

Влияние наноразмерных частиц и способа смешивания на механические свойства порошковой стали СП70

В. С. Панов, Ж. В. Еремеева, Р. А. Скориков, Г. В. Михеев,
Г. Х. Шарипзянова, Ю. С. Тер-Ваганяц

Рассмотрено влияние вида смешивания и природы вводимых наночастиц на механические свойства порошковой стали СП70. Определяли зависимости твердости, предела прочности при трехточечном изгибе от концентрации нанодисперсной добавки и условия смешивания и спекания порошковых сталей. Максимальные значения твердости и прочности достигаются при введении в шихту 0,1 масс. % нитрида кремния и смешивания по двухступенчатой технологии: смешивание в ультразвуковой ванне и последующее смешивание в смесителе “Турбула” в течение 30 мин. Показано, что после смешивания по двухступенчатой схеме и смешивание в планетарно-центробежной мельнице уже при спекании при температуре 1273 К длительностью 120 мин механические свойства практически достигают своих максимальных значений и дальнейшее увеличение времени и температуры выдержки не оказывают существенного влияния на их величину.

Ключевые слова: порошковая сталь, железный порошок, графит, наноразмерный порошки, нановолокна углерода “Таунит”, смеситель “Турбула”.

Введение

В настоящее время порошковые материалы применяют практически во всех известных отраслях науки и техники, без них не может обойтись автомобильная промышленность и металлообработка, медицина и ядерные исследования. Это широкая гамма конструкционных и инструментальных материалов, материалов специального назначения, которые обладают высокой жаростойкостью, износостойкостью, стойкостью в агрессивных средах. Специфика порошковой металлургии, гибкость разработанных технологических схем делают ее арсеналом материалов и средств, обеспечивающих развитие многих отраслей промышленности. Данные технологии позволяют решать задачи, которые не могут быть решены никакими другими приемами. Одна из них это изготовление материалов и изделий с особыми составом, свойствами и структурой. Другая задача — изготовление материалов и изделий, подобных полученным обычными методами, но при более высоком комплексе физико-механических свойств. Так, благодаря хорошей формруемости

порошка, конфигурация получаемых из него изделий может быть максимально приближена к конфигурации готовой детали, что сводит к минимуму обработку резанием, и в итоге приводит к снижению затрат труда и материалов на изготовление деталей. Производство порошковых изделий отличается незначительным количеством технологических операций и легко поддается автоматизации. Порошковая металлургия особенно эффективна при больших масштабах производства разного типа конструкционных деталей (шестерни, втулки, крышки и многие другие).

В настоящее время имеются сведения о положительном влиянии добавок нанодисперсных частиц в разные порошковые материалы. Однако подобные исследования на сплавах железо-углерод еще не проводили. Учитывая, что такие сплавы являются одними из самых распространенных, работа в этом направлении представляется актуальной и перспективной.

В настоящее время для изготовления конструкционных деталей часто используют порошковую сталь ПК70-6.8 ГОСТ 28378-89 [1]. Даная порошковая

сталь имеет удовлетворительные характеристики прочности и пластичности и используется для средненагруженных деталей. Но для ряда деталей ее прочностных характеристик оказывается недостаточно.

Цель работы — создание порошковой стали с улучшенными прочностными характеристиками без существенного усложнения технологии ее производства.

Характеристики исходных материалов

Железный порошок

Исследуемые железоуглеродистые материалы изготавливали из порошков на основе железа ПЖР 2.200.28 (ГОСТ 9849-86) [1, 2], полученного путем распыления стали водой. Выбор указанной марки порошка обусловлен тем, что в настоящее время его наиболее широко используют на промышленных предприятиях при производстве порошковых изделий. Химический состав железного порошка приведен в табл. 1

Таблица 1

Химический состав железного порошка ПЖР 2.200.28							
Содержание элементов, масс. % (не более)							
Fe	C	Si	Mn	S	P	O	Остаток
осн	0,02	0,05	0,15	0,02	0,02	0,2	0,25

Углеродсодержащие компоненты

Основным легирующим элементом исследуемых материалов является углерод, вводимый в шихту в виде графита карандашного ГК-1 (ГОСТ 4404-78) [1, 3, 4], соответствующего нормам, указанным в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики карандашного графита ГК-1	
Зольность, %, не более	1,0
Массовая доля влаги, %, не более	0,5
Выход летучих веществ, %, не более	0,5
Массовая доля остатка на сетке № 0063, %, не более	0,5

Наноразмерные добавки

Первый критерий выбора наноразмерных частиц — низкая химическая активность. Наноразмерные частицы при нагревании до температур спекания формовок не должны взаимодействовать с железом и углеродом.

Второй критерий выбора — форма наноразмерных частиц, важно подобрать частицы максимально отличающиеся по форме.

Таким образом, были выбраны следующие материалы:

- углеродный наноматериал “Таунит” (форма частиц — нитевидная);
- нанодисперсный порошок Al_2O_3 (форма частиц — сферическая);
- нанодисперсный порошок Si_3N_4 (форма частиц — оскольчатая и игольчатая).

Углеродный наноматериал “Таунит”

Углеродный наноматериал (УНМ) “Таунит” производства ООО “НаноТехЦентр”, г. Тамбов представляет собой одномерные наномасштабные нитевидные образования поликристаллического графита в виде сыпучего порошка черного цвета. Гранулы УНМ микрометрических размеров имеют структуру спутанных пучков многостенных трубок (рис. 1). Основные параметры УНМ “Таунит” приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики УНМ “Таунит”	
Наружный диаметр, нм	20 – 70
Внутренний диаметр, нм	5 – 10
Длина, мкм	2 и более
Общий объем примесей, % (после очистки)	до 5 (до 1)
Насыпная плотность, г/см ³	0,4 – 0,6
Удельная геометрическая поверхность, м ² /г	120 – 130 и более

Благодаря своему строению нити УНМ “Таунит” практически не растворяются в железе при спекании порошковых формовок. Основная трудность при работе с углеродным наноматериалом “Таунит”, заключается в спутанности его нитей.

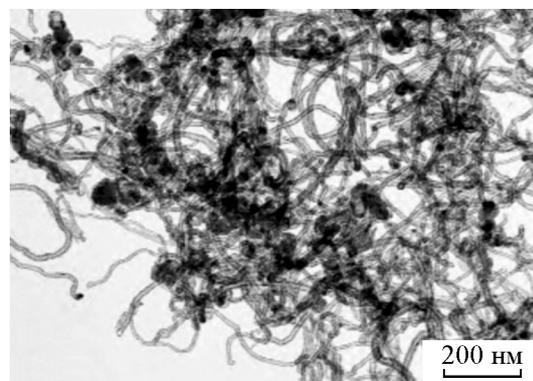


Рис. 1. Нити УНМ “Таунит”.

