

УДК 669.112.227.33 + 669.15-194

БЕЙНИТНЫЙ ЧУГУН ИЛИ СТАЛЬНОЙ ПРОКАТ: ГРАНИЦЫ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

А.И. Покровский, А.П. Ласковнев, Л.Р. Дудецкая

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси.

Беларусь, г. Минск

Анализируя мировые тенденции и используя результаты собственных исследований по получению ответственных изделий из высокопрочного чугуна с бейнитной структурой, авторы рассматривают его преимущества и недостатки. Обсуждаются возможности замены легированной стали на бейнитный чугун при изготовлении ответственных изделий. С использованием ряда материаловедческих и технологических аргументов показаны ограничения применимости бейнитного чугуна для длинномерных деталей, работающих в условиях циклических и ударных нагрузок и температурных колебаний.

Введение

В последние десятилетия использование высокопрочных чугунов, особенно обладающих аустенитно-бейнитной структурой, стремительно расширяется, вытесняя во многих областях легированные стали [1]. Это объясняется лучшими литейными и технологическими свойствами чугуна по сравнению со сталью, более низкой температурой плавления, хорошей обрабатываемостью резанием. Чугун обладает и некоторыми уникальными, присущими только ему особенностями. Наличие графитных включений обеспечивает хорошие антифрикционные свойства, способность быстро гасить вибрации и резонансные колебания, малую чувствительность к надрезам, меньший, чем у стали, удельный вес, повышенную теплопроводность. Все это обуславливает широкое применение высокопрочного чугуна для изготовления ответственных изделий.

Для очень многих областей чугун действительно перспективный материал, причем для ряда деталей – единственно оптимальный. Примерами таких деталей в автомобилестроении являются блоки цилиндров, коленчатые и распределительные валы, тормозные барабаны, диски сцепления, поршневые кольца, тормозные барабаны, ступицы колес, коробки дифференциалов,

кронштейны, гидравлические муфты, подвески рессор, картеры задних мостов [2].

Из чугуна изготавливают прокатные валки, станины прокатных станков, детали кузнечно-прессового и дробильно-размольного оборудования, турбин, автомобилей, тепловозов, тракторов, компрессоров, насосов и многие другие. Примеры деталей из чугуна в станкостроении: зубчатые колеса и шестерни, суппорты, резцедержатели, планшайбы, шпиндели, конические оправки, корпуса токарных патронов и т. п.

Особенность чугуна по сравнению со сталью – гетерогенная структура, включающая несколько абсолютно разнородных структурных составляющих:

1) металлическая матрица – достаточно прочная и пластичная;

2) графитные включения – непрочные (по сравнению с прочностью матрицы фактически являются порами), но зато обеспечивающие высокие триботехнические, демпфирующие показатели изделий.

Основные тенденции совершенствования структуры чугуна следующие:

1. Переход от разветвленной формы графита к компактной и сферической, то есть переход от класса серых чугунов к классу высокопрочных чугунов с шаровидным графитом (ВЧШГ).

История высокопрочного чугуна не насчитывает и 100 лет. Считается [3], что впервые высказал намерение совершенствовать форму графита в сером чугуне J.W. Bolton в 1943 году на съезде Американской ассоциации литейщиков (AFS). Несколько недель спустя американец Keith Dwight Millis в лаборатории «International Nickel Company» (INCO) обнаружил, что при добавлении магния в расплав чугуна, при его последующей кристаллизации графит приобретает практически идеальную шаровидную форму.

Публичное заявление о получении высокопрочного чугуна с шаровидным графитом было сделано 7 мая 1948 г. на съезде американских литейщиков в г. Филадельфии (США) фирмой «International Nickel Company» [4]. Эту дату многие считают днём рождения высокопрочного чугуна. Есть и другая точка зрения [5], основанная на дате первой публикации, в таком случае нужно ориентироваться на 25 октября 1949 г., когда был опубликован патент на «Cast ferrous alloy» автора Keith Dwight Millis и двух его соавторов [6]. С сегодняшней точки зрения по прошествии такого времени, споры о конкретной дате кажутся чисто историографическими.

