 10

Продолжение табл. 2

Параметры	Фактор							
	Δb_i	Δb_{ij}	Δb_{ii}	S_y^2	$S_{ад}^2$	f_1	f_2	$F_{0,05}^{расч}$ $F_{0,05}^{табл}$
σ_B , МПа	± 14	± 16	± 23	423	800	9	3	1,9 3,9
σ^{1000} , МПа	$\pm 4,5$	$\pm 5,4$	± 10	45	24	9	3	0,53 8,9

Табл. 3. Результаты статистической обработки экспериментальных данных при описании области оптимума (материал – Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO_3)

Параметры	Фактор							
	b_0'	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}	Δb_0
σ_B , МПа	964	1192	150	152	-20	-190	-152	± 34
σ^{1000} , МПа	216	259	43	33	-15	-37	-27	± 12

Продолжение табл. 3

Параметры	Фактор							
	Δb_i	Δb_{ij}	Δb_{ii}	S_y^2	$S_{ад}^2$	f_1	f_2	$F_{0,05}^{расч}$ $F_{0,05}^{табл}$
σ_B , МПа	± 16	± 19	± 27	566	1187	9	3	2,1 3,9
σ^{1000} , МПа	$\pm 5,9$	$\pm 7,1$	± 10	79	190	9	3	2,4 3,9

Заключение

Проведенное исследование позволило установить оптимальные условия обработки шихты в механореакторе, обеспечивающие получение высокопрочных наноструктурных дисперсно-упрочненных никелевых материалов. Значения основных факторов механического легирования равны: ускорение рабочих тел – $140...150 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$, отношение объемов рабочих тел и шихты – $10...12$, степень помольной камеры ра-

бочими телами – 80 %, продолжительность обработки – $8...12$ ч. Материалы, изготовленные из шихты, подвергнутой обработке в механореакторе по оптимальному режиму, по прочности не менее чем в 1,5 раза превосходят аналоги, но уступают последним по пластичности. Относительное удлинение у материала, упрочненного интерметаллидом (Ni_3Al), превышает 10 %, а оксидом (Al_2O_3) – 5 %.

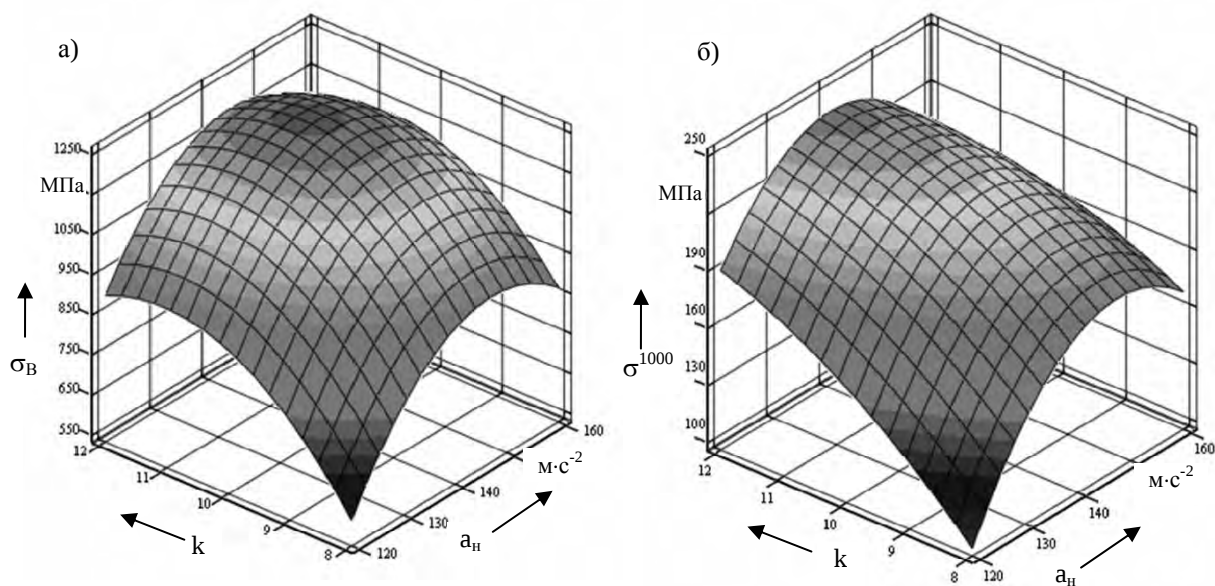


Рис. 2. Зависимость предела прочности при растяжении при 20 °С (а) и при 1000 °С (б) материала состава Ni – 3 % Al от ускорения рабочих тел и отношения объемов рабочих тел и шихты