Нанодисперсный порошок оксида алюминия

В работе использовали нанодисперсный порошок оксида алюминия (смесь δ и θ фаз) производства компании “Плазмотерм”, г. Москва. Основные характеристики нанодисперсного порошка оксида алюминия представлены в табл. 4. Данный порошок получен сжиганием порошка алюминия в воздушной плазме. На рис. 2а представлена растровая электронная микроскопия (РЭМ) частиц порошка оксида алюминия. Частицы имеют правильную сферическую форму.

Таблица 4

Характеристики нанодисперсного порошка оксида алюминия	
Размер частиц, нм	60 – 120
Удельная геометрическая поверхность, м ² /г	12 – 25
Общий объем примесей, %	0,5
Насыпная плотность, г/см ³	0,1 – 0,2

Поскольку наночастицы обладают развитой поверхностью, их поверхностная энергия очень велика и, следовательно, они имеют склонность к агре-

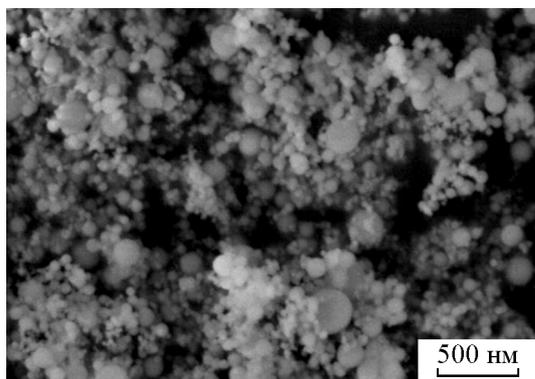
гированию, перед использованием была проведена проверка гранулометрического состава нанодисперсного порошка оксида алюминия на анализаторе субмикронных частиц Beckman COULTER № 5 с предварительной обработкой ультразвуком в среде изопропилового спирта. Результат представлен на рис. 2б.

Нанодисперсный порошок нитрида кремния

Использован нанодисперсный порошок нитрида кремния производства компании “Плазмотерм” (г. Москва). Характеристики нанодисперсного порошка нитрида кремния представлены в табл. 5. Частицы порошка имеют оскольчатую либо игольчатую форму (рис. 3а). По заявлению производителя, частицы порошка хорошо смачиваются водой с

Таблица 5

Характеристики нанодисперсного порошка нитрида кремния	
Размер частиц, нм	11 – 25
Удельная геометрическая поверхность, м ² /г	60 – 135
Общий объем примесей, %	0,2



а

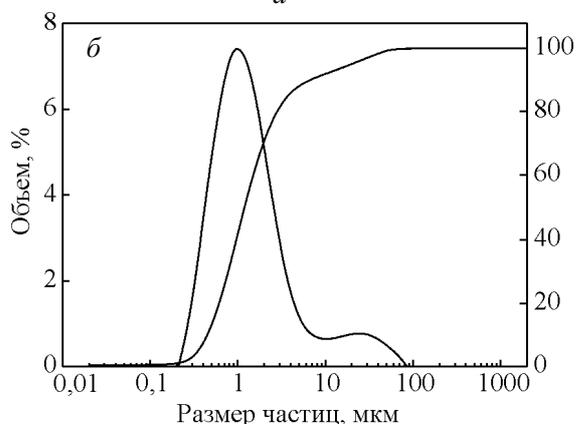
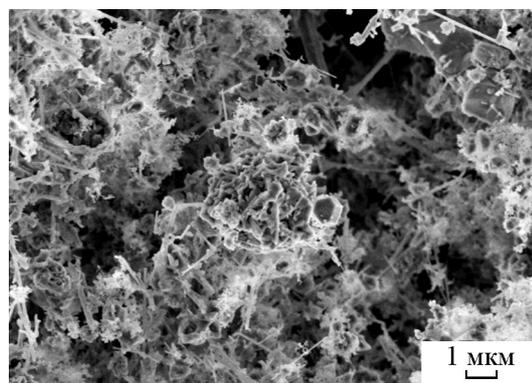


Рис. 2. Наночастицы оксида алюминия: а – РЭМ, б – гранулометрический состав.



а

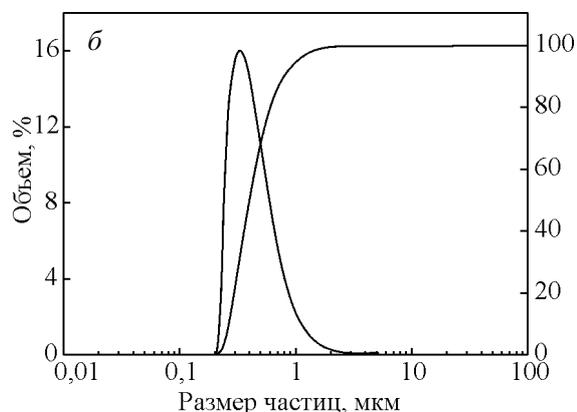


Рис. 3. Наночастицы нитрида кремния: а – РЭМ, б – гранулометрический состав.

образованием “пушистых хлопьев”, образуют устойчивую дисперсию после диспергирования с помощью ультразвука.

Поскольку наночастицы обладают развитой поверхностью, их поверхностная энергия очень велика и, следовательно, они имеют склонность к агрегатированию. Определен гранулометрический состав порошка на анализаторе субмикронных частиц Beckman COULTER №5 с предварительной обработкой ультразвуком в среде изопропилового спирта (рис. 3б).

Технологические процессы получения порошковых сталей

В работе представлены варианты технологических процессов получения порошковых сталей, легированных наноразмерными добавками, при которых определяя наиболее благоприятное соотношение вводимой наноразмерной добавки, способа смешивания и режимов спекания можно добиться высоких свойств материала.

Технологический процесс изготовления порошковых образцов состоял из следующих основных операций:

- отжиг железного порошка;
- приготовление и смешивание компонентов шихты;
- статическое холодное прессование (СХП);
- гомогенизирующее спекание в вакууме.

Перед использованием железного порошка проводили его отжиг при температуре 873 К длительностью 1 ч. Данная операция была предназначена для уменьшения содержания влаги в порошке.

Поскольку в состав шихты входили нанодисперсные порошки, равномерное размешивание которых является достаточно сложной задачей, были предложены для сравнения три технологии смешивания:

1. Смешивание в двухконусном смесителе (ДКС). Наиболее широко применяемый тип смешивания. Отличается низкой интенсивностью перемешивания и получаемой высокой неоднородностью состава. Время смешивания — 60 минут.

2. Смешивание в планетарно-центробежной мельнице (ПЦМ). Данный метод отличается высокой интенсивностью и получаемой однородностью состава. При этом порошок железа сильно наклепывается, что затрудняет его прессование, но существенно активизирует процесс спекания. Данный тип смешивания применяется редко из-за своей сложности. Время смешивания — 10 минут.