Гораздо важнее то, что 1948–1949 гг. произошла фактически мини-революция в области металлургии чугунов, начали активнейшим образом развиваться способы получения чугуна с шаровидным графитом. На сегодняшний день опубликованы тысячи статей, созданы целые научные школы по разработке технологий получения ВЧШГ и изучению их свойств.

Действующий с 1985 г. по настоящее время в странах СНГ межгосударственный стандарт «Чугун с шаровидным графитом для отливок» [7] предусматривает достаточно широкую гамму марок высокопрочных чугунов, в том числе наиболее высокую – ВЧ 100, обладающую показателем предела прочности при растяжении на уровне 1000 МПа.

2. *Второй тенденцией совершенствования структуры чугуна является переход, начиная с 70-х годов прошлого века, на аустенитно-бейнитную структуру металлической матрицы (или на т.н. «бейнитный чугун»).*

Структура металлической матрицы этого чугуна не полностью бейнитная, а содержит кроме бейнита еще и нераспавшийся аустенит. В российской литературе этот чугун обозначают аббревиатурой АБЧШГ – аустенитно-бейнитный чугун с шаровидным графитом; англоязычное сокращение ADI – Austempering Ductile Iron, в

немецкоязычной литературе употребляют термин Zwischenstufenvergütung von Gusseisen mit Kugelgraphit, который можно перевести как «улучшение в промежуточной области превращений чугуна с шаровидным графитом».

Первые публикации по аустенитно-бейнитному чугуну относятся к 50-м годам прошлого века [8]. Большой вклад в 1970 – 1990-х гг. в теорию и практику бейнитного чугуна внесли работы Dodd J., Matti Johanson, Stenfors S.E., Klaus Rohrig и др. [9–16].

Аустенитно-бейнитная структура обеспечивается двумя факторами: специальным легированием, а также особой термической обработкой (изотермической закалкой).

Увеличение прокаливаемости и стабилизация аустенита, как правило, обеспечивается такими элементами, как никель, медь, марганец, молибден. Типовой диапазон химического состава бейнитного чугуна следующий (% масс.) [17]: углерод – 3,2–3,8; кремний – 2,0–2,4; марганец – 0,2–0,5; никель – 0,8–2,5; медь – 0,5–1,5; молибден – 0,2 – 0,8. Следует отметить, что, начиная с 70-х годов, во всем мире происходило активное патентование бейнитных чугунов [18–20].

Термическая обработка бейнитного чугуна состоит из двух важных этапов:

1) аустенизация (нагрев до температур порядка 950 °С);

2) изотермическая закалка – быстрый (обязательно до начала наступления мартенситного превращения) перенос в охлаждающую среду с температурой в диапазоне 300–500 °С с последующей выдержкой в ней. При этом прерывается распад аустенита и в структуре формируются две фазы: бейнит (феррито-карбидная смесь) и остаточный аустенит. Бейнит обеспечивает прочность, аустенит – пластичность.

Различают два основных типа бейнитов в чугунах – нижний и верхний бейнит, которые получают, соответственно, при более низких (в интервале 280 – 350 °С) и более высоких (350 – 450 °С) температурах изотермической выдержки.

Детали со структурой нижнего бейнита обладают максимальными прочностью, твёрдостью и износостойкостью при хорошей ударной вязкости и относительном удлинении, а детали со структурой верхнего бейнита – высокой прочностью наряду с высокими ударной вязкостью и относительным удлинением. Диапазон механических свойств аустенитно-бейнитных чугунов со структурой нижнего и верхнего бейнита приведён в таблице 1.

Таблица 1

Некоторые механические свойства чугуна с аустенитно-бейнитной структурой [17].

Тип микроструктуры бейнита в чугуне	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость, HRC	Ударная вязкость, МДж
Нижний бейнит	1100–1500	1–4	42–48	0,2–0,5
Верхний бейнит	800–1200	3–10	36–45	0,2–0,4

Особенностями бейнитного превращения являются мартенситный механизм $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода с перераспределением углерода по диффузионному механизму.

