

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ В ЕВРОПЕ И НОВЫЕ  
ПОДХОДЫ К ИХ РАЗРАБОТКЕ  
(ПО МАТЕРИАЛАМ ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЕЧАТИ)

А.Л. Геллер (Германия)

Одним из важнейших потребителей стали является автомобилестроение. Предполагаемый в течение ближайших 10...15 лет переход на электромобили ставит новые проблемы перед материаловедами. Чтобы компенсировать повышение веса машины из-за аккумуляторов, необходимо применить все возможные меры для облегчения конструкции. Наиболее радикальное решение предлагает фирма BMW /1/, которая вообще планирует отказаться от стали как основного материала. Кузов электромобиля MCV будет выполнен с использованием сверхлегкого, но высокопрочного композитного углепластика. Впервые в мире для строительства серийных машин будет использован карбон. BMW объединился для этого с американской фирмой SGL Carbon - лидером отрасли. В апреле с.г. на западном побережье США начали строить завод для изготовления углепластика. Этот процесс, как уверяют американцы, происходит без выделения каких бы то ни было вредных веществ. Материал в виде нитей должен поступать из США. В Германии - в Вакерсдорфе и Ландсхуте - из него будут изготавливать полосы и "штамповать" детали корпуса, которые затем отправятся в Лейпциг. Карбон, однако, в три-пять раз дороже алюминия и в 40 раз дороже стали. Кроме того, он легко расщепляется, что создает дополнительные проблемы для конструкторов, как отмечает Штефан Братцель, руководитель исследовательского центра автопрома в Бергиш Гладбахе. Братцель напоминает, что авиастроители пытались использовать карбон при создании авиалайнера Boeing 787 "Dreamliner", но отказались именно из-за сложности его обработки.

В проекте «Super Light Car»/2/ для кузова использован композиционный материал, состоящий на 53% из алюминия, на 36% из стали, на 7% из магния и на 4% из армированной волокнами пластмассы. Эксперты все чаще приходят к мнению, что при организации массового производства доступного и надежного электромобиля нельзя будет обойтись без стальных частей кузова. В связи с этим недавно разработан по инициативе американского Iron and Steel Institute международный проект Future Steel Vehicle, предусматривающий концентрацию усилий основных промышленных стран на решение проблемы разработки специальных сталей для автомобиле- и автомобилестроения.

У этого проекта есть хорошие шансы на реализацию. В Германии имеются уже серьезные разработки у ряда металлургических концернов, в частности, у ThyssenKrupp /3/. Последний выпускает высокопрочные листы для автомобилестроения: горячекатаные из сталей марок CP-W®800 и CP-W®1000, холоднокатаные из сталей CP-K®60/78 и CP-K®70/98 . Число в обозначении марки горячекатаной стали соответствует значению предела прочности, МПа, в обозначении марок холоднокатаных сталей числитель соответствует минимальному значению предела текучести, знаменатель- предела прочности (0,1  $\sigma$ , МПа). Стали содержат (в % ): углерода 0,12 (стали CP-W®800 и CP-K®60/78) или 0,17 (стали CP-W®1000 и CP-K®70/98), марганца 2,20, кремния 0,80, фосфора до 0,040, хрома+молибдена 1,00, серы до 0,015, ниобия+ титана 0,15, алюминия 1,20, ванадия 0,20, бора 0,005. В результате соответствующего химического состава и специально организованного процесса горячей прокатки многофазные стали проявляют особо тонкую структуру, состоящую из определенных структурных частей феррита и бейнита, которая в сочетании с дисперсионным твердением обеспечивает особую комбинацию свойств высокой прочности и износостойкости с хорошим формообразованием при холодной деформации и хорошей свариваемостью. Термическая обработка (дисперсионное твердение при 170°C с выдержкой 20 минут) повышает прочностные свойства на 30...70 МПа.

Новые перспективы открывает применение трехфазных сталей с наноупрочнением. В ближайшем будущем поступит на рынок сталь TPN-W 900 . Структура этой стали состоит из феррита, бейнита и остаточного аустенита с тонкими карбидами с размерами в нанометрической области. Эта сталь будет выпускаться в виде горячекатаной полосы толщиной от 1,6 до 4,0 мм при ширине до 1400 мм. В качестве поверхностной антикоррозионной обработки предполагается электролитическое цинкование. Минимальное значение предела прочности 900 МПа, предела текучести 750 МПа, относительного удлинения 15%. Сталь предполагается использовать для монолитных частей дверной рамы автомобиля.