3. Раздельное двухступенчатое смешивание (УЗ + Т):

первая стадия — смешивание графита с нанодобавкой в нужной пропорции в жидкой среде под действием ультразвука. Цель данной стадии — разрушение конгломератов наноразмерных частиц, измельчение частиц графита и получение однородной смеси графит-наночастицы. Время смешивания — 20 минут.

вторая стадия — перемешивание полученной смеси графит-наночастицы с железным порошком в установке “TURBULA C2.0”. Смешивание в данной установке отличается высокой интенсивностью и получаемой однородностью состава. При этом практически отсутствует наклеп порошка. Время смешивания — 30 минут.

Образцы изготавливали односторонним прессованием с применением стеарата цинка в качестве смазки для уменьшения трения между прессовкой и стенками матрицы.

Спекание проводили в вакууме (10^{-4} мм рт.ст.) для предотвращения выгорания углерода и окисления образцов [5] при температуре спекания 1273 – 1473 К и времени спекания от 30 до 120 мин.

Однако в случае неравномерного размешивания наноразмерные частицы будут образовывать крупные конгломераты в порах материала, не давая положительного эффекта. Основной движущей силой процесса спекания является стремление любой системы к уменьшению свободной энергии. При этом, чем больше свободная энергия порошковой формовки, тем выше интенсивность ее спекания. Наноразмерные частицы, обладая большой удельной поверхностной энергией, способны даже при малых концентрациях существенно увеличивать интенсивность спекания формовок. При этом обязательным условием активизации процесса спекания является равномерное распределение наноразмерных частиц в объеме материала [6].

О ходе процесса спекания можно судить по усадке порошковой формовки. Экспериментальное исследование процессов объемной усадки при спекании прессовок проводили на цилиндрических образцах диаметром 12 мм и массой 3 г с относительной плотностью после прессования 50 – 90 %, спеченных в вакууме при температурах 1173 – 1373 К и времени выдержки от 15 до 180 мин.

Наиболее сильное влияние на усадку оказывает способ смешивания шихты. Максимальная усадка наблюдается при смешивании в ПЦМ, что объясняется механической активацией шихты при данном способе смешивания и большой пористостью образцов, получаемой после холодного прессования. Минимальная усадка происходит при смешивании

по отдельной двухступенчатой технологии, что можно объяснить более равномерным распределением графита и наноразмерных частиц по границам частиц железного порошка и их препятствованием росту зерен.

Для составов смешанных по отдельной двухступенчатой схеме УЗ + Т и в ПЦМ при длительности спекания больше 120 мин рост усадки останавливается. Это связано с тем, что при данных типах смешивания достигается высокая равномерность распределения наноразмерных частиц и благодаря их большой поверхности процесс спекания активизируется, вследствие чего все диффузионные процессы протекают быстрее. Наноразмерные частицы по причине своей большой поверхностной энергии вызывают сильные искажения кристаллической решетки железа, и подобная искаженная решетка является источником разных дефектов, в частности вакансий, что и способствует ускорению всех диффузионных процессов. Повышение доли дефектности участков решетки с уменьшением размера зерна ведет к неравновесности системы. Важнейшим свойством нанодисперсных частиц является высокая химическая активность их поверхности. При этом для составов смешанных в ДКС увеличение времени спекания с 120 до 180 минут дает рост усадки. Это объясняется тем, что при данном типе смешивания не достигается требуемая равномерность распределения нанодисперсных частиц в объеме материала, вследствие чего они активизируют процесс спекания в меньшей степени. По этой же причине будут отсутствовать препятствия для роста зерен, что так же увеличивает усадку.

Результаты и их осуждение

Исследование твердости

Были получены экспериментальные зависимости твердости образцов от типа введенной нанодисперсной добавки, ее концентрации, способа смешивания, и условий спекания.

На рис. 4 представлены зависимости твердости спеченных образцов от типа смешивания шихты и концентрации нанодисперсных добавок. Продолжительность спекания 120 мин при 1273 К.

При изучении результатов экспериментов было выявлено, что наилучшую твердость имеют составы смешанные по двухступенчатой схеме УЗ + Т и в ПЦМ. Это объясняется тем, что данные методы смешивания позволяют получить наибольшую равномерность распределения нанодисперсных добавок и графита в объеме материала. При данных

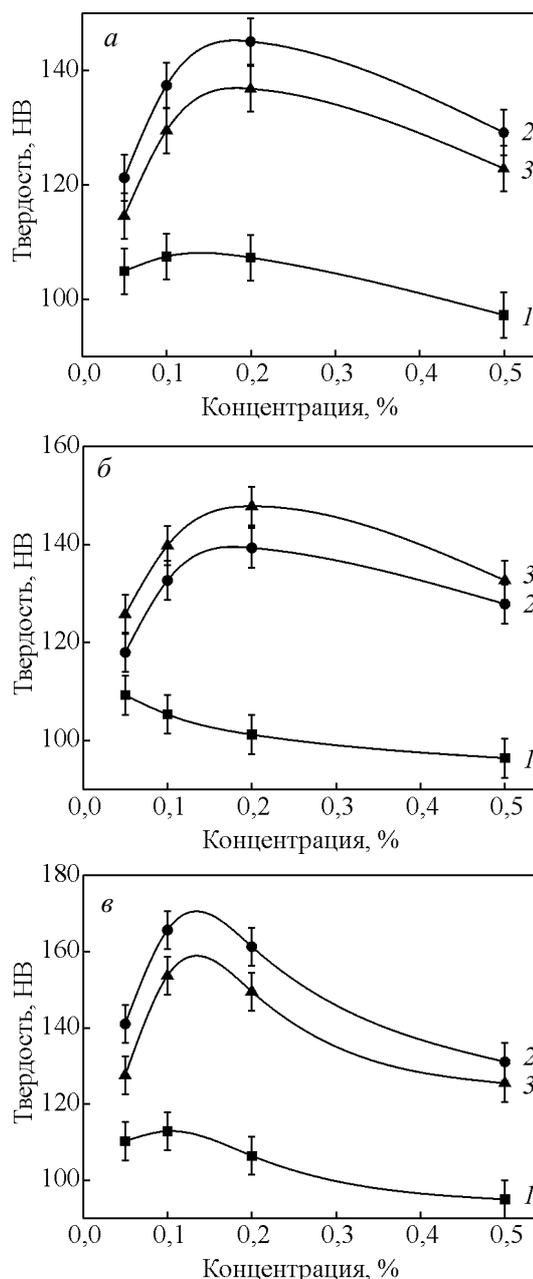


Рис. 4. Зависимость твердости образцов порошковой стали от типа смешивания: 1 – ДКС, 2 – УЗ + Т, 3 – ПЦМ, и концентрации нанодисперсных добавок: а – Al₂O₃, б – УНМ "Таунит", в – Si₃N₄.