Возможны два способа получения чугунов с аустенитно-бейнитной структурой [17]:

1) в литом состоянии за счёт индивидуально подобранного легирующего комплекса, а также конструкции отливки и технологии литья;

2) в результате термической обработки литых заготовок.

По первому способу целесообразно изготавливать детали массового производства, не требующие механической обработки. При этом дополнительные затраты на разработку конструкции и технологии изготовления отливки, а также на дополнительное легирование такими элементами, как никель и молибден, компенсируются исключением затрат на достаточно сложную термическую обработку. Номенклатура таких отливок весьма ограничена. Более часто используют второй метод изготовления деталей из высокопрочных аустенито-бейнитных чугунов. При этом на стадии изготовления отливки необходимо правильно подобрать химический состав и технологические параметры для получения в литой заготовке оптимальной структуры с точки зрения механической и термической обработки.

Самым важным для практики получения ответственных изделий является то, что, изменяя соотношение бейнита и аустенита в структуре чугуна, можно получать сочетание одновременно высокой прочности с повышенной пластичностью. Кроме того, дополнительно используя горячую пластическую деформацию литой заготовки, можно повысить прочность материала до 1700–1900 МПа [21].

Достижимые высокие показатели свойств позволили использовать бейнитный чугун для изготовления весьма ответственных изделий, заменяя при этом сталь. В частности, уже к 80-м годам прошлого века относятся первые упоминания об использовании бейнитного чугуна для зубчатых колес [22–24]. После того, как на опытных образ-

цах были достигнуты значения предела прочности при растяжении на уровне 1500 МПа и относительного удлинения до 10 %, началось широкое освоение высокопрочного бейнитного чугуна для ответственных изделий. В настоящее время в промышленных масштабах выпускаются (в частности, фирмами «General Motors» и «Ford») сотни типоразмеров деталей, причем за рубежом наиболее массовыми изделиями являются зубчатые колеса [25].

Активнейшим образом велись работы по освоению изделий из бейнитного чугуна в России, в частности, на автомобильных заводах ВАЗ [26] и КамАЗ. Большое внимание внедрению бейнитного чугуна уделял директор КамАЗа Н.И. Бех [27–29]. В России была разработана комплексная программа «Разработка и внедрение аустенитно-бейнитных чугунов с шаровидным графитом и технологии получения из них литых деталей в автомобилестроении», участниками которой являются АО «КамАЗ», НХМА «Авангард» (Москва), НТКЦ «САНТОКАМ» (С-Петербург), ЦНИИ Материалов (С-Петербург) и другие – всего 25 организаций. Следует отметить, что в настоящее время это направление продолжает активно развиваться, о чем свидетельствуют последние публикации [15, 16, 30, 31].

Авторами данной статьи, с использованием сложившегося мирового опыта, была сделана попытка применить бейнитный чугун к условиям литейного производства Минского автомобильного завода при изготовлении средних и крупных зубчатых колес. Работу выполняли в рамках заданий двух государственных научно-технической программ (ГНТП): 1) «Технологии», задание № 1.03 «Разработать и освоить литейную и литейно-деформационную технологии изготовления зубчатых колес из бейнитного чугуна» и 2) «Белавотракторостроение», задание № АТ-01.08.07 «Разработать опытно-промышленную технологию изготовления конических шестерен трансмиссии автомобиля МАЗ из бейнитного чугуна». Научным руководителем заданий являлась к.т.н. Дудецкая Л.Р., исполнителем

– Покровский А.И. Большую помощь в выполнении работ оказали главный инженер МАЗа Гаухштейн И.С. и начальник ЦЗЛ Гурченко П.С. Немаловажным оказалось и то, что МАЗ на тот момент был заинтересован иметь в своем распоряжении импортозамещающую технологию, основанную на механической обработке проката легированной стали 20ХНЗА, поставляемого из Российской Федерации.