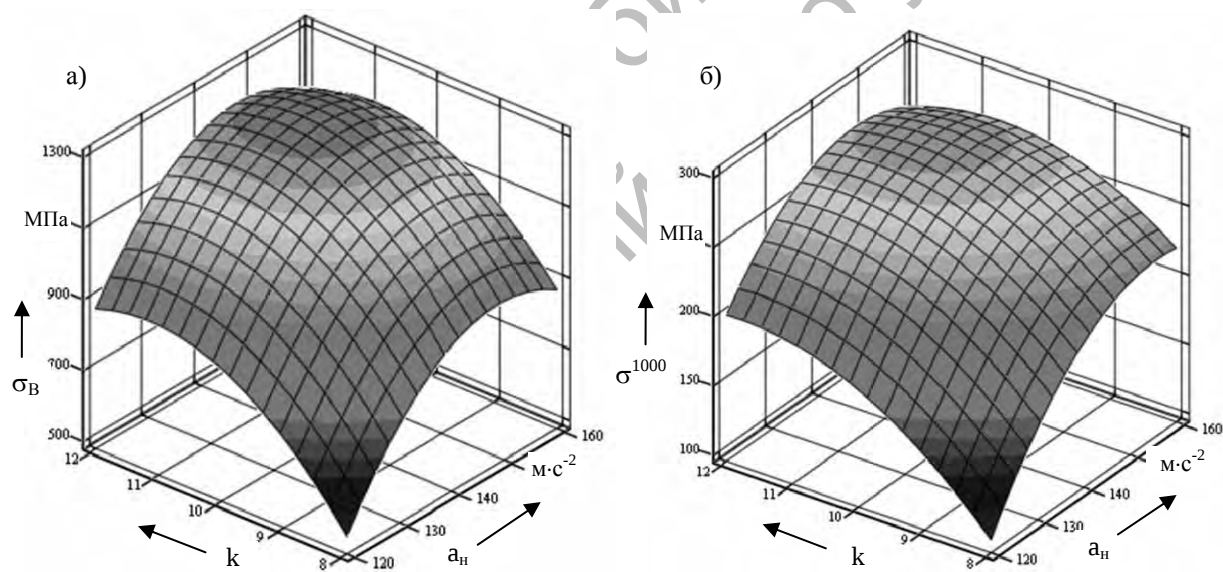


Рис. 3. Зависимость предела прочности при растяжении при 20 °С (а) и при 1000 °С (б) материала состава Ni – 1,5 % Al – 3,5 % MoO₃ от ускорения рабочих тел и отношения объемов рабочих тел и шихты

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Витязь, П. А.** Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск : Беларуская навука, 1998. – 352 с.
2. **Ловшенко, Г. Ф.** Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе

металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 264 с.

3. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина ; под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с. : ил.

4. **Ловшенко, Ф. Г.** Получение, структура и свойства механически легированных наноструктурных никелевых материалов / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 1. – С. 10–17.

5. **Ловшенко, Ф. Г.** Закономерности формирования фазового состава и структуры механически легированных никелевых композиций / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 4. – С. 96–106.

6. **Ловшенко, Ф. Г.** Оптимизация состава механически легированных дисперсно-упрочненных никелевых материалов / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 3. – С. 110–120.

7. **Хайнике, Г.** Трибохимия : пер. с англ. / Г. Хайнике. – М. : Мир, 1987. – 584 с.

8. **Rose, H. E.** Vibration mills and vibration milling / H. E. Rose, R. M. S. Sullivan. – L., 1961. – 302 p.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 29.12.2009

G. F. Lovshenko, F. G. Lovshenko, Z. M. Lovshenko
Optimization of the process of mechanical alloy
at the reception of age-hardened nanostructural
mechanically alloyed nickel materials

The influence of conditions of mechanical alloy on the properties of age-hardened nanostructural mechanically alloyed nickel materials with intermetallids and oxide hardening has been studied and the optimization of the process has been carried out.