

## ПОВЕРХНОСТНАЯ ОБРАБОТКА

УДК 629.693

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2018.82.0.5

## МОДИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ НАСЫЩЕНИИ НАНОЧАСТИЦАМИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Большаков В.И., Калинин А.В., Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, Глушкова Д.Б., ХНАДУ

**Аннотация.** *Определен химический состав нанодисперсных композиций: SiC, TiC, TiN, Ti(CN), AlN, Mg<sub>2</sub>Si, Mg<sub>3</sub>N<sub>2</sub>. Химический состав синтезированных соединений отвечает стехиометрическому составу. Проведен анализ микродифракционных картин частиц, показана принадлежность нанопорошков твердым кристаллическим телам с металлической связью. Установлено, что частицы карбонитрида титана Ti(CN) имеют гранецентрированную, а частицы карбида кремния (SiC) - гексагональную кристаллическую решетку. Были проведены эксперименты по поверхностному модифицированию сталей нанопорошковыми композициями на основе Ti(CN) и SiC. Установлена эффективность применения нанодисперсных композиций при выплавке конструкционных сталей. В результате модифицирования стали 09Г2С нанопорошком Ti(CN) повышены характеристики прочности, пластические свойства и ударная вязкость. Обоснован выбор нанодисперсных порошков карбонитрида титана Ti(CN) фракции менее 100 нм в качестве модификаторов низколегированных сталей. Получены необходимые критерии выбора нанопорошковых модификаторов: нерастворимость в расплаве, соответствие кристаллических решеток матрице стали, соразмерность с критическим радиусом зародыша аустенита при кристаллизации. Установлен механизм взаимодействия расплава стали со слоем нанодисперсной композиции.*

**Ключевые слова:** *нанодисперсная композиция, модифицирование, плазмохимический синтез, конструкционная сталь, механические свойства, кристаллографические параметры.*

### Введение

Анализ работ последнего десятилетия в области материаловедения показывает, что внимание исследователей сосредоточено на изучении материалов, содержащих структурные элементы нанометровых размеров.

Наноструктурированные материалы представляют собой особое состояние конденсированных фаз веществ – макроскопические ансамбли частиц с размерами в несколько нанометров. Необычные свойства этих материалов обусловлены уникальностью свойств отдельных частиц и характером взаимодействия между ними.

Эффективным способом получения высококачественной продукции является модифицирование сталей нанодисперсными материалами при низком их расходе. Поэтому инженерные решения при выборе нанодисперсных композиций базируются на определении оптимального комплекса их параметров, состава, физико-механических свойств и технологии получения.

Учитывая уникальность свойств нанокристаллических материалов объединяющих

высокие характеристики прочности и пластичности, следует считать актуальными исследования, направленные на развитие технологии модифицирующей обработки высококачественных конструкционных сталей, нанодисперсными композициями заданного состава, кристаллической структуры и размерно-топологических параметров.

### Анализ публикаций

Разработку новых материалов и технологий их получения общепризнанно относят к основам экономического развития. Одним из приоритетных направлений развития современного материаловедения являются наноматериалы и нанотехнологии. Конструкционные наноструктурные материалы занимают особое место в кругу материалов с особенностями структуры и свойств [3,4,6-8]. Использование крупных частиц модификаторов размером более 10 мкм в металлургии производства сталей достаточно изучено [1]. Использованию нанодисперсных частиц для управления структурой сталей посвящено мало работ. Так, в работе [9] при модифици-

ровании низколегированной стали тугоплавкими композициями, установлено образование дисперсных структур: с однородным распределением упрочняющих фаз. Однако следует отметить, что в данной работе не проведен термодинамический анализ условий протекания модифицирующих процессов при кристаллизации расплавов. Это означает, что возникают трудности с практической точки зрения при выборе оптимального компонентного состава и размерного диапазона применяемых наноконпозиций. Это обстоятельство связано с тем, что введение наночастиц, в расплав существенно изменяет поверхностные явления на границе «модификатор-расплав» и термодинамические параметры процесса.

Для решения этой проблемы в работе [5] проведена оценка эффективности действия наночастиц при обработке расплавов. Установлена зависимость степени растворимости модификатора в расплаве от термодинамической устойчивости процесса и разницы температур плавления наночастиц и расплава. Несмотря на практическую ценность приведенных данных, не рассмотрены в достаточной степени особенности кристаллографического строения наноконпозиций.