типах смешивания зависимость твердости от концентрации имеет экстремум — с повышением концентрации нанодисперсных добавок твердость сначала увеличивается, а затем падает. Это можно объяснить тем, что слишком большое количество наночастиц равномерно распределенных по границам частиц железного порошка начинают препятствовать их спеканию, тем самым разупрочняя

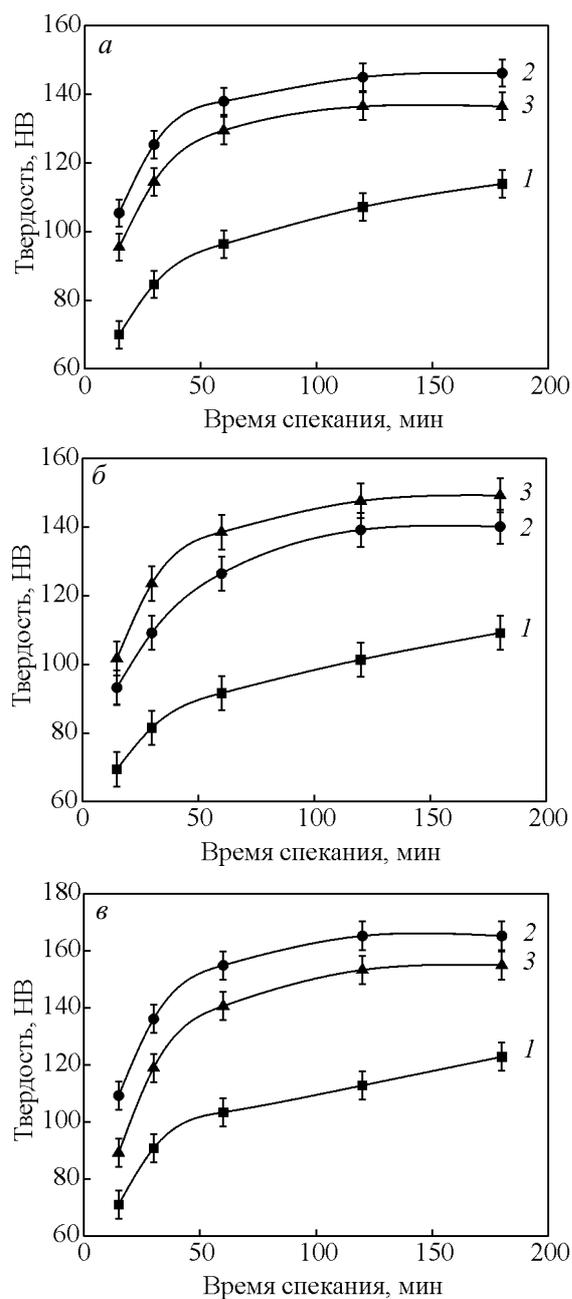


Рис. 5. Зависимость твердости образцов стали с нанодисперсными добавками: а – Al_2O_3 , б – УНМ “Таунит”, в – Si_3N_4 , от типа смешивания: 1 – ДКС, 2 – УЗ + Т, 3 – ПЦМ, и времени спекания.

материал. Изучая полученные зависимости, можно определить наиболее благоприятные концентрации для каждой вводимой нанодисперсной добавки: оксид алюминия — 0,2 %, УНМ “Таунит” — 0,2 %, нитрид кремния — 0,1 %. При смешивании в двухконусном смесителе такого эффекта не наблюдается, так как наночастицы в данном случае

агломерируются и их введение не дает ощутимого эффекта.

Анализируя зависимости твердости от способа смешивания, можно сделать следующее заключение, что для нанодисперсных порошков оксида алюминия и нитрида кремния наилучшим способом является смешивание по двухступенчатой схеме УЗ + Т, а для УНМ “Таунит” — в ПЦМ. Это можно объяснить тем, что УНМ “Таунит”, в отличие от нанодисперсных порошков оксида алюминия и нитрида кремния, представляют собой спутанные клубки многослойных нитей, поэтому именно в ПЦМ удастся их максимально возможно разбить и распределить по общему материалу.

На рис. 5 представлены зависимости твердости печенных образцов от типа смешивания шихты и времени спекания. Концентрация нанодисперсных добавок составляла, в масс. %: оксид алюминия — 0,2 %, УНМ “Таунит” — 0,2 %, нитрид кремния — 0,1 %. Спекание проводили при температуре 1273 К.

Из полученных зависимостей видно, что для составов смешанных по двухступенчатой схеме УЗ + Т и в ПЦМ достаточно спекания в течение 120 мин. Это связано с тем, что при данных типах смешивания достигается высокая равномерность распределения наноразмерных частиц и благодаря их большой поверхности процесс спекания активизируется, вследствие чего и достигается высокий уровень твердости данных материалов. Время спекания менее 120 мин недостаточно для получения равномерной и мелкозернистой структуры и для полного протекания всех диффузионных процессов в объеме заготовки порошковой стали. А время спекания более 120 мин не дает значительного повышения свойств. При этом для составов смешанных в ДКС увеличение времени спекания с 120 до 180 минут дает ощутимый прирост твердости. Это объясняется тем, что при данном типе смешивания не достигается требуемая равномерность распределения нанодисперсных частиц в объеме материала, вследствие чего они активизируют процесс спекания в меньшей степени.

На рис. 6 представлены зависимости твердости печенных образцов от типа смешивания шихты и температуры спекания. Концентрация нанодисперсных добавок составляла, в масс. %: оксид алюминия — 0,2 %, УНМ “Таунит” — 0,2 %, нитрид кремния — 0,1 %. Продолжительность процесса спекания составляла 120 минут.

Из представленных на рис. 6 зависимостей видно, что для составов смешанных по двухступенчатой схеме УЗ + Т и в ПЦМ достаточно температуры спекания 1273 К. Это связано с тем, что при данных

