



Применение газотермических покрытий для защиты от абразивного износа

А.А. Вопнерук, Р.М. Валиев, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, **А.А. Базилевский**, ООО «МГМ - Инжиниринг» Екатеринбург, Россия

Абразивное изнашивание является главным фактором, ограничивающим сроки службы деталей и узлов машин и оборудования различного назначения. Изучение абразивного изнашивания и мер борьбы с ним является актуальной задачей.

Абразивным называется изнашивание поверхности детали в результате режущего или царапающего действия твердых тел или частиц. Механизм этого вида изнашивания заключается в удалении материала с изнашиваемой поверхности либо в виде очень мелкой стружки, либо фрагментов предразрушенного материала, выдавленного предварительно по сторонам пластически деформированной царапины, либо в виде более или менее дисперсных кусочков, хрупко отделяющихся при однократном или многократном воздействии [1].

Универсальное положение прикладного материаловедения о необходимости для любых изделий выбирать функциональные материалы, структура и комплекс свойств которых в максимальной степени соответствуют условиям эксплуатации, как нельзя более применим для достижения достаточной износостойкости узлов и деталей машин в связи с разнообразием факторов, обеспечивающих это качество [3].

Многообразие причин и видов изнашивания, одновременное действие многих факторов, определяющих механизм и скорость изнашивания, быстрая смена условий трения на шероховатых соприкасающихся поверхностях значительно осложняют выбор конструктивных материалов и вид их обработки для обеспечения надежной работы деталей машин.

Износостойкие материалы в общем случае должны обладать высокой прочностью, высоким сопротивлением усталостному разрушению, теплостойкостью, способностью к образованию при трении прочных пленок вторичных структур, способностью к хорошему удержанию смазки на поверхности, хорошей технологичностью [3].

Одним из важнейших факторов, определяющих сопротивление металлических сплавов изнашиванию, является их структурное состояние, а также свойства, взаимное расположение, количественное соотношение и характер связи отдельных составляющих структуры. Доказано, что структурно неоднородный материал изнашивается как одно целое, поэтому в процессе трения происходит перераспределение удельной нагрузки: она

увеличивается для более износостойких включений и уменьшается для менее износостойких [2].

Помимо характеристик, описанных выше, износостойкий материал должен обладать структурой, в максимальной степени отвечающей принципам синергетического подхода к неравновесным системам. В качестве эффективных рассматриваются материалы, соответствующие принципу метастабильного аустенита: стали, чугуны, наплавочные сплавы, напыленные покрытия, в которых сформирована структура метастабильного аустенита, или аустенит определенного химического состава присутствует наряду с мартенситом, карбидами и др. фазами и структурными составляющими. Рассеяние подводимой к рабочей поверхности энергии при внешнем воздействии наиболее эффективно производится микрогетерогенной структурой с метастабильным аустенитом, превращающимся в дисперсный мартенсит в процессе эксплуатации. Самоорганизация структуры, обусловленная релаксационными процессами при образовании мартенсита, и формирование сжимающих напряжений с высоким уровнем деформационного упрочнения поверхностного слоя обеспечивают высокую стойкость при контактном воздействии на поверхность [3,5].

Как правило, ресурс и эксплуатационные характеристики деталей машин, работающих в условиях абразивного износа, определяются состоянием их поверхностного слоя, поэтому изготавливать всю массу детали из износостойкого материала экономически нецелесообразно, а в ряде случаев может привести к ухудшению эксплуатационных характеристик детали.

Оптимальным решением этой задачи является упрочнение поверхности деталей износостойкими покрытиями. В результате обеспечивается повышение долговечности деталей, сочетающееся с экономией легирующих элементов, удешевлением изделий, возможность их многократного использования.

Одним из способов нанесения покрытий, получивших широкое применение, является газотермическое напыление. В настоящее время применение метода высокоскоростного газопламенного (HVOF) напыления позволяет получать на изделиях разнообразных форм и размеров сравнительно толстые покрытия с необходимыми эксплуатационными свойствами.