Поэтому есть основания считать, что недостаточная изученность влияния термодинамических условий и кристаллографического строения наноконпозиций обуславливает необходимость проведения исследований в данном направлении.

#### **Цель и постановка задачи**

Целью проведенных исследований является повышение механических и эксплуатационных свойств конструкционных сталей путем модифицирования расплавов нанодисперсными композициями с заданными кристаллографическими параметрами.

Для достижения поставленной цели поставлены следующие задачи: на промышленной установке плазмохимического синтеза получить нанодисперсные композиции карбидного, нитридного и карбонитридного класса с размером частиц до 100 нм; определить химический состав, физические свойства и кристаллографические параметры наночастиц; провести опытно-промышленные плавки низколегированных сталей классов прочности С345, С355, С375 с применением наномодификаторов; установить влияние заданных кристаллографических параметров наночастиц на морфологию структуры, ком-

плекс механических свойств и износостойкость конструкционных сталей.

#### **Исследование нанопорошков и их влияния на свойства деталей**

Исследования модифицирования проводили на конструкционных низколегированных сталях с применением нанодисперсных модификаторов: TiC, TiN, Ti(CN), SiC, AlN, Mg<sub>2</sub>Si с размером частиц 30...100 нм. Модификаторы получены в АО «Neomat» (Латвия) на высокочастотной промышленной установке плазмохимического синтеза AEROXIDE P-25.

Для генерации плазмы использовали вихревые индукционные плазмотроны с газовой стабилизацией разряда. Исходные материалы дозированно вводили в зону потока азотной плазмы с температурой 5500-7500 °С. Производился нагрев, плавление, испарение введенных материалов и их химическое взаимодействие [2].

Исследование размеров и кристаллографической структуры наноконпозиций проводили с использованием электронного просвечивающего микроскопа ЭМ-125 при увеличении в 100.000 раз и дифрактометра ДРОН 2,0 в Си-излучении.

Выплавку и модифицирование сталей проводили в промышленной индукционной печи САТ емкостью 100 кг при температуре до 1600 °С. Отливки деформировали на тонколистовом прокатном стане со степенью деформации 40 %. Механические испытания на растяжения проводили на стандартных образцах по ГОСТ 1497-84 на разрывной машине ЦД-4. Ударную вязкость определяли на маятниковом копре по ГОСТ 9454-80.

Оценку влияния модификаторов на эксплуатационные свойства исследуемых сталей проводили методом износостойкости на машине истирания СМЦ-2 по потере массы исходного образца немодифицированной стали 09Г2С.

Основными показателями свойств сталей, определяемых в эксперименте, выбраны: температура, время, глубина пропитки модификатором, состав модификатора, %.

Как основные показатели механических свойств приняты: предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость. Основными показателями кристаллографических параметров являлись периоды кристаллической решетки (а, с в Å).

Химический состав нанодисперсных композиций, полученных на установке плазмохимического синтеза, приведен в табл. 1.

Необходимо отметить, что основу всех исследованных композиций составляют элементы (Al, Ti, Mg), образующие химические соединения. Содержание элементов в свободном состоянии не значительно (до 20 %).

Характер размерного распределения наночастиц соединений, плазмохимического синтеза приведен на рис. 1.

Следует обратить внимание на то, что самый малый диапазон разброса размеров у частиц Ti(CN) (10...70 нм), а самый большой разброс размеров – у частиц TiC (10...250 нм). В результате полученных данных можно сделать вывод, что характер распределения размеров частиц асимметричен.

Частицы Ti(CN) с наибольшей плотностью (табл. 2) имеют средний размер менее 100 нм, а более легкие (AlN и SiC) частицы имеют больший размер – 150...200 нм.

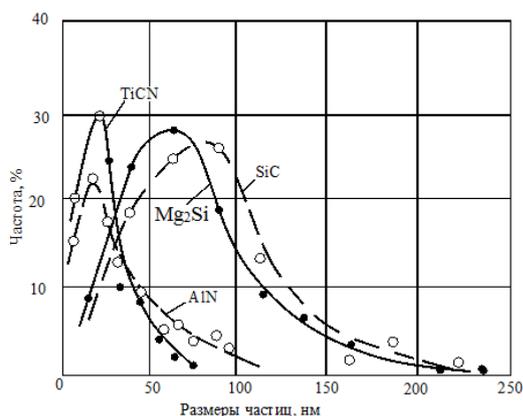


Рис. 1. Гистограмма распределения наночастиц Ti(CN), AlN, SiC, Mg<sub>2</sub>Si

Обобщенные результаты исследований кристаллографических и физических свойств нанодисперсных материалов приведены в табл. 2.