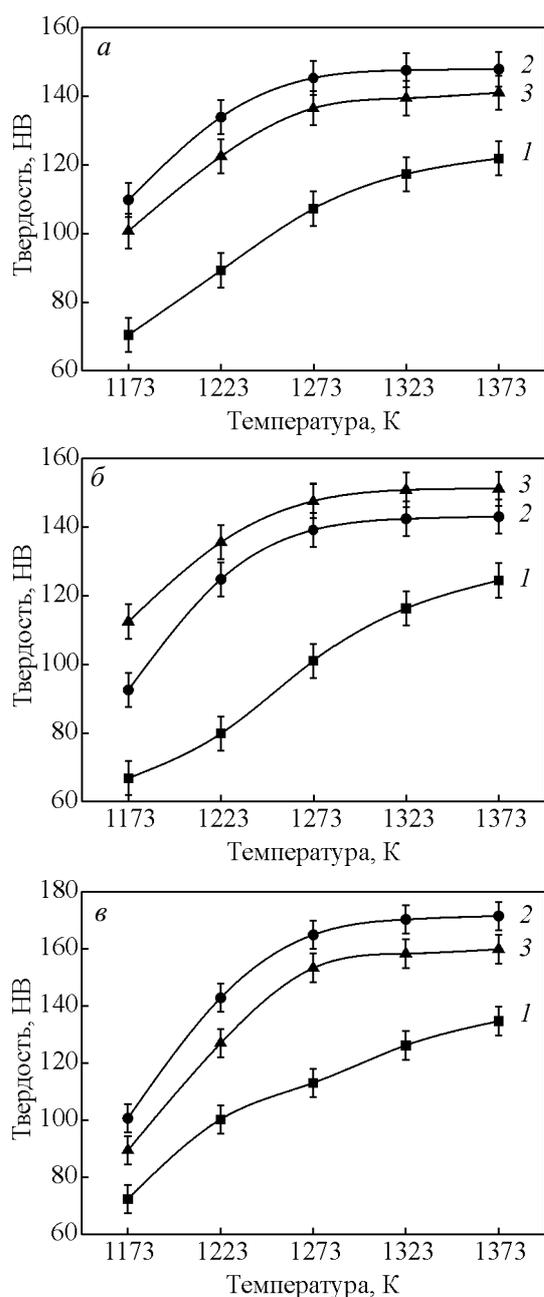


Рис. 6. Зависимость твердости образцов стали с нанодисперсными добавками: а — Al_2O_3 , б — УНМ "Таунит", г — Si_3N_4 , от типа смешивания: 1 — ДКС, 2 — УЗ + Т, 3 — ПЦМ, и температуры спекания.

типах смешивания достигается высокая равномерность распределения наноразмерных частиц и благодаря их большой поверхности процесс спекания активизируется, вследствие чего и достигается высокий уровень твердости данных материалов.

Температуры меньше 1273 К недостаточно для получения равномерной и мелкозернистой струк-

туры и для полного протекания всех диффузионных процессов в объеме заготовки порошковой стали. Температура свыше 1273 К не дает значительного повышения свойств. При этом для составов смешанных в ДКС увеличение температуры спекания выше 1273 К дает ощутимый прирост твердости. Это объясняется тем, что при данном типе смешивания не достигается требуемая равномерность распределения нанодисперсных частиц в объеме материала, вследствие чего они активизируют процесс спекания в меньшей степени.

Исследование предела прочности образцов

Были получены экспериментальные зависимости предела прочности образцов от типа вводимой в порошковую шихту нанодисперсной добавки, ее концентрации, способа смешивания и условий спекания.

На рис. 7 представлены зависимости предела прочности спеченных образцов от типа смешивания шихты и концентрации нанодисперсных добавок. Спекание проводили при температуре 1273 К и времени спекания 120 минут.

Наилучший предел прочности показывают составы смешанные по двухступенчатой схеме УЗ + Т и в ПЦМ. Это объясняется тем, что данные методы смешивания позволяют получить наибольшую равномерность распределения нанодисперсных добавок и графита в объеме материала. При данных типах смешивания на графиках присутствует экстремум — с повышением концентрации нанодисперсных добавок твердость сначала увеличивается, а затем резко падает. Это можно объяснить тем, что слишком большое количество наночастиц равномерно распределенных по границам частиц железного порошка начинают препятствовать их спеканию, тем самым разупрочняя материал. Изучая полученные зависимости, можно определить наиболее благоприятные концентрации для каждой вводимой нанодисперсной добавки: оксид алюминия — 0,2 %, УНМ "Таунит" — 0,2 %, нитрид кремния — 0,1 %. При смешивании в ДКС такого эффекта не наблюдается, так как наночастицы в данном случае агломерируются и их введение не дает ощутимого эффекта.

Анализируя зависимости предела прочности от способа смешивания, можно сделать следующее заключение, что для нанодисперсных порошков оксида алюминия и нитрида кремния наилучшим способом является смешивание по двухступенчатой схеме УЗ + Т, а УНМ "Таунит" — в ПЦМ. Это можно объяснить тем, что УНМ "Таунит", в отличие от нанодисперсных порошков оксида алюминия и

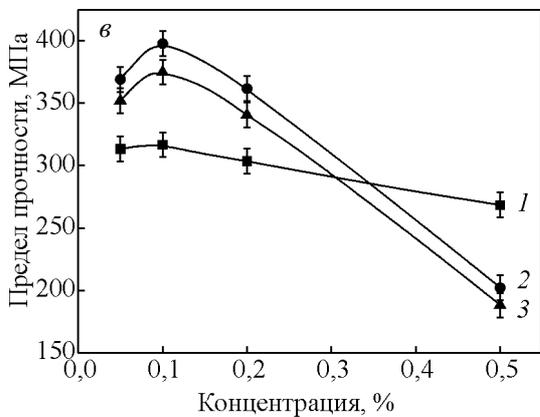
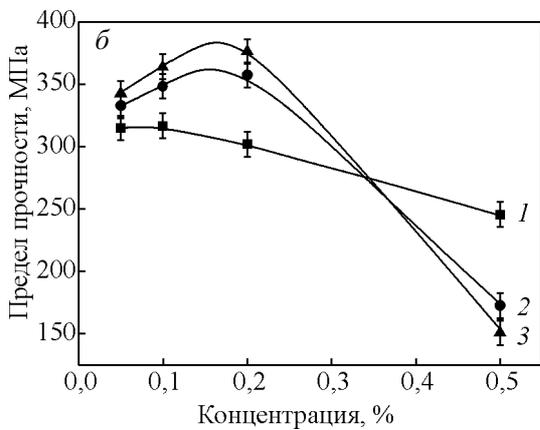
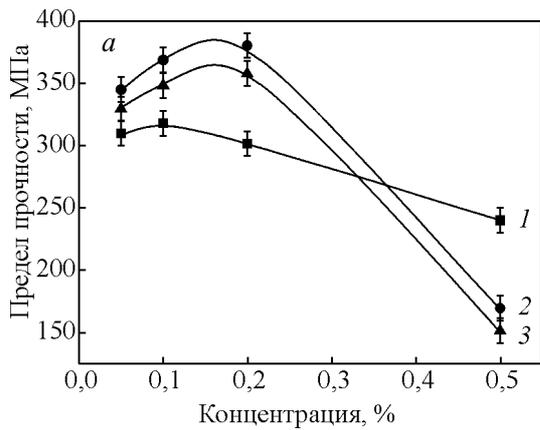


Рис. 7. Зависимость предела прочности при поперечном изгибе от типа смешивания: 1 – ДКС, 2 – УЗ+Т, 3 – ПЦМ, и концентрации нанодисперсных добавок: а – Al_2O_3 , б – УНМ “Таунит”, в – Si_3N_4 .