Технологию отработывали на шестернях дифференциала заднего моста автомобиля МАЗ 5336: шестерни полуоси (№ 5336-2402050) и сателлита (№ 5336-2402055). Было установлено следующее:

1. Доказана технологическая возможность применения водовоздушной закалки чугуновых заготовок для получения деталей с бейнитной структурой. Это было достаточно важно в условиях МАЗа, располагающего соответствующим оборудованием.

2. Производственные испытания опытных и опытно-промышленных партий штампованных шестерен из чугуна показали, что их прочностные показатели повышаются до уровня легированных сталей (1200 МПа и более), а уровень шума при работе зубчатой пары снижается на 2–4 дБ [37], что крайне важно для соответствия современным европейским нормам ЕЭК ООН, предъявляемым к автомобильной технике.

3. Применение горячей пластической деформации чугуновой заготовки в составе технологического процесса способствует устранению литейных дефектов, дальнейшему повышению механических свойств [32–35] и изменяет кинетику бейнитного превращения. Особенностью сплава с наложением пластической деформации является возможность формирования бейнитной структуры в низколегированном чугуне [36].

Эффективность предложенной технологии при замене стали на литой или деформированный чугун заключалась в следующем: 1) Экономия импортруемого проката стали 20ХНЗА, достигающая по детали «сателлит» 200 тонн на всю программу; 2) Снижение массы деталей на 9 % за счет меньшей плотности чугуна по сравнению со сталью, что позволяло облегчить каждую шестерню на 700 г; 3) Снижение затрат на термическую обработку за счет устранения цементации; 4) Уменьшение трудоемкости механической обработки и расхода инструмента за счет получения более точной заготовки и лучшей обрабатываемости чугуна. Предполагаемый экономический эффект от внедрения новой технологии при изготовлении годовой программы зубчатой пары

сателлитов дифференциала составлял 442400 долларов США.

В качестве следующего этапа работы в рамках ГНТП «Белавтогортростроение» для шестерен главной передачи автомобиля МАЗ 5551 с повышенными массогабаритными характеристиками (диаметр более 300 мм, вес более 13 кг: ведущей (№ 5551-2402017) и ведомой (№ 5551-2402060) были разработаны литейно-деформационные технологии изготовления деталей и предложен состав бейнитного чугуна взамен импортруемого легированного стального проката.

Технологию реализовывали на производственных площадях МАЗа. Первоначально была разработана опытная технология плавки и разливки высокопрочного чугуна в объеме 300 кг. Литые заготовки передавали в цех редукторов МАЗа, где производили их предварительную и окончательную механическую обработку. Обработанные детали подвергали изотермической закалке на термическом участке инструментально-штампового производства МАЗа, после чего проходили производственные испытания в собственном испытательном центре. По результатам испытаний провели корректировку технологии. На следующем этапе работ была разработана опытно-промышленная технология изготовления зубчатых колес. Она включала выплавку высокопрочного чугуна в 3-хтонной печи, предварительную термообработку, горячую пластическую деформацию, предварительную и окончательную механическую обработку на автоматических линиях, изотермическую закалку в соляных ваннах, притирку зубьев и шлифовку.

Стендовые испытания на специальной установке в испытательном центре МАЗа заключались в том, что одну из шестерен зубчатой пары закрепляли жестко, а вторую, находящуюся с ней в зацеплении, плавно вращали с очень малой скоростью. При определенном угле закручивания происходило разрушение одной из деталей. Результаты испытаний шестерен на прочность при кручении показали следующее. У шестерен из литого чугуна значения максимального крутящего момента невелики, разрушение происходило при 15,2 кН·м, а угол закручивания составлял всего 7 градусов. У серийных стальных (20ХНЗА) и чугуновых изотермически закаленных шестерен величины крутящего момента, при котором происходило разрушение, сопоставимы (для стальных – 26,0–29,0 кН·м, для чугуновых – 26,4–26,8 кН·м). Значения углов закручивания, соответствующих максимальному крутя-

шему моменту, отличаются друг от друга. Для стальных шестерен эти величины соответствуют 19–23°, для чугуновых – 28–38°, то есть чугуновые шестерни оказались гораздо более пластичными.