Уже в настоящее время должна начаться поставка сверхвысокопрочной тонколистовой стали MBW 1900. В качестве основных легирующих элементов используются марганец и бор. Она будет поставляться как в горяче- так и в холоднокатаном состоянии в полосах толщиной от 1,5 до 3,0 мм и шириной до 1550 мм. Эта сталь позволяет получить после определенной термической обработки

минимальные значения предела текучести 1000 МПа, предела прочности 1900 МПа при относительном удлинении 5%. Основная область применения этой стали — несущие конструкции автомобиля, например, боковая несущая рама или дверные рамы, бампер, т.е. детали, от которых требуется особо высокая прочность, надежность и ударостойкость. Детали изготавливаются горячей штамповкой. При этом ThyssenKrupp предложил интересную технологию градиентного упрочнения деталей. У дверной рамы, например, в ряде случаев желательно в нижней части иметь менее высокую прочность, но более высокую пластичность, поскольку эта часть должна при необходимости демпфировать энергию удара, в верхней же части — более высокую прочность. Для получения таких свойств штамповочный инструмент нагревают по-разному: до более высокой температуры в части, соответствующей низу рамы, и до более низкой температуры в части, соответствующей ее верху. Это приводит к различию скоростей охлаждения. В результате внизу рамы получают прочность порядка 700 МПа при относительном удлинении 15%, а вверху соответственно 1900 и 5. Переходная область составляет от 15 до 60 мм. Последние разработки на ThyssenKrupp проводились в рамках проекта InCar, общая стоимость которого составила 35 млн. евро и в котором было занято около 100 инженеров и техников на 12 предприятиях концерна.

Даже при производстве листовых конструкций, например, для крыши, использование стали может оказаться перспективным, особенно в сочетании с другими материалами. Предложено использовать слоистый материал типа сэндвич, два наружных слоя которого — стальные листы толщиной соответственно 0,2 и 0,3 мм, а срединный слой — полимер толщиной 0,4 мм. Крыша из такого материала на 38% легче стальной, но на 33% дороже [2]. Следует отметить, что применение алюминия во многих случаях не имеет большого смысла. Если учесть различия необходимых толщин за счет применения высокопрочных сталей, то стальная конструкция может оказаться всего на 4...5% тяжелее, но на 50% дешевле. В заключение отметим, что германское правительство придает очень большое значение развитию электромобилестроения. По правительственной концепции уже в 2020 г. в Германии должно находиться в действии не менее 1 млн. электромобилей, в 2040 г. — 5 млн. Для развития отрасли предусмотрены государственные инвестиции в объеме 200 млн. евро.

Основным производителем сталей для магистральных газопроводов в Германии является в настоящее время дочернее предприятие концерна Salzgitter AG — Mannesmannroehren Muelheim

GmbH. При этом предприятие специализируется в течение последних десятилетий на производстве термомеханически упрочненной листовой стали. Применение высокопрочных трубных сталей позволяет с одной стороны уменьшить толщину стенки трубы и за счет этого снизить вес конструкции и уменьшить объем сварочных работ, с другой – увеличить производительность газопровода за счет повышения давления. Применение термомеханического упрочнения позволило повысить прочность CMnV- стали от класса X52 (минимальное значение предела текучести 359 МПа) в горячекатаном и нормализованном состоянии до классов X60, X65 и X70 (минимальное значение предела текучести 483 МПа). Получение класса X80 стало возможным лишь в результате сочетания термомеханического процесса прокатки CMnNbTi- стали с ускоренным охлаждением. Первый в мире промышленный трубопровод класса X80 был сдан в эксплуатацию в Германии в 1992 году. Для промышленного применения в настоящее время используются CuCrNiNbTi-сталь, содержащая 0,06%С и 1,9%Mn при углеродном эквиваленте 0,20. В результате ускоренного охлаждения получают свободную от мартенсита бейнитную структуру с небольшим количеством феррита /4/.

В середине 90-х годов начали предприниматься дальнейшие шаги для повышения прочности толстолистовой трубной стали. Производители труб поставили задачу изготовить и провести полупромышленное опробование труб класса X100 (минимальное значение предела текучести 690 МПа) с диаметром 28" и толщиной стенки 19,1 мм. Систематические исследования в этом направлении начали проводиться с 1995 года. Уже в 2003 году была выпущена первая опытно-промышленная партия. Была использована CMnVNbTi- композиция с добавками CuNiMo /4/. В связи с необходимостью обеспечения высокой ударной вязкости и хорошей свариваемости содержание углерода ограничивали 0,06%. Для достижения необходимого уровня качества были использованы особые приемы в производстве стали, прокатке и стратегии охлаждения. Полученная сверхвысокопрочная сталь превосходит ранее производимые по уровню всех механических характеристик. При производстве первой промышленной партии в 2006 году получен следующий уровень свойств, значительно превосходящий требования: предел текучести 761 МПа, предел прочности 827 МПа, относительное удлинение 31%, работа разрушения образца с надрезом 270 Дж, доля вязкого излома при -20°C 88% (средние значения). В настоящее время ведутся лабораторные исследования в направлении разработки трубной стали

класса X120 /5/. Лабораторные плавки на базе CMnNbVTi-композиции с добавками бора показали результаты, вселяющие надежды на успех.

Большое внимание уделяется развитию новых жаропрочных трубных сталей для тепловых электростанций высокой производительности. Проблема обусловлена тем, что несмотря на широкое развитие альтернативных способов получения электроэнергии, 73% электроэнергии производится на тепловых электростанциях, где остро стоит вопрос о снижении эмиссии CO<sub>2</sub> и в связи с этим о повышении коэффициента полезного действия. В настоящее время на тепловых электростанциях Германии достигается в среднем КПД порядка 38%, что обеспечивается максимальной температурой пара 600°C. Для повышения КПД до 50% необходима температура пара выше 700°C.

В этих условиях для мембранных тонкостенных труб пароперегревателей становится невозможным применение ферритных сталей типа 16Mo3 или 13CrMo 4-4. Возникла необходимость в новых сталях, которые могли бы при использовании в тонкостенных котельных трубах хорошо свариваться без необходимости последующей термической обработки. Так были разработаны бейнитные стали T/P23 (C=0,04-0,10%, Si<=0,50%, Mn=0,10-0,60%, Cr=1,90-2,60%, Mo=0,05-0,30%, V=0,20-0,30%, W=1,45-1,75%, Nb=0,02-0,08%, N<=0,030%) и T/P24 (C=0,05-0,10%, Si=0,15-0,45%, Mn=0,30-0,70%, Cr=2,20-2,60%, Mo=0,90-1,10%, V=0,20-0,30%, N<=0,10%, B=0,0015-0,0070%, Ti=0,05-0,10%) /6/. Длительная прочность этих сталей повышена почти в два раза за счет дополнительного легирования сильными карбидообразующими элементами ванадием, ниобием и титаном, а также вольфрамом и бором. Трубы из этих сталей поступают в термически улучшенном состоянии. При толщине стенки менее 10 мм появляется возможность отказаться от дополнительной термической обработки после сварки.

Для толстостенных труб, работающих при температурах от 750 до 780°C, разработаны мартенситные стали E911 (C=0,09-0,13%, Si=0,10-0,50%, Mn=0,30-0,60%, Cr=8,50-9,50%, Ni=0,10-0,40%, Mo=0,90-1,10%, V=0,18-0,25%, Nb=0,06-0,10%, W=0,90-1,10%, N=0,05-0,09%) и T/P92 (C=0,07-0,13%, Si<0,50%, Mn=0,30-0,60%, Cr=8,5-9,5%, Ni<0,40%, Mo=0,30-0,60%, V=0,15-0,25%, W=1,5-2,0%, Nb=0,04-0,09%, N=0,03-0,07%, B=0,001-0,006%) /7/. Мартенситную структуру этих сталей получают после нормализации от 1060°C.

В условиях высокого давления пара приходится особо считаться с высокотемпературной коррозией, которая может ограничивать долговечность трубопроводов. Для этих целей содержание хрома,

принятое в двух последних сталях, оказывается недостаточным. Поэтому для применения при температурах до 650°C в условиях повышенной опасности высокотемпературной коррозии была разработана еще одна сталь с повышенным до 12% содержанием хрома – сталь с фирменным обозначением VM12-SHC (C=0,10-0,14%, Si=0,40-0,60%, Mn=0,15-0,45%, Cr=11,0-12,0%, Ni=0,10-0,40%, Mo=0,20-0,40%, V=0,20-0,30%, W=1,30-1,70%, Nb=0,03-0,08%, Co=1,4-1,8%, N=0,030-0,070%, B=0,0030-0,0060%, Al<0,020%). Исследования этой стали еще не закончены. Но уже есть данные о том, что сталь позволяет получить требуемые значения длительной прочности на базе 30000 часов. Сейчас производится изготовление пароперегревателей для пяти крупных паровых электростанций мощностью от 800 до 1100 МВт /8/.

Весьма специфичными являются вопросы изыскания и развития материалов для насадочных колец роторов турбин /9/. Насадочное кольцо является весьма нагруженной деталью, т.к. оно должно предохранять обмотку ротора от действующих центробежных сил. Материал должен характеризоваться высокими механическими свойствами и быть немагнитным. Последнее требование связано с тем, что при вращении ферромагнитного материала в магнитном поле в нем возникали бы вихревые токи, что вело бы к потере мощности и дополнительным термическим напряжениям между головкой и кольцом. В связи с этим единственным вариантом решения проблемы является применение аустенитных сталей специального состава при использовании специальных технологий производства.

Если в начале XX столетия в качестве основного легирующего элемента использовали никель, то уже с середины века предпочтение стали отдавать марганцу. С 1954 года в течение примерно трех десятилетий для производства колец применяли преимущественно сталь P750, содержащую 0,53%С, 0,80%С, 18%Mn, 4,5%Cr, 0,10%V, 0,10%N. Свойства этой стали можно было изменять посредством варьирования пераметрами основных технологических процессов:ковки, релаксационного отжига, холодной раздачи. Основным недостатком этой стали была склонность к коррозии под напряжением, что резко осложняло условия эксплуатации. С 1975 года начались работы по созданию стали P900, которая по сравнению с предыдущей характеризовалась более высокими механическими свойствами и более высоким сопротивлением коррозии под напряжением. С 1990 года эта сталь используется повсеместно. Основным фактором, способствующим улучшению качества, является повышение содержания растворенного азота. Химический состав

стали: C<0,12%, Si =0,30%, Mn= 18,50%, N=0,50%. При комнатной температуре достигается значение предела текучести 1350 МПа. Однако уже сейчас дискутируется вопрос о повышении рабочих температур турбины от 100 до 130°C и выше. Для этой цели необходима более высокопрочная сталь, которую удалось получить в результате совершенствования технологии выплавки с использованием давления, что позволяет еще более увеличить содержание растворенного азота (до 1% при давлении 40 бар). Сталь P2000 содержит <0,10%С, <1,00%Si, 14,00%Mn, 18,00%Cr, 3,00%Mo, 0,85% N. Предел текучести при комнатной температуре составляет 1570 МПа, при температуре 130°C – 1350 МПа, а при температуре 150°C – 1300 МПа. Сталь P2000 недавно начала поступать на рынок.

В некоторой мере сходные, но еще более сложные проблемы возникли при изыскании сталей для большого адронного коллайдера (проект CERN) /10/. Одна из материаловедческих проблем состояла в разработке стали для экранирования магнитных конструкций, что необходимо для стабильности работы магнитов. Такая сталь должна быть полностью немагнитной, т.е. сохранять аустенитную структуру вплоть до гелиевых температур, обладать высокими механическими свойствами, хорошей свариваемостью, в т.ч. устойчивостью против горячих трещин. Существующие стали (напр., Nitronik 40 или UNS 21904 на основе марганца и никеля) не проявляли достаточной устойчивости против выделений феррита в области сварного соединения или мартенситного превращения при деформации и не могли быть использованы для решения поставленной в проекте задачи. Новая сталь, которая по существующей классификации может быть обозначена как 19Cr11Ni12Mn0,9Mo0,012C0,33N и получившая название P506, содержит (%): C=0,12, Si= 0,23, Mn=12,05, P=0,005, S=0,001, Cr=19,18, Mo=0,86, Ni=10,90, Cu=0,04, Co<0,05, V<0,01, N=0,33.

Химсостав и микроструктура стали обеспечивают немагнитное поведение базового металла (благодаря повышенному содержанию марганца), полностью аустенитное немагнитное состояние в сварном соединении (благодаря повышенному содержанию никеля) и отсутствие склонности к горячим трещинам (благодаря повышенной чистоте металла). Повышенная стабильность к спонтанному или инициируемому напряжением мартенситному превращению (изменения температуры при эксплуатации экрана могут происходить от комнатных до криогенных температур) достигается общим повышением степени легированности. Сталь обладает высокими механическими свойствами, что необходимо в случае охлаждения

магнитов. При комнатной температуре свойства находятся на следующем уровне (продольное/поперечное направление): предел текучести 405/418 МПа, предел прочности 730/758 МПа, деформация при разрушении 47/46%, при температуре 77°К соответственно 1180/1120 МПа, 1760/1715 МПа, 57/45%, при температуре 4,2°К — 1620/1700 МПа, 2115/2105 МПа, 18/15%. Ударные испытания по ISO образцов с V-образным надрезом показали работу разрушения при 4,2°К более 200 Дж, при комнатной температуре — более 300. Как видно из приведенных данных, свойства достаточно изотропны. Высокая пластичность при низких температурах достигается благодаря низкому содержанию включений, отсутствию нитридов и очень гомогенной микроструктуре. Указанные свойства в сочетании с высокой коррозионной стойкостью (благодаря повышенному содержанию азота) обеспечивают успешное применение стали в проекте CERN.

Предложен также вариант аустенитной немагнитной стали, получаемой методом порошковой металлургии, что позволяет еще более повысить чистоту металла [11]. Сталь получила название PM316LN (PM-Powder Metallurgy). Порошок имел следующий химический состав (%): C=0,017, Cr=16,98, Ni=13,07, Mn=0,71, Mo=0,53, N=0,16, Si=0,59, P=0,012, S=0,005. После гомогенизирующего отжига структура была чисто аустенитной без заметных при увеличении  $\times 500$  включений нитридов или карбонитридов. Типичный размер зерна — балл 6, 7. При комнатной температуре предел текучести составляет 334 МПа, при 4,2°К — 1118 МПа, предел прочности соответственно 664 и 1768 МПа, деформация при разрушении 49 и 45%. Интересно, что в этом случае высокие значения прочности при криогенной температуре сочетаются с высоким относительным удлинением (45%), близким к его значению при комнатной температуре. Механические свойства сварного шва оказываются выше, чем основного металла. Значения работы разрушения при ударе у порошковой стали ниже, чем у ковальной аналогичного состава, но существенно выше минимально требуемого значения 40 Дж. На основании полученных результатов были изготовлены опытные дипольные магниты. Применяется ли эта сталь серийно, не сообщалось.

Работы по созданию новых конструкционных материалов сейчас, как и раньше, проводятся, в основном, на эмпирической основе. Попытка сделать принципиально новый шаг в этом направлении предпринимается сейчас в проекте «Сталь *ab initio*, или сталь как она есть», выполняемом высшей технической школой



Аахена в кооперации с институтом металлургии им. Макса Планка в Дюссельдорфе, в котором, пожалуй, впервые сделана попытка, исходя из представлений современной физики твердого тела, разработать принципы создания сталей с заданными механизмами упрочнения и свойствами /12- 14/. В высшей технической школе Аахена в проекте заняты 21 сотрудник, в т.ч. 5 профессоров и 8 научных сотрудников. Средний возраст участников проекта 42 года. Работа над проектом начата в 2007 году. Первые результаты предполагается получить в 2011 г., полное завершение проекта планируется на 2015 год.

Принцип *ab initio* предполагает сочетание расчетно-теоретических подходов к стали как к материальному объекту на всех возможных уровнях. Например, на макроскопическом уровне могут быть выполнены расчеты локальных распределений деформаций, на мезоскопическом уровне — расчеты упрочнения и повреждения как функции механизма формоизменения, на микроскопическом уровне — расчеты кинетики процессов на межфазных и граничных зонах, на атомарном уровне — расчеты энергии дефектов упаковки. Для расчетов на квантово-механическом уровне используется уравнение Шредингера для атомно-электронных систем, состоящих из разнородных атомов. При этом учитываются электронная структура — химические связи, атомные конфигурации — кристаллические структуры, энергия и динамика дефектов, магнитный порядок. Энергия дефектов упаковки вычисляется как функция сил межуатомного взаимодействия в различных кристаллических модификациях в зависимости от состава сплава и температуры.

Для работы была выбрана система Fe-Mn-C, т.к. наблюдаемые механические свойства сталей этой системы базируются на различных металлофизических механизмах деформации и упрочнения. В основу разработок положены важнейшие термомеханические, кинетические и механические эффекты, которые отличают систему Fe-Mn-C и способствуют созданию новой группы материалов для облегченных конструкций с особым потенциалом прочности и пластичности. В связи с большим значением энергии дефектов упаковки в этой системе эта концепция легирования особенно хорошо подходит для термодинамического моделирования. В этой системе возможно использование всех известных механизмов упрочнения: гомогенное дислокационное скольжение, негомогенное дислокационное скольжение (динамическое деформационное старение), пластичность, наведенная мартенситным превращением или двойникованием. Преимущество кооперации различных механизмов упрочнения, приводящее к совершенно исключительной комбинации свойств,

хорошо видно при сопоставлении кривых деформации различных классов сталей. Расчеты по принципу *ab initio* должны снабдить исследователей знаниями, которые уже на ранних стадиях могли бы быть использованы для феноменологических моделей на уровне механики сплошных сред с тем, чтобы сократить объем и время экспериментальных разработок. При этом должно быть принципиально показано, что принципы *ab initio* могут быть целенаправленно использованы и развиты для постановки научно-инженерных вопросов в материаловедении.

Параллельно проводились экспериментальные и технологические разработки, включающие также разработку новых технологических процессов и методов испытаний, подходящих для этой группы материалов. Долгосрочными целями этой особой области исследования являются:

- разработка новых методических подходов к развитию металлических материалов и процессов, основанных на принципах *ab initio*;
- разработка нового класса структурных материалов с необычной комбинацией свойств прочности и формоизменения;
- ускорение и удешевление исследовательских работ по разработке материалов.

Краткосрочными целями, которые должны быть достигнуты в течение первых четырех лет работы, являются:

- экспериментальное представление и характеристика материалов на основе Fe-Mn-C;
- использование принципов *ab initio* для предсказания фазовых переходов и изменения механизмов упрочнения;
- установление отдельного влияния химического состава, температуры и других параметров на механизмы упрочнения.

#### Литература

1. BMW wagt Karbon-Revolution. Von Margret Hucko. Financial Times Deutschland, 02.07.2010.
2. Dr. Karsten Kroos. Elektromobilität-Herausforderungen an Werkstoff Stahl. Internationale Jahrestagung Stahl 2010. Programm, S.5.
3. Dr. Ulrich Jaroni, Dr.Karsten Kroos. Die innovative Lösungsbaukasten für die Automobilindustrie InCar. ThyssenKrupp. Informationsmaterial. Ausgabe Okt. 2009.
4. Dr. Fabian Grimpe, Dr. Stefan Meimeth, Dr. Heike Meuser, Dr. Andreas Liessem. Entwicklung, Produktion und Anwendung thermomechanisch gewalzter hoch- und ultrahochfester Grobbleche. Stahl, 2007, 4, S.17-19.
5. F. Grimpe, S. Meimeth, C.J. Heckmann, A.Lieesem, A. Gehrke. 1<sup>st</sup> International Conference Super-High Strength Steels. November 2-4, 2005. Rome, Italy.

6. Walter Bendick, Bernd Hahn, Bruno Lefebvre. Neue warmfeste Rohrstähle für Hochleistungskraftwerke. Stahl, 2007, 4, S. 14-15.
7. Bendick, W., Gabrel, J., Hahn, B., Vandenberghe, B. : Int. J. Pres. Vessel & Piping 84, 2007, S. 13-20.
8. Gabrel, J., Vandenberghe, B., Zakine, C. 5<sup>th</sup> Intern. Conf. On Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, Oktober 2007, Marco Island, USA.
9. Dirk Weinem und Jürgen Domin. Werkstoffe für Kappenringe im Kraftwerkbau. Stahl, 2007, 4, S. 20-22.
10. S. Sgobba and G. Hochoektler: A New Non-Magnetic Stainless Steel for Very Low Temperature Applications, Proceedings of the International Congress Stainless Steel 1999 : Science and Market, Chia Laguna (I), 6-9 June 1999, Vol. 2, p. 391-401
11. S. Sgobba, F. Savary, J. Liimatainen and M. Kumpula, A Powder Metallurgy Austenitic Stainless Steel for Application at Very Low Temperatures: Proceedings of the 2000 Powder Metallurgy World Congress, Nov. 12-16, 2000, Kyoto, Japan, vol. 2, p. 1002-1005
12. Ulrich Ratzek. Innovatives Werkstoffdesign durch anspruchsvolle Weiterbearbeitungsprozesse. Stahl und Eisen, 129, 2009, Nr.12, S. 34-38.
13. Dr. Wolfgang Bleck. Stahl ab-initio. Quantenmechanisch geführtes Design neuer Eisenbasis- Werkstoffe. Ingenieurwissenschaften Jahresmagazin Werkstofftechnologien.  
<http://www.institut-wv.de/index.php/7436/>.
14. Prof. Dr. Wolfgang Bleck. Stahl ab-initio. Quantenmechanisch geführtes Design neuer Eisenbasis- Werkstoffe. Internationale Jahrestagung Stahl 2009. Programm, S..5.