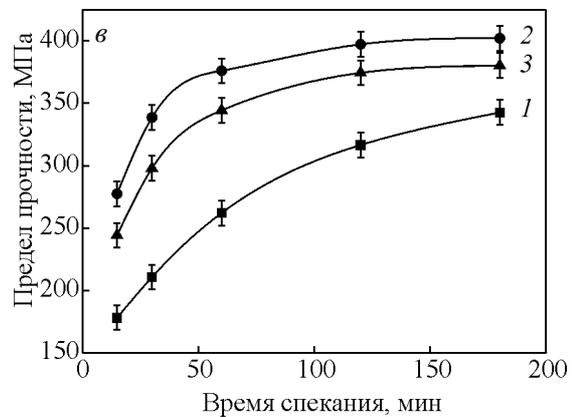
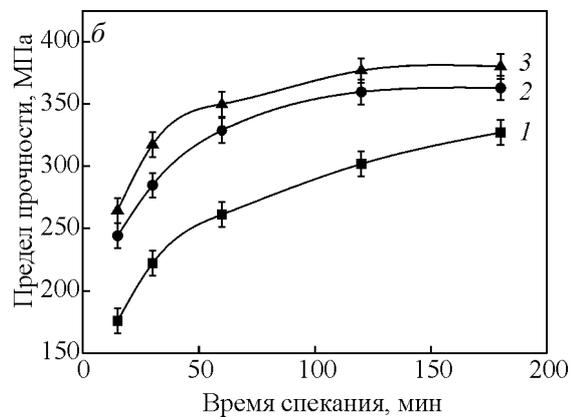
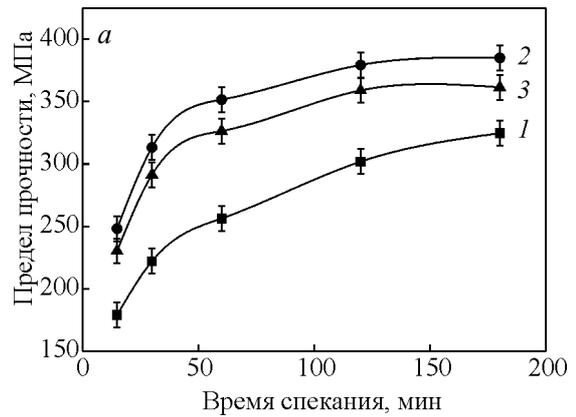


Рис. 8. Зависимость предела прочности при поперечном изгибе от времени спекания для разных типов смешивания: 1 – ДКС, 2 – УЗ+Т, 3 – ПЦМ, и разных нанодисперсных добавок: а – Al_2O_3 , б – УНМ “Таунит”, в – Si_3N_4 .

нитрида кремния, представляют собой спутанные клубки многослойных нитей, поэтому именно в ПЦМ удается их максимально возможно распутать и распределить по объему.

На рис. 8 представлены зависимости предела прочности спеченных образцов от типа смешивания

и времени спекания. Концентрация нанодисперсных добавок составляла: Al_2O_3 — 0,2 %, УНМ “Таунит” — 0,2 %, Si_3N_4 — 0,1 %. Спекание проводили при температуре 1273 К.

Из полученных зависимостей видно, что для составов смешанных по двухступенчатой схеме УЗ+Т и

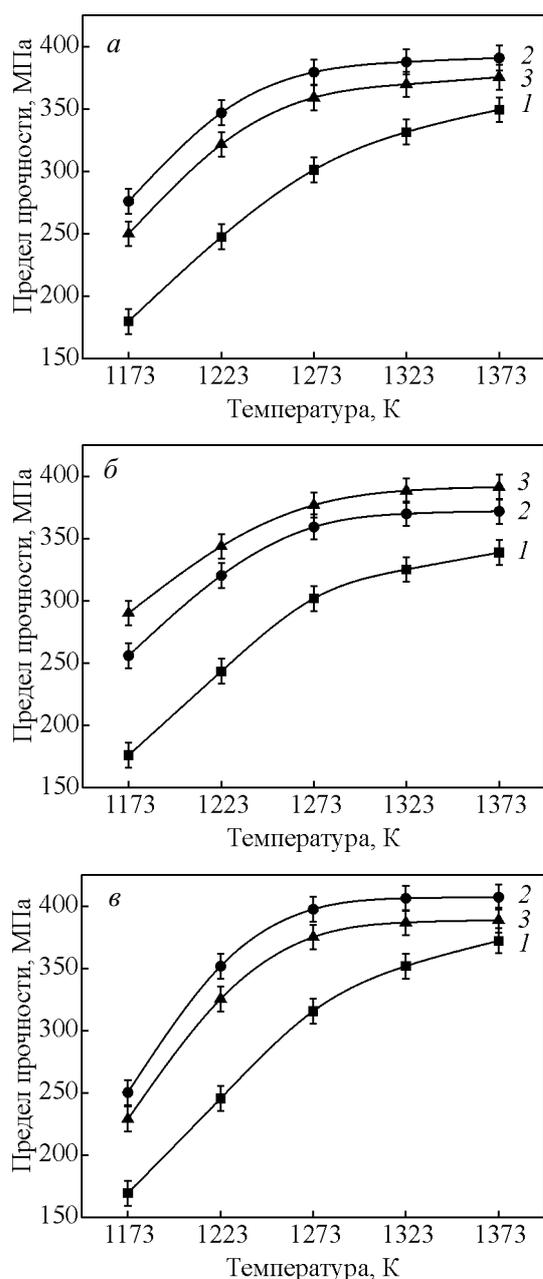


Рис. 9. Зависимость предела прочности при поперечном изгибе от температуры спекания для разных типов смешивания: 1 – ДКС, 2 – УЗ+Т, 3 – ПЦМ, и разных нанодисперсных добавок: а – Al_2O_3 , б – УНМ “Таунит”, в – Si_3N_4 .

в ПЦМ достаточно спекания в течение 120 минут. Это связано с тем, что при данных типах смешивания достигается высокая равномерность распределения наноразмерных частиц и благодаря их большой поверхности процесс спекания активизируется, вследствие чего и достигается высокий уровень

значения прочности данных материалов. Время спекания менее 120 мин недостаточно для получения равномерной и мелкозернистой структуры и для полного протекания всех диффузионных процессов в объеме заготовки порошковой стали. А время спекания более 120 мин не дает значительного повышения свойств. При этом для составов смешанных в ДКС увеличение времени спекания с 120 до 180 минут дает ощутимый прирост предела прочности. Это объясняется тем, что при данном типе смешивания не достигается требуемая равномерность распределения нанодисперсных частиц в объеме материала, вследствие чего они активизируют процесс спекания в меньшей степени.

На рис. 9 представлены зависимости предела прочности спеченных образцов от типа смешивания шихты и температуры спекания. Концентрация нанодисперсных добавок составляла: оксид алюминия — 0,2 %, УНМ “Таунит” — 0,2 %, нитрид кремния — 0,1 %. Продолжительность процесса спекания — 120 минут.