Анализ кристаллографических параметров порошков, электронно-микроскопических изображений частиц и их микродифракционных картин показывает, что искусственно созданные плазмохимическим синтезом тонкодисперсные композиции принадлежат к твердым кристаллическим веществам (рис. 2, 3). SiC и Ti(CN) сохранили способность к самоогранке и представляют собой дискретную трехмерную систему. Способность синтезированных частиц самоограняться следствие их внутреннего кристаллографического строения, благодаря ко-

торому атомы частиц-кристалликов располагаются на определенных прямых и плоскостях кристаллитов. Этому способствовала объемная конденсация плазменного газа в процессе плазмохимического синтеза, позволяющая частицам иметь свободную кристаллизующуюся поверхность, что подтверждается в работах [10–12].

Анализ микродифракционных картин кристаллов карбида кремния позволил установить, что они по своей кристаллической структуре относятся к гексагональной сингонии с параметрами  $a=3,08\text{Å}$ ,  $c=10,04\text{Å}$ . С теоретической точки зрения можно полагать, что огранка частиц стремится обеспечить максимальную поверхностную энергию при минимальных их размерах.

Электронно-микроскопический анализ частиц Ti(CN) показал, что частицы имеют гранецентрированную кубическую решетку с параметром  $a=4,25\text{Å}$ . Это согласуется с данными для TiC ( $a=4,319\text{Å}$ ) и TiN ( $a=4,243\text{Å}$ ) [13].

Сопоставление измеренного и расчетного межплоскостного расстояния Ti(CN) на дифракционных картинах показало, что решетка Ti(CN) построена на основе карбида титана TiC, атомы азота находятся в позициях атомов углерода, образуя твердый раствор замещения азота в кристаллической решетке карбида титана.

В соответствии с этим частицы Ti(CN) формируются в виде кубов или тетрагонов. На это указывают конфигурации проекций кристаллов при их ориентации [001], [111], [110]. Четкая линейность сторон проекций кубов указывает на высокое совершенство граней и ребер Ti(CN). Полученные данные согласуются с данными работ [13, 14]. В работах [9–13, 16] отмечается, что получение плазмохимических нанодисперсных порошков обусловлено высокими скоростями объемной конденсации газопламенного потока, что приводит к нестабильному состоянию нанодисперсных частиц. Ранее проведенные теоретические и экспериментальные исследования [5] показали, что для достижения тонкодисперсной структуры низколегированных сталей необходимое количество центров кристаллизации аустенита размером 30...50 нм в расплаве должно составлять  $10^5...10^8$  шт/см<sup>3</sup>. Это соответствует расходу 0,08...0,15 % мас. наномодификатора от массы расплава.

Эффективным способом создания тонкодисперсной структуры и высокого комплекса

механических свойств конструкционных сталей для строительных сооружений атомной техники является модифицирование расплавов тугоплавкими нанодисперсными композициями на основе титана [2, 5, 11]. Наиболее эффективным модификатором является карбонитрид титана  $Ti(CN)$  с размером частиц 30...50 нм. Эта тугоплавкая композиция имеет г.ц.к.- решетку подобно г.ц.к. решетке аустенита и способствует образованию дисперсной структуры низколегированных сталей. Механические свойства образцов, вырезанных из деформированных прутков, после термоупрочняющей обработки опытно-промышленных партий сталей 09Г2 и 09Г2С до и после модифицирования приведены в табл. 3. (приведены средние значения свойств по 7 образцам).

При рассмотрении массива данных механических испытаний установлено, что в результате модифицирования нанодисперсным  $Ti(CN)$  повышаются прочностные и пластические свойства сталей:  $\sigma_b$  повышается в среднем на 23%;  $\sigma_{0,2}$  - на 19%;  $\delta$  - на 23%;  $\psi$  - на 6%. При этом наиболее значительно повышение ударной вязкости в среднем - на 39 % по сравнению с немодифицированным состоянием. Это доказывает эффективность модифицирования.

Для оценки влияния нанопорошков на эксплуатационные свойства деталей проведены исследования влияния глубины пропитки стальным расплавом нанопорошков  $Ti(CN)$  и  $TiC$  в виде обмазки на внутренней поверхности литейной формы, формирующей в процессе заливки рабочую поверхность литой детали. Существенное влияние на процесс пропитки имеет однородность порошковой смеси. Поэтому смеси нанопорошков  $Ti(CN)$  и  $TiC$  готовили путем длительного перемешивания компонентов в атриторе для достижения равномерного распределения [13]. Склонность стального расплава и нанопорошков к взаимному проникновению оценивали по глубине пропитанного слоя на рабочей поверхности деталей. Результаты замеров приведены в табл. 4.

Анализ данных таблицы показывает, что пропитка слоя стали нанопорошком  $Ti(CN)$  в смеси с  $Ti(CN)$  способствует увеличению глубины композиционного слоя по сравнению с чистым карбидом титана. Наибольшую (20...22 мм) пропитку имеет нанопорошок  $Ti(CN)$

Результаты исследования влияния температуры заливаемого металла и времени вы-

держки расплава на глубину пропитки приведены на рис. 2.

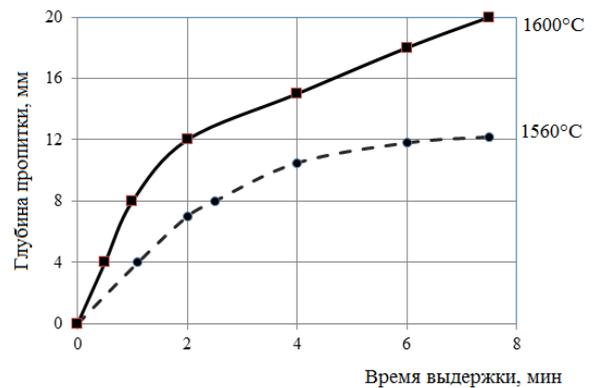


Рис. 2/ Влияние температуры заливаемого металла и времени выдержки расплава на глубину пропитки

Экспериментально установлено, что повышение температуры заливаемой стали до 1600 °С и времени выдержки расплава до 8 мин. значительно увеличивают глубину пропитки: образцы стали 09Г2С в исходном состоянии и после пропитки испытывали на износостойкость, которую оценивали по потере массы образца с 12 до 20 мм. Результаты испытания показали, что наиболее высокую износостойкость имела сталь, модифицированная  $Ti(CN)$ . Износостойкость модифицированной стали 09Г2С в 2,5 раза выше износостойкости исходной стали.

Полученные результаты испытаний эксплуатационных свойств модифицированной стали 09Г2С могут иметь важное практическое значение, поскольку позволяют обосновано подходить к выбору состава и размернокристаллографических параметров наномодификатора.

С теоретической точки зрения полученные экспериментальные данные представляют научную новизну, а именно: разработан механизм взаимодействия стального расплава со слоем нанодисперсной композиции, который включает следующие процессы: нагрев слоя нанопорошка за счет физического тепла расплава, фильтрацию расплава в поры порошка, распределение частиц нанопорошка в жидком расплаве, диффузионные процессы при охлаждении металла. Эти результаты являются преимуществом данного исследования. Однако нельзя не отметить, что при обосновании выбора параметров модификатора и трактовке механических свойств сталей (табл. 3) не учитывается изменение структуры модифицированной ста-

ли. Такая неопределенность накладывает определенные ограничения на использование полученных результатов, что можно трактовать как недостаток данного исследования. Невозможность устранить эти ограничения в рамках данного исследования обосновывает

потенциально интересное научное направление дальнейших исследований. Они могут быть ориентированы также на изучение связи структуры пропитанных слоев стали с температурно-временными параметрами процесса.

Таблица 1 – Химический состав синтезированных нанодисперсных соединений

Наименование материала	Содержание элементов, % мас.									
	Si	Si <sub>своб</sub>	C	C <sub>своб</sub>	N	Al	Al <sub>своб</sub>	Ti	Ti <sub>своб</sub>	Mg
SiC	60... 65	1,0... 2,0	30... 32	2,0... 2,2	0,5... 1,0	-	-	-	-	-
AlN	-	-	-	0,1... 0,5	30... 33	60... 65	0,5... 2,0	-	-	-
TiC	-	-	18...21	1,0... 1,5	-	-	-	76... 80	1,0... 1,5	-
TiN	-	-	-	1,0... 2,0	20... 23	-	-	75... 78	1,0... 1,5	-
Ti(CN)	-	-	15... 17	0,5... 1,0	19... 22	-	-	60... 65	0,5... 1,0	-
Mg <sub>2</sub> Si	33... 36	1,0... 2,0	-	-	1,0... 2,0	-	-	-	-	63... 65

Таблица 2 – Кристаллографические и физические свойства наноконпозиций

Материал	Пространственно-геометрическая форма частиц	Тип фазы	Период решетки, Å		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Температура плавления (разложения), °C	Расчётная удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г
			a	c			
SiC	Гексагональная, тригональная	Внедрения	3,080	10,04	3220	2830 Разложения	54,8
AlN	Гексагональная	Внедрения	-	-	2350	2200 Плавления	64,6
TiC	Кубическая	Внедрения	4,319	-	4920	3140 Плавления	24,7
TiN	Кубическая	Внедрения	4,243	-	5430	2950 Плавления	21,6
Ti(CN)	Кубическая	Внедрения	4,256	-	4950	3120 Плавления	24,0
Mg <sub>2</sub> Si	Кубическая, сферическая	Замещение	6,338	-	2920	1170 Разложения	42,8

Таблица 3 – Влияние модифицирования на механические свойства сталей

Марка стали	Состояние стали	Механические свойства				
		σ <sub>в</sub> , МПа	σ <sub>0,2</sub> , МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
C345	Немодифицированная	574	512	19,0	40,6	0,58
C345	Модифицированная	762	641	21,5	45,2	0,76
C355	Немодифицированная	7657	568	18,2	43,0	0,58
C355	Модифицированная	8811	675	22,4	45,7	0,81

Таблица 4 – Глубина пропитки сталей C345 и C355 различными композициями

Номер опыта	Глубина пропитки, мм		
	Ti(CN), 100%	TiC, 100%	50% Ti(CN) +50% TiC
1	18...20	15...17	17...19
2	17...19	13...15	15...17
3	16...18	13...15	15...17
4	20...22	15...17	17...19

### Выводы

Проведенными исследованиями установлены особенности кристаллографического строения физических свойств нанодисперсных соединений карбидного, карбонитридного и силицидного класса, которые заключаются в соответствии параметров кристаллической решетки наночастиц с кристаллической решеткой стали. Благодаря этому факту, можно утверждать, что именно нанодисперсный карбонитрид титана Ti(CN) наиболее эффективно влияет на процесс модифицирования. Это проявляется в том, что частицы Ti(CN) служат центрами кристаллизации, позволяющими получить дисперсное строение стали, а следовательно, и высокий уровень механических свойств.

Анализом массива данных механических свойств деформированных заготовок установлено, что модифицирование карбонитридом титана повышает  $\sigma_B$  в среднем на 23 %;  $\sigma_{0,2}$  - на 19 %;  $\delta$  - на 23 %;  $\psi$  - на 6 %. 09Г2 и 09Г2С; наиболее значительно (на 39%) повышается ударная вязкость.

В результате проведенных экспериментов установлен механизм взаимодействия стального расплава с слоем нанодисперсной композиции. Установлены температурно-временные параметры пропитки, позволяющие получить максимальную глубину слоя при модифицировании Ti(CN).

Установлена эффективность применения нанодисперсных композиций в промышленных условиях производства конструкционных сталей с повышенным комплексом механических и эксплуатационных свойств.

### Література

1. Bolshakov V.I. Structure and Properties of Building Materials / V.I. Bolshakov, L.L. Dvorkin.- Switzerland: TTP, 2016.-220 p.
2. Стафеецкий Л.П. Плазменный синтез нанопорошков в АО «НЕОМАТ» / Сб. докладов «плазменные процессы в металлургии и обработке металлов». – М.: ИМет им. А.А. Байкова.- 2016. – С. 25-29.
3. Nikiforchyn H. Chapter 2: Physical and mechanical properties of surface nanocrystalline structures// Nanocomposites, Nanophotonics, Nanobiotechnology and Applications / V. Kyryliv, O. Maksymov, O. Fesenko, L. Yatsenko. – Inbunden: Springer, 2014. – pp. 31-41.
4. Barsoum W. Max-Phases: Properties of Machinable ternary Carbides and Nitrides. John Willey and sons. - Weinheim, Germany, 2013 - 126 p.

5. Калинина Н.Е. Получение нанодисперсных модификаторов для обработки жаропрочных сплавов / Н.Е. Калинина, О.А. Кавац, В.Т. Калинин// Авиационно-космическая техника и технология.- 2007.-№8(44)- С. 41-44.
6. Naguib V.N. MXenes: A new family of 2-Dimensional Materials / Advanced Functional Materials / V.N. Naguib, M.W. Barsoum, Y. Gogotsy. - 2014, 26.-pp. 992-1005.
7. Carbon Nanotube Electronics / Ed. A. Javey, J. Kong. Springer Science + Business Media, LLC, 2009.-265 p.
8. Tagmatarchis N. Advances in Carbon Nanomaterials - Science and Applications. Pan Stanford Publishing, 2011.- 400 p.
9. Fu C., Thermal radiative properties of metamaterials and other nanostructured materials: A review / N. Tagmatarchis, Z. Zhang // Frontiers of Energy and Power Engineering China. 3 (1), pp. 11–26.
10. Rodríguez J. Synthesis, properties, and applications of oxide nanomaterials / J. Rodríguez, M. García. - Wiley-Interscience, 2007. - 717 p.
11. Vollath D. Nanomaterials: an introduction to synthesis, properties and application. Wiley-VCH, 2008.-352 p.
12. Nanoparticle Technology Handbook / Ed. M. Hosokawa, K. Nogi, M. Naito, T. Yokoyama. Elsevier. 2007.-644 p.
13. Kumar C. Nanocomposites. Wiley-VCH, 2010. - 466 p.
14. Thermal Nanosystems and Nanomaterials / S. Volz (Ed.) // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009.-573 p.
15. King W. Thermomechanical Formation and Thermal Imaging of Polymer Nanostructures: Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale and Nanoscale Devices // M. Faghri and B. Sundén. Eds. Southampton: WIT Press, 2002.- pp. 131–171.

### References

1. Bolshakov, V.I., Dvorkin L.L. (2016). Structure and Properties of Building Materials. Switzerland: TTP, 220.
2. Stafetskiy, L.P. (2016). Plazmennyy sintez nanoporoshkov v AO «NEOMAT». Sb. dokladov «plazmennye protsessy v metallurgii i obrabotke metallov». Moscow: IMet im. A.A. Baykova. 25-29.
3. Nikiforchyn, H., Kyryliv, V., Maksymov, O., Fesenko, O., Yatsenko, L. (2014). Chapter 2: Physical and mechanical properties of surface nanocrystalline structures. Nanocomposites, Nanophotonics, Nanobiotechnology and Applications. Inbunden: Springer, 31-41.
4. Barsoum, W. (2013). Max-Phases: Properties of Machinable ternary Carbides and Nitrides. John Willey and sons. Weinheim, Germany, 126.

5. Kalinina, N.Ye., Kavats, O.A., Kalinin, V.T. (2007). Poluchenie nanodispersnykh modifikatorov dlya obrabotki zharoprochnykh splavov. Aviatcionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. №8(44). 41-44.
6. Naguib, V.N., Barsoum, M.W., Gogotsy Y. (2014). MXenes: A new family of 2-Dimensional Materials. Advanced Functional Materials. 26. 992-1005.
7. Carbon Nanotube Electronics (2009). Ed. A. Javey, J. Kong. Springer Science + Business Media, LLC, 265.
8. Tagmatarchis, N. (2011). Advances in Carbon Nanomaterials - Science and Applications. Pan Stanford Publishing, .400.
9. Fu, C., Tagmatarchis, N., Zhang, Z. Thermal radiative properties of metamaterials and other nanostructured materials: A review, Frontiers of Energy and Power Engineering China. 3 (1). 11-26.
10. Rodríguez, J., García, M. (2007). Synthesis, properties, and applications of oxide nanomaterials. Wiley-Interscience, 717.
11. Vollath, D. (2008). Nanomaterials: an introduction to synthesis, properties and application. Wiley-VCH, 352.
12. Hosokawa, Ed. M., Nogi, K., Naito, M., Yokoyama, T. (2007). Nanoparticle Technology Handbook. Elsevier. 644.
13. Kumar, C. (2010). Nanocomposites. Wiley-VCH, 466.
14. Thermal Nanosystems and Nanomaterials (2009). S. Volz (Ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 573 p.
15. King W., Goodson K. (2002). Thermomechanical Formation and Thermal Imaging of Polymer Nanostructures: Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale and Nanoscale Devices. M. Faghri and B. Sundén. Eds. Southampton: WIT Press, 131-171.

**Большаков Владимир Иванович, д.т.н., профессор, кафедра технології металів та матеріалознавства, , kalininadnu@gmail.com,**  
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,

**Калінін Олександр Васильович, докторант, kalininadnu@gmail.com,**  
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,

**Глушкова Діана Борисівна, д.т.н., проф., зав. кафедри технології металів та матеріалознавства, 057-707 37-29, diana@gmail.com,**  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна,  
м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

## MODIFICATION OF STRUCTURAL MATERIALS UNDER SATURATION BY PLASMECHEMICAL SYNTHESIS BY NANOPARTICLES

**Bolshakov V.I., Kalinin A.V.,  
Pridneprovskaya State Academy  
of construction and architecture,  
Glushkova D.B.,  
KhNAHU**

*The chemical composition of nanodispersed compositions was determined: SiC, TiC, TiN, Ti(CN), AlN, Mg<sub>2</sub>Si, Mg<sub>3</sub>N<sub>2</sub>. The chemical composition of the synthesized compounds corresponded to the stoichiometric composition. An analysis of particles microdiffraction patterns was carried out, it was shown that nanopowders belongs to solid crystalline bodies with a metallic bond. It has been established that Ti (CN) titanium carbonitride particles are face-centered, and silicon carbide (SiC) have a hexagonal crystal lattice. Experiments on the surface modification of 09G2, 09G2S steels with nanopowder compositions based on Ti (CN) and SiC have been carried out. The effectiveness of using nanodispersed compositions in the smelting of structural steels has been established. As a result of the 09G2S steel modification with Ti (CN) nanopowder, the strength, plastic properties and toughness were increased. The choosing of nanodispersed Ti (CN) carbonitride powders with a fraction less than 100 nm as modifiers of low-alloy steels was substantiated. The necessary criteria for the selection of nanopowder modifiers was obtained: insolubility in melt, conformity of the crystal lattices with the matrix of steel, proportionality with the critical radius of the austenite nucleus during crystallization. The mechanism of a steel melt interaction with a layer of a nanodisperse composition was established.*

**Key words:** nanodispersed composition, modification, plasmochemical synthesis, structural steel, mechanical properties, crystallographic parameters.

## МОДИФІКАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ НАСИЧЕННІ НАНОЧАСТИНКАМИ, ЩО ОТРИМАНІ ПЛАЗМОХІМІЧНИМ СИНТЕЗОМ

**Большаков В.І., Калінін О.В.,  
Придніпровська державна академія  
будівництва і архітектури  
Глушкова Д.Б.,  
Харківський національний автомобільно-  
дорожній університет**

*Визначено хімічний склад нанодисперсних композицій: SiC, TiC, TiN, Ti(CN), AlN, Mg<sub>2</sub>Si, Mg<sub>3</sub>N<sub>2</sub>. Хімічний склад синтезованих сполук відповідає стехіометричному складу. Проведено аналіз мікродифракційних картин частинок,*

показана належність нанопорошків до твердих кристалічних тіл з металевим зв'язком. Встановлено, що частинки карбонітрида титану Ti (CN) мають гранецентровану, а карбїду кремнію (SiC) мають гексагональну кристалічну решітку. Були проведені експерименти з поверхневого модифікування сталей нанопорошковими композиціями на основі Ti (CN) і SiC. Встановлено ефективність застосування нанодисперсних композицій при виплавці конструкційних сталей. В результаті модифікування сталі 09Г2С нанопорошком Ti (CN) підвищені характеристики міцності, пластичні властивості і ударна в'язкість.

Обґрунтовано вибір нанодисперсних порошків карбонітрида титану Ti (CN) фракції менше 100 нм в якості модифікаторів низьколегованих сталей. Отримані необхідні критерії вибору нанопорошкових модифікаторів: нерозчинність в розплаві, відповідність кристалічних решіток з матрицею стали, співмірність з критичним радіусом зародка аустеніту при кристалізації. Встановлено механізм взаємодії сталевого розплаву з шаром нанодисперсної композиції.

**Ключові слова:** нанодисперсна композиція, модифікування, плазмохімічний синтез, конструкційна сталь, механічні властивості, кристалографічні параметри.

---