Таким образом, исследования подтвердили известные данные об эффективности применения бейнитного чугуна для изготовления шестерен. Кроме того, полученные результаты имели определенную новизну. В частности, впервые была исследована специфика получения бейнитной структуры у низколегированного ковкого чугуна, доказана возможность его использования для изготовления шестерен, показана эффективность применения горячей пластической деформации для улучшения свойств чугуновых изделий.

Подобные работы в Беларуси проводились и в более поздний период (2006–2010 гг.) на ПО «Гомсельмаш» под руководством главного инженера Н.В. Псыркова применительно к шестерням редукторов. Разработаны состав бейнитного чугуна с повышенной пластичностью и сопротивлением усталости [38] и технология изготовления из него крупногабаритных зубчатых колес для бортовых редукторов комбайнов. В 2011–2012 гг. изготовлены опытные партии зубчатых колес из высокопрочного чугуна и начаты их эксплуатационные испытания [39]. На «Гомсельмаше» с 2011 г. активно используют бейнитный чугун не только как конструкционный, но и как материал для ножей режущих барабанов кормоуборочных комбайнов, при этом обеспечивается требуемая эксплуатационная стойкость [39].

Железнодорожные рельсы из чугуна – что это: новые перспективы или многие проблемы

После рассмотрения результатов использования бейнитного чугуна при изготовлении машиностроительных деталей имеет смысл перейти к существу вопроса о целесообразности выдвинутого предложения [40] об изготовлении из чугуна таких ответственных изделий, как железнодорожные рельсы.

Общеизвестна сегодняшняя сложившаяся ситуация – рельсы изготавливают из стали. Но какие же все-таки материалы являются оптимальными для изготовления рельсов?

Чтобы понять, перспективна ли замена материала рельсов на чугун, или она принесет только проблемы, необходимо совершить небольшой исторический экскурс. Известно ироничное выражение «забегать впереди паровоза» но, тем не менее, абсолютно достоверным является факт, что как раз рельсы появились гораздо раньше

паровоза. Одним из предшественников рельсового пути был древнегреческий диолк – каменная дорога – волок для перевозки кораблей через Коринфский перешеек. И форму тогда рельс имел совсем не теперешнюю, возвышающуюся над поверхностью земли. В качестве направляющих служили глубокие желоба, в которые помещали полозья, смазанные жиром.

В виде направляющих, расположенных над поверхностью земли, рельсы, как элемент колесных дорог, вероятно, появились в рудниках и угольных шахтах. Первые упоминания о них относятся к середине XVI века (рис. 1).



Рис. 1. Лежневая дорога в средневековой шахте. Гравюра из книги «Космография». Германия, 1550 год

То, что мы теперь называем рельсами, представляло собой в то время деревянные бревна или брусья – лежни. По таким путям передвигались тележки (вагонетки). Затем стали укладывать лежни, которые имели скругленную форму, а на колёсах тележек появились желоба (рис. 2).

Сход тележек с лежневой дороги предотвращал направляющий стержень, укрепленный в нижней части тележки и входивший в промежуток между лежнями. Первоначально тележки перемещали вручную, позднее стали впрягать лошадь, лежни не только служили направляющими, но и воспринимали основную нагрузку. По такому колесному пути лошадь могла везти груз в 4 раза больший, чем по обыкновенной грунтовой дороге. В XI–XIV веках лежневые дороги были уже на многих рудниках и шахтах, использовались при строительстве военных укреплений.

Однако деревянные лежни быстро изнашивались и ломались. Что бы это исправить, вначале поверх лежней набивали доски. Затем, чтобы уменьшить износ деревянных рельсов, их укрепляли железными или чугунными полосами.