Из полученных зависимостей видно, что для составов смешанных по двухступенчатой схеме УЗ + Т и в ПЦМ достаточно температуры спекания 1273 К. Это объясняется тем, что при данных типах смешивания достигается высокая равномерность распределения наноразмерных частиц и благодаря их большой поверхности процесс спекания активизируется, вследствие чего и достигается высокий уровень прочности данных материалов. Температуры меньше 1273 К недостаточно для получения равномерной и мелкозернистой структуры и для полного протекания всех диффузионных процессов в объеме заготовки.

Температура свыше 1273 К не дает значительного повышения свойств. При этом для составов смешанных в ДКС увеличение температуры спекания выше 1273 К дает ощутимый прирост предела прочности. Это объясняется тем, что при данном типе смешивания не достигается требуемая равномерность распределения нанодисперсных частиц в объеме материала, вследствие чего они активизируют процесс спекания в меньшей степени.

Наличие в материале наноразмерных частиц, равномерно распределенных в объеме, может существенно улучшить его твердость и предел прочности. Наноразмерные частицы будут способствовать затруднению движения дислокаций за счет следующих механизмов:

- дисперсного упрочнения;
- получения мелкозернистой структуры за счет того, что наноразмерные частицы будут препятствовать росту зерен;

— измельчения структуры перлита при попадании наноразмерных частиц в зерно.

В случае неравномерного размешивания наноразмерные частицы будут образовывать крупные конгломераты в порах материала, не давая положительного эффекта.

Сравнение прочностных свойств образцов сталей с наноразмерными добавками с образцами стали ПК70-6,8

Для сравнения были изготовлены образцы из стали ПК70-6,8 ГОСТ 28378-89. Эти образцы изготавливали по стандартной для данных материалов технологии: холодное прессование при давлении 700 МПа, температура спекания — 1573 К, продолжительность спекания — 180 минут.

Образцы для сравнения сделаны на основе составов имеющих лучшие показатели в предыдущих экспериментах:

- 0,2 % Al_2O_3 , смешивание по двухступенчатой схеме УЗ + Т;
- 0,2 % УНМ “Таунит”, смешивание в ПЦМ;

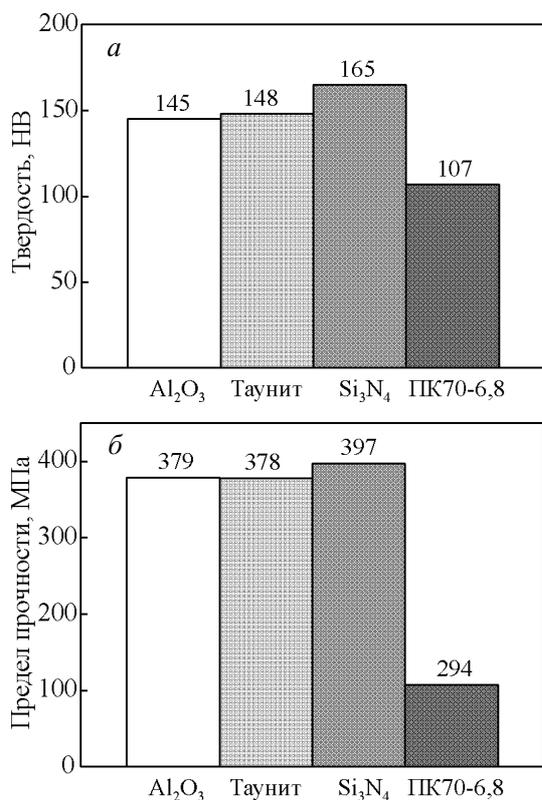


Рис. 10. а — твердость, б — предел прочности при поперечном изгибе, порошковых конструкционных сталей с добавками: 1 — Al_2O_3 , 2 — УНМ “Таунит”, 3 — Si_3N_4 , 4 — сталь ПК70-6,8.

— 0,1 % Si_3N_4 , смешивание по двухступенчатой схеме УЗ + Т.

Образцы с наноразмерными добавками были изготовлены по следующей технологии: холодное прессование при давлении 700 МПа, температура спекания — 1273 К, продолжительность спекания — 120 минут.

Результаты сравнения твердости порошковых конструкционных сталей представлены на рис. 10а.

Из полученных зависимостей видно, что при введении в шихту 0,1% нанодисперсного порошка нитрида кремния и смешивании порошковой шихты с нанодисперсной добавкой по двухступенчатой схеме УЗ + Т достигается прирост твердости по Бринеллю на 54 % при существенном уменьшении температуры и времени спекания.

Результаты сравнения предела прочности при поперечном изгибе порошковых конструкционных сталей представлены на рис. 10б.

Из полученных зависимостей видно, что при введении в шихту 0,1% нанодисперсного порошка нитрида кремния и смешивании по двухступенчатой схеме УЗ + Т достигается прирост предела прочности при поперечном изгибе на 35 % при существенном уменьшении температуры и времени спекания.

Выводы

1. Введение наноразмерных частиц оксида алюминия или УНТ “Таунит” 0,2 масс.% или наноразмерных частиц нитрида кремния в количестве 0,1 масс.%, при смешивании в планетарно-центробежной мельнице или по раздельной двухступенчатой технологии, повышает предел прочности и твердость порошковых сталей на 30 – 50 % по сравнению с порошковой конструкционной сталью общемашиностроительного назначения.

2. Максимальные значения твердости (165 НВ) и прочности (397 МПа) достигнуты при добавлении в шихту 0,1% нитрида кремния и смешивании по раздельной двухступенчатой технологии ультразвук + “Турбула”.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект номер 13-08-0257.

Литература

1. Роман О.В., Габриелов И.П. Справочник по порошковой металлургии : порошки, материалы, процессы. Минск: Беларусь, 1988, 174 с.
2. Анциферов В.Н. Порошковое материаловедение. Екатеринбург: УрО РАН, 2012, 476 с.

3. Панов В.С., Еремеева Ж.В., Скориков Р.А. Процессы спекания порошковых сталей, содержащих в шихте наноразмерные углеродные волокна. В Всероссийская конференция по наноматериалам “НАНО 2013”. Звенигород, 23 – 27 сентября 2013 г., Сборник материалов. М.: ИМЕТ РАН, 2013, с. 334 – 335.
4. Костиков В.И., Еремеева Ж.В., Агуреев Л. Композиты с металлической матрицей, упрочнённые наночастицами, для нужд космонавтики. Сборник материалов 4-ая Международная конференция HighMatTech, Киев, 2013, с. 186 – 187.
5. Костиков В.И., Дорофеев Ю.Г., Еремеева Ж.В., Жердицкая Н.Н., Ульяновский А.П., Шарипзянова Г.Х. Особенности применения нетрадиционных углеродсодержащих компонентов в технологии порошковых сталей. Влияние нетрадиционных углеродсодержащих компонентов на процессы спекания в технологии порошковой стали. Изв. Вуз. Порошковая металлургия и функциональные покрытия 2008, № 4, с. 5 – 9.
6. Сидоренко Д.А., Зайцев А.А., Курбаткина В.В., Левашов Е.А., Андреев В.А., Рупасов С.И., Севастьянов П.И. Влияние добавок углеродных нанотрубок на структуру и свойства металлических связей для алмазного инструмента. Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия, 2012, № 1, с. 38 – 43.
3. Panov V.S., Eremeeva J.V., Scoricov R.A. *Protsessy spevaniya poroshkovykh staley, soderzhashchikh v shikhte nanorazmernye uglerodnye volokna* [Processes of sintering of powder steels, containing in mixture nanoscale carbon fibers]. Proc. of 4'th Russian conference on nanomaterials “NANO-2013”. Zvenigorod, Russia, 23 – 27 Sept. 2013, Moscow, IMET RAS, pp. 334 – 335.
4. Kostikov V.I., Eremeeva J.V., Agureev L. *Kompozity s metallicheskoj matritsey, uprochnnyye nanochastitsami, dlya nuzhd kosmonavtiki* [Composites with metal matrix, strengthened by nanoparticles, for needs of space industry]. Proc. of 4'th International conference HighMatTech, Kiev, 2013, pp. 186 – 187.
5. Kostikov V.I., Dorofeev Iu.G., Eremeeva J.V., Jerditskaya N.N., Ulianovskii A.P., Sharipzyanova G.H. *Osobennosti primeneniya netraditsionnykh uglerodsoderzhashchikh komponentov v tekhnologii poroshkovykh staley. Vliyaniye netraditsionnykh uglerodsoderzhashchy komponentov na protsessy spevaniya v tekhnologii poroshkovoy stali* [Features of application of non-traditional carbon-containing composites in powder steel technology. Report 2. Influence of non-traditional carbon-containing components on processes of sintering in technology of powder steel]. *Izv. Vuzov. Powder metallurgy and functional coatings — Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2008, no. 4, pp. 5 – 9.
6. Sidorenko D.A., Zaycev A.A., Kurbatkina V.V., Levashov E.A., Andreev V.A., Rupasov S.I., Sevastianov P.I. *Vliyaniye dobavok uglerodnykh nanotrubok na strukturu i svoystva metallicheskich svyazok dlya almaznogo instrumenta* [Influence of addition of carbon nanotubes on structure and properties of metal matrix for diamond instruments]. *Izv. Vuzov. Powder metallurgy and functional coatings — Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2012, no. 1, pp. 38 – 43.

References

Статья поступила в редакцию 10.02.2015 г.

Панов Владимир Сергеевич — НИТУ “МИСиС” (119049 г. Москва, Ленинский проспект д. 4), доктор технических наук, профессор, специалист в области порошковой металлургии, твердых сплавов и керамики. E-mail: jei@rambler.ru

Еремеева Жанна Владимировна — НИТУ “МИСиС” (119049 г. Москва, Ленинский проспект д. 4), доктор технических наук, доцент, специалист в области порошковой металлургии, порошковых сталей, горячей штамповки, твердых сплавов и керамики. E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru.

Скориков Роман Александрович — НИТУ “МИСиС” (119049 г. Москва, Ленинский проспект д. 4), аспирант, специализируется в области порошковой металлургии, порошковых сталей. E-mail: skor.roman87@gmail.com.

Михеев Георгий Вадимович — НИТУ “МИСиС” (119049 г. Москва, Ленинский проспект д. 4), магистрант, специализируется в области порошковой металлургии, порошковых сталей, керамики. E-mail: gera_j-rich@mail.ru.

Шарипзянова Гюзель Харрясовна — Московский государственный университет машиностроения МАМИ (107023 г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38), кандидат технических наук, доцент, специалист в области порошковой металлургии, порошковых сталей, многокомпонентного диффузионного насыщения и покрытий. E-mail: guzel@mtw.ru.

Тер-Ваганянц Юлия Суреновна — Московский государственный университет машиностроения МАМИ (107023 г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38), аспирант, специализируются в области порошковой металлургии, порошковых сталей. E-mail: juliatv1990@mail.ru.

Influence of nanosize particles and methods of mixing on mechanical abilities of SP-70 powder steel

**V. S. Panov, J. V. Ereemeeva, R. A. Scoricaov, G. V. Miheev,
G. H. Sharipzyanova, U. S. Ter-Vaganyants**

Influence of mixing method and administered nanoparticles nature on the mechanical properties of powder steels are considered. Dependences of hardness, tensile strength under three-point bending on the concentration of nanosized additives and conditions of mixing and sintering were determined. The obtained experimental dependence showed that the maximum values of hardness and strength are achieved under silicon nitride concentration 0.1 wt.% and two-stage mixing technology: mixing in an ultrasonic bath and subsequent mixing in the "Turbula" mixer within 30 minutes. It is shown also that after mixing on a two-stage scheme and mixing in a planetary centrifugal mill, mechanical properties almost reached their maximum values already during sintering under temperature 1273 K and 120 minutes duration, and further increase of time and temperature exposure do not have significant effect on their value.

Key words: powder steel, iron powder, graphite, alumina nanopowder, silicon nitride nanopowder, carbon nanofibers, "Taunit", the "Turbula" mixer.

Panov Vladimir — National University of Science and Technology "MISIS" (119049, Moscow, Leninskiy pr., 4), PhD, professor of Powder metallurgy and functional coatings dep., specialist in powder metallurgy, hard alloys and ceramics. E-mail: jei@rambler.ru

Ereemeeva Janna — National University of Science and Technology "MISIS" (119049, Moscow, Leninskiy pr., 4), PhD., assistant professor of Powder metallurgy and functional coatings dep., specialist in powder metallurgy, powder steels, hot stamping, hard alloys and ceramics. E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru

Scorico Roman — Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI, 107023 Moscow, Bolshaya Semenovskaya str., 38), post graduate student of Material science Dep., specialist in powder metallurgy, powder steels. E-mail: skor.roman87@gmail.com.

Miheev Georgii — National University of Science and Technology "MISIS" (119049, Moscow, Leninskiy pr., 4), master course student of Powder metallurgy and functional coatings dep., field of interests powder metallurgy, powder steels, hot stamping and ceramics. E-mail: gera_j-rich@mail.ru.

Sharipzyanova Gyuzel — Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI, 107023 Moscow, Bolshaya Semenovskaya str., 38), PhD, assistant professor, specialist in powder metallurgy, powder steels, multi-component diffusion saturation, and coatings. E-mail: guzel@mtw.ru.

Ter-Vaganyants Uliya — Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI, 107023 Moscow, Bolshaya Semenovskaya str., 38), post graduate student of Material science Dep., specialist in powder metallurgy, powder steels. E-mail: juliatv1990@mail.ru.