Кроме того, проведенные исследования [7] показали пределы возможности эксплуатации покрытий раз-

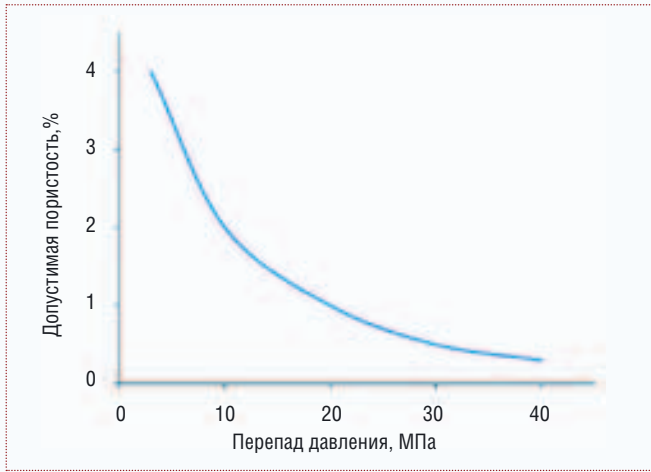


Рис. 1. Допустимые значения пористости, применяемые в запорной арматуре

личной пористости для защиты поверхностей контакта в запорной арматуре. Так, для газопламенных покрытий перепад давления составляет 1 МПа, для плазменных покрытий — до 5,0...7,0 МПа, для HVOF-покрытий — до 60,0 МПа и более (рис. 1). Это объясняется следующим. Несмотря на то, что пористость считается закрытой, возможно перетекание среды из области с высоким давлением в область с более низким давлением по границам зерен, а на границе раздела покрытие-основа — по микродефектам, которые входят в число допустимых. Для арматуры, работающей при перепадах давлений больших или равных 10 МПа, выбор однозначно будет в пользу высокоскоростного газопламенного напыления.

Малые объемы разогретых или даже расплавленных частиц ($d_{\text{ч}} = 30-150$ мкм); высокая степень деформации (растекания) при ударе; микронные значения толщины и исключительно высокий градиент температуры ($\sim 10^6$ К/с) при теплообмене определяют глубокое переохлаждение расплавленной частицы, что, как известно, приводит к появлению огромного количества центров кристаллизации в объеме расплава и одновременному затвердеванию всей массы. Все это приводит к искажению кристаллической решетки, появлению в ней огромного количества дефектов. Наличие большого числа дефектов кристаллической решетки затрудняет движение дислокаций, закрепляет их.

Покрытия, полученные высокоскоростными методами, отличаются более высокой плотностью, адгезионной прочностью, хорошей когезионной прочностью, низкой пористостью (поры между собой не связаны), низким содержанием оксидов (при напылении металлических покрытий), низкими потерями легирующих элементов расплаваемого материала (поэтому предсказуем химический состав покрытия), мелкодисперсной и однородной микроструктурой, низкими остаточными напряжениями, высокой микротвердостью, возможностью по-

лучения большой толщины, низким тепловым воздействием на изделие (температура основы менее 150-200° С), относительно гладкой поверхностью покрытия [4].

Расширение применения износостойких покрытий, нанесенных методом высокоскоростного газопламенного напыления, позволяет решить целый ряд задач по упрочнению деталей и узлов промышленного оборудования.

В настоящее время установки высокоскоростного газопламенного напыления достаточно широко представлены на рынке, однако, большинство из них предусматривают использование в качестве материала для нанесения покрытия только порошки (большая часть всех износостойких покрытий, наносимых методом высокоскоростного напыления, приходится на твердые сплавы на основе карбида вольфрама). Применение дорогостоящих порошков значительно увеличивает и без того немалую себестоимость нанесения покрытия. В условиях финансово-экономического кризиса предприятия вынуждены снижать свои затраты, в том числе и на проведение ремонтно-восстановительных работ.

Применение наплавочных порошковых проволок на основе низколегированных железных сплавов позволяет существенно снизить себестоимость нанесения покрытия без большой потери в износостойкости (на сегодняшний день стоимость порошковых материалов на основе карбида вольфрама на порядок превышает стоимость большинства порошковых проволок).

Так, на многофункциональной установке «ТЕХНИКОРД ТОП-ЖЕТ/2» (рис. 2) нам удается получать износостойкие покрытия напылением порошковых проволок. Для напыления нами использовались экономно-легированная порошковая проволока, совместная разработка кафедры

Металловедения УГТУ-УПИ и «Уральского института сварки», ПП-ПМ-6, позволяющая получить в покрытии структуру метастабильного аустенита.

При разработке технологии нанесения покрытия были проведены комплексные исследования покрытий.

По структуре напыленные покрытия представляют собой микрорегетерогенный композиционный материал, состоящий из металлических фрагментов частично окисленного металла и окислов средним размером 10...50 мкм, с включениями карбидной (карборидной) фазы (рис. 3).



Рис. 2. Многофункциональная установка «ТЕХНИКОРД ТОП-ЖЕТ/2»

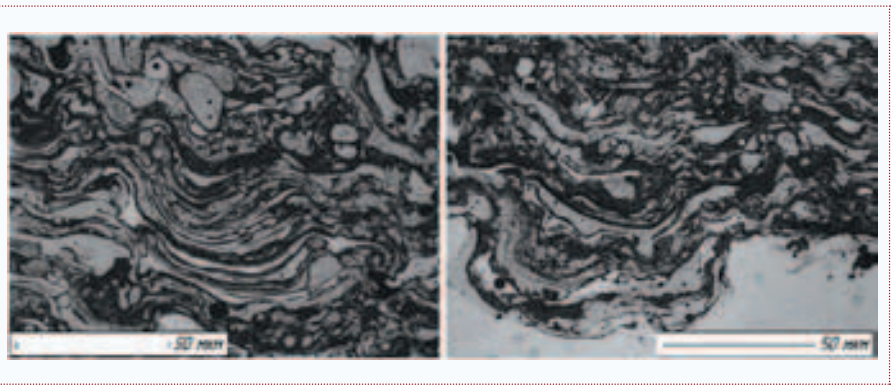


Рис. 3. Микроструктура напыленных слоев из ПП-ПМ-6

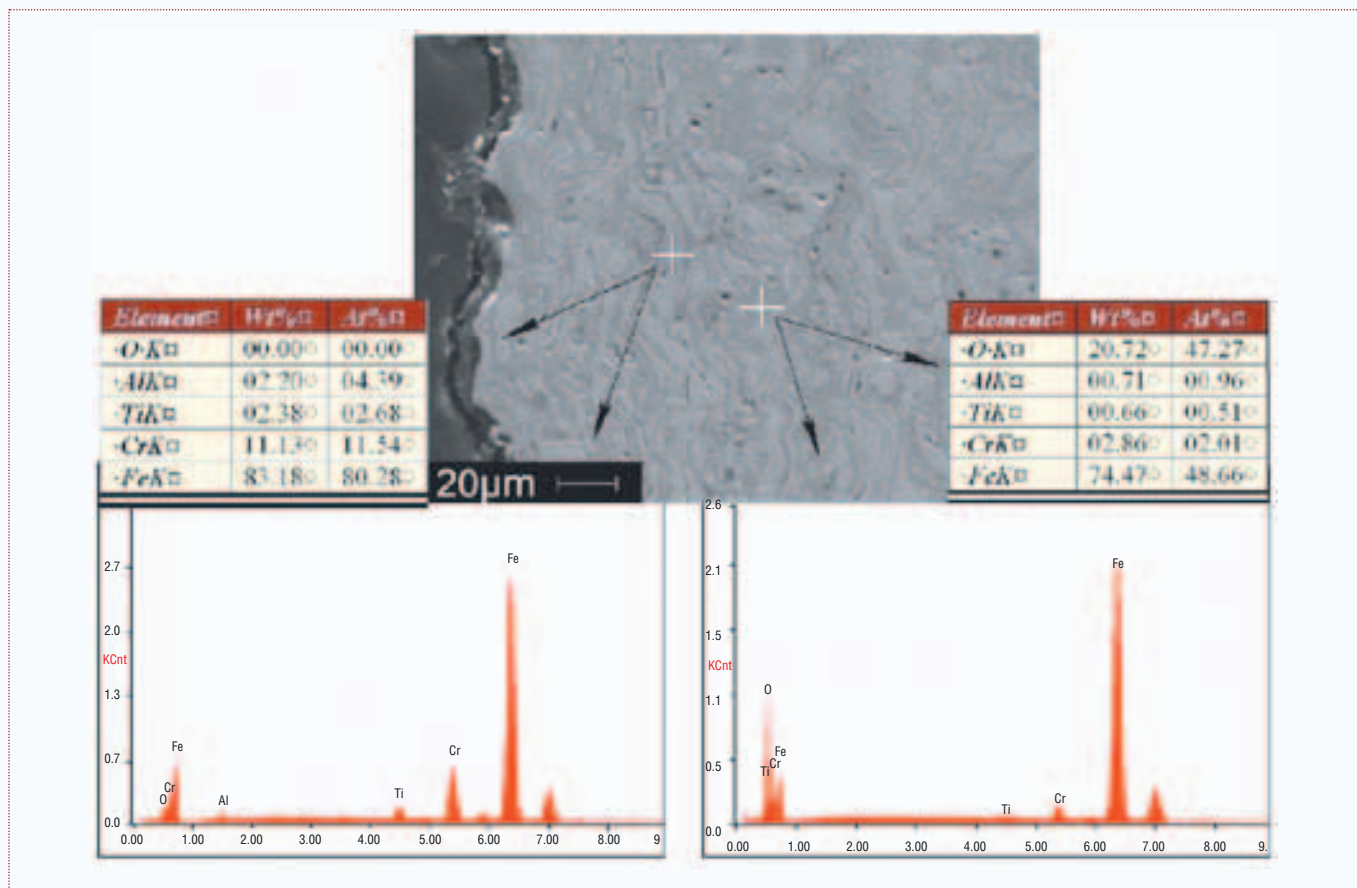


Рис. 4. Электронная микроскопия и химический анализ характерных областей структуры покрытия из ПП-ПМ-6

Можно видеть, что частицы напыляемого материала, транспортируемые высокоскоростной газовой струей, в процессе столкновения с поверхностью подложки диспергируются и перемешиваются, подвергаясь значительной пластической деформации. В результате формируется специфическая волнистая микроструктура с остаточной пористостью (рис. 3). Поры сферической формы образуются из-за снижения растворимости газов в частицах при понижении температуры. Сверхбыстрая кристаллизация расплавленных частиц препятствует полной дегазации, блокируя всплытие пузырьков, образуя поры.

Переходная зона между покрытием и подложкой плотная, без крупных пор и отслоений (рис. 4).

На рис. 4 отчетливо наблюдаются характерные светлые и темные области. Проведенный энергодисперсионный химический анализ (рис. 4) показал, что светлая область содержит неокисленное железо, а темная – преимущественно оксидные компоненты.

Некоторые области содержат очень мелкие, преимущественно сферические включения Fe в FeO и FeO в Fe. Исходя из сферической формы включений, можно предположить, что включения Fe в FeO (и FeO в Fe) образовались, когда обе фазы были в жидком состоянии.

Рентгеноструктурный анализ покрытий показал, что металлическая основа покрытий системы Fe-C-Cr-Ti имеет аустенитно-мартенситную структуру с включениями карбидной фазы, представляющих собой совокупность первичных карбидов титана (TiC), карбидной эвтектики ($\gamma+M_7C+M_3C$) и вторичных карбидов, выделяющихся при охлаждении аустенита. Оксидная фаза состоит преимущественно из Fe_3O_4 и $\gamma-Fe_2O_3$. Кроме того, выявлено

наличие сложных оксидов и шпинелей типа $FeCr_2O_4$, что позволяет получить более равномерную структуру и, соответственно, более качественное покрытие.

Исследование износостойкости проводилось на установке для испытаний на изнашивание образцов с покрытиями при трении о нежестко закрепленные частицы абразива. Исследование показало, что покрытие из ПП-ПМ-6, полученное при оптимальных режимах напыления, имеет высокую износостойкость (рис. 5). Испытания на износостойкость в условиях абразивного изнашивания при трении по закрепленному абразиву также показали высокую износостойкость покрытий из ПП-ПМ-6. В относительных величинах износостойкость покрытия примерно вдвое превосходит износостойкость стального образца эталона.

Рентгеноструктурный анализ рабочей поверхности образцов, проведенный до и после изнашивания, показал, что металлическая основа покрытий системы Fe-C-Cr-Ti имеет аустенитно-мартенситную структуру. Количество остаточного аустенита на поверхности образца с покрытием из ПП-ПМ-6 до изнашивания составляет 60%, а мартенсита – 40%. После изнашивания количество аустенита заметно уменьшается, а мартенсита – увеличивается, составляя 30 и 70% соответственно. Это указывает на метастабильность аустенита и его способность к $\gamma \rightarrow \alpha$ превращению при царапании и микрорезании абразивными частицами. Это повышает диссипативную способность структуры и увеличивает ее восприимчивость к деформационному упрочнению, в результате чего средняя микротвердость рабочей поверхности образцов с покрытиями после изнашивания

составляет 11 ГПа, в то время как аналогичное значение для образцов без покрытий – 6 ГПа.

Как отмечалось выше, абразивная износостойкость является структурно-чувствительной характеристикой. Исходя из этого, очевидно, что высокая износостойкость исследуемых покрытий объясняется, в первую очередь, наличием в структуре метастабильного хромистого аустенита, способного при возникновении деформации претерпевать $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, а также карбидных и карбоборидных упрочняющих фаз.

При возникновении пластических деформаций одновременно с появлением линии деформации происходит распад аустенита с образованием мартенсита деформации, выделением мелкодисперсных (вторичных) карбидов хрома по плоскостям скольжения, создание внутренних сжимающих напряжений, происходит значительное перераспределение структурных составляющих.

Мартенситное превращение, протекающее в процессе царапающего действия абразивных частиц, обеспечивает не только упрочнение, но и частичную диссипацию энергии. Поэтому чем выше микротвердость вторичной

Высокоскоростное газопламенное напыление относится к процессам получения покрытий в условиях сверхбыстрой закалки, которые характеризуются формированием устойчивых метастабильных фаз, расширением области растворимости в твердом состоянии и измельчением элементов структуры. Малые объемы частиц ($d_{\text{ч}} = 30...150$ мкм), высокая степень деформации (растяжения) при ударе, микронные значения толщины и исключительно высокий градиент температуры ($\sim 10^5$ К/с) при теплообмене – именно в подобных термокинетических условиях формируются исследуемые покрытия. В процессе напыления происходит насыщение аустенита легирующими элементами (углеродом и хромом), и при дальнейшем охлаждении со скоростями $10^4...10^6$ К/с, когда фиксируется переход от сегрегационной к бездиффузионной перекристаллизации, часть напыляемого материала не претерпевает $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

Кроме того, при анализе причин стабилизации аустенита в напыляемом материале необходимо иметь в виду, что в процессе нанесения покрытия его поверхностные слои разогреваются до температур 400...500 К, что способствует термической стабилизации аустенита.

Высокая скорость частиц в процессе напыления не только способствует стабилизации аустенита, но и обеспечивает условия для формирования покрытий с высокими адгезионными и когезионными прочностными характеристиками.

Присутствие небольшого количества пор в покрытии придает им высокую маслоудерживающую способность по сравнению с компактными материалами. Поэтому для деталей триботехнических узлов с напыленными покрытиями в условиях трения со смазкой существенно увеличиваются износостойкость и допускаемая мощность трения.

Таким образом, износостойкость исследуемых покрытий определяется не столько исходной твердостью материала, сколько уровнем эффективной прочности поверхностного слоя, который проявится в процессе абразивного изнашивания.

Он зависит от исходной твердости материала и прироста твердости его активных слоев за счет наклепа и мартенситных превращений, происходящих в зоне контакта с абразивом.

В ряде случаев помимо высокой абразивной износостойкости к восстанавливаемым деталям предъявляются требования стойкости в коррозионных средах. Это особенно актуально для узлов и агрегатов трубопроводной арматуры. Известно, что отличной коррозионной и жаростойкостью обладают стали аустенитного класса типа 12Х18Н10Т, но в связи с низкой температурой начала мартенситного превращения аустенитная структура характеризуется высокой устойчивостью. Для фазового упрочнения поверхностных слоев сталей аустенитного класса за счет протекания мартенситного превращения требуются высокие степени деформации, недостижимые при фрикционном взаимодействии со смазочным материалом. Однако установлено [6], что при напылении

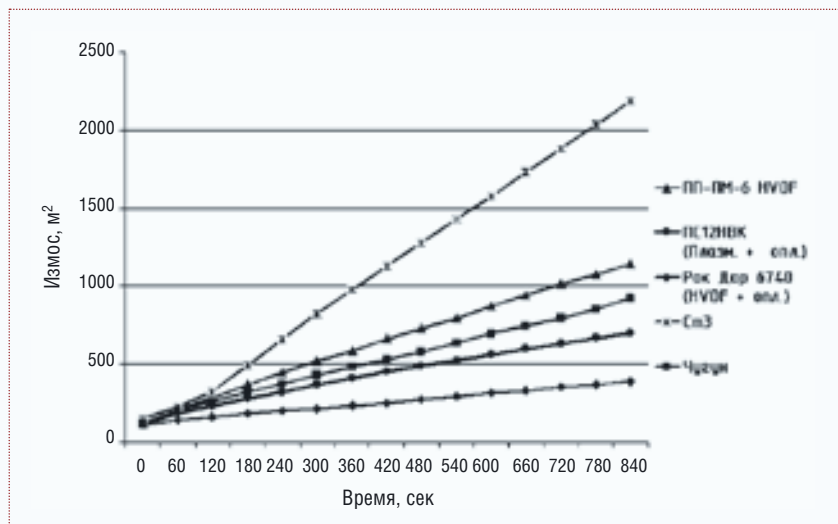


Рис. 5. Результаты испытаний на изнашивание по методу Бринелля-Хаворта

структуры (мартенсит деформации, карбид хрома), тем с меньшего по глубине слоя происходит отделение частиц износа, и тем выше износостойкость.

Немаловажный структурный фактор повышенной износостойкости исследуемых покрытий связан с большей способностью аустенита, по сравнению с мартенситной основой, удерживать хрупкие карбидные и карбоборидные фазы от выкрашивания под воздействием абразивных частиц.

Кроме того, известно, что структурно-неоднородный материал изнашивается как одно целое, поскольку в процессе износа происходит перераспределение удельной нагрузки: она увеличивается для более износостойких фаз и уменьшается для менее износостойких.

Присутствие в исследуемых покрытиях такого большого количества метастабильного аустенита объясняется в первую очередь химическим составом порошковых проволок, а также особенностями технологии их нанесения.



Рис. 6. Восстановление коленчатого вала двигателя КамАЗ

проволок из этих сталей при температурах более 2500 К можно осуществить дестабилизацию аустенитной фазы в формируемых покрытиях. Данные покрытия наравне с отличной коррозионной стойкостью будут обладать и высокой абразивной износостойкостью за счет присутствия в структуре метастабильного аустенита. Еще больший интерес вызывает возможность применения кавитационностойких нержавеющей сталей марок 30X10Г10, 0X14AG12M, 20X14H3Г6 [5].

Технология высокоскоростного газопламенного (HVOF) напыления отличается стабильностью процесса и обеспечивает получение покрытий с заданными характеристиками. Это позволяет эффективно применять покрытия, полученные данным методом, для реновации и упрочнения деталей машин.

Так, нам удается восстанавливать коленчатые валы автомобилей с дизельными двигателями путем нанесения покрытий из низколегированных сталей напылением порошковой проволокой. Были проведены успешные стендовые испытания на авторемонтном заводе «5ЦАРЗ» Министерства обороны РФ коленчатого вала двигателя «КАМАЗ», восстановленного нами методом высокоскоростного газопламенного напыления (рис. 6).

Также нами были проведены работы по упрочнению лопаток роторов нагнетателей. Испытания покрытия из порошковой проволоки на основе низколегированного железного сплава проводились на ОАО «Качканарском ГОК «ВАНДИЙ» (г. Качканар), ОАО «ЧМК» (г. Челябинск), ОАО «ЕМЗ» (г. Енакиеве), ОАО «ЗСМК» (г. Новокузнецк) и показали положительные результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970
2. Войнов Б.А. Износостойкие сплавы и покрытия. — М.: Машиностроение, 1980.
3. Филипов М.А., Филипенков А.А., Плотников Г.Н. Износостойкие стали для отливок: монография / Екатеринбург, 2009.
4. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование): Учеб. пособие для студентов вузов. — М.: Интермет Инжиниринг, 2004.
5. Филипов М.А., Литвинов В.С. Немировский Ю.Р. Стали с метастабильным аустенитом. — М.: Металлургия, 1988.
6. Белоцерковский М.А. Структурные аномалии в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 10 с. 39-44.
7. Балдаев Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. — М.: Изд-во «КХТ», 2004.