1767 год – первая и очень важная веха, касающаяся применения чугуна для изготовления рельсов. На железоделательном заводе в г. Коулброукдейле (Англия) излишний остаток плавки чугуна был отлит в виде пластин $11 \times 3,5$ см длиной 1,5 метра. В дальнейшем эти пластины укрепили поверх деревянных лежней (рис. 3).



Рис. 2. Деревянная вагонетка и лежни круглого сечения, связанные между собой поперечинами – прообразами современных шпал, а на колесах тележки имеются центрирующие желоба. Экспонат хранится в Немецком техническом музее



Рис. 3. Укрепленные поверх деревянных лежней чугунные пластины – прообраз современных стальных рельс (фото из [41])

Интересно, что первоначально данные заготовки рассматривались только как отходы плавки, их намеревались переплавить и продать. Однако выяснилось, что по такой чугунной полоске вагонетка катилась легче, что позволило предложить новое направление использования чугуна.

Первые цельные чугунные рельсы появились в начале 18-го века. Профиль рельса в то время был уголковым, а всю конструкцию тогда понимали как некий «монолит» – рельсы отлиты заодно с чугунными шпалами (рис. 4).

Чугунные рельсы были хрупкими и быстро изнашивались, их малая прочность послужила причиной неудач при испытаниях первого в мире рельсового паровоза Треветика [42]. На этом недолгий период изготовления рельсов из чугуна заканчивается. Изобретение в конце 18-го века процесса пудлингования (преобразования чугуна в сварочное железо) позволило удешевить технологию.

Дальнейший прогресс в технологии производства рельсов выразился в замене чугуна сталью, которая с 1803 года начинает безраздельно царствовать во всем мире в качестве материала для рельсов. Рельсы из сварочного железа впервые применил в Англии инженер Никсон в 1803 г., а к 1820 г. в Англии было освоено производство железных рельсов. Нужно заметить, что это было не цельно-металлическое изделие. В то время все профили катали из пакетов пудлингового железа и в готовом рельсе насчитывалось до 20-ти слоев железа [42].



Рис. 4. Сохранившиеся фрагменты чугунных рельсов на территории Александровского пушечного завода (основан в 1788 г.) в г. Петрозаводске (в наст. время «Онежский тракторный завод»). Рельсовый путь длиной 173,5 м связывал доменный, сверильный и расточный цеха. Ширина колеи тогда составляла 0,8 м. Заметно, что профиль рельса в то время был уголковым, а всю конструкцию понимали как некий «монолит» – рельсы отлиты заодно с чугунными шпалами

Первый мощный трехвалковый стан для прокатки стальных рельсов сконструировали в США в 1857 г. Массовое применение прокатки стальных рельсов из более качественной бессемеровской стали началось с 1865 г. [42] Такие рельсы были значительно прочнее сварных. Можно сказать, что изготовление рельсов прокаткой и вывело этот метод в число главных при обработке металлов давлением.

Представления об оптимальной конструкции рельсов, геометрии их профиля, структуре и свойствах рельсовой стали сложились к 1870 году [43, 44] и отражены во многих руководящих документах того времени. Например, в документе, утвержденном Министром путей сообщения России, говорится о новых стальных рельсах типа 24½ фунтов в погонном футе, которые «представляются следующими заводами:

1) рельсы типа 24½ фунтов в погонном футе пятью заводами: Демидовским, Донецким, Новороссийским, Русский Провиданс и Александровским Южно-Российским Брянского Акционерного Общества;

2) рельсы типа 22½ фунтов в погонном футе шестью заводами: Демидовским, Донецким, Новороссийским, Русский Провиданс, Таганрогским и Александровским Южно-Российским Брянского Акционерного Общества».

Следует отметить, что стандартизации и безопасности железнодорожного движения в государстве Российском уделялось огромное внимание. В 1884 при царе Александре 2-м под руководством известного государственного деятеля, тогдашнего министра путей сообщения и финансов Сергея Юльевича Витте была создана специальная Рельсовая комиссия, для соблюдения стандартов качества. В свое время ее возглавляли известный ученый-металлург, член-корреспондент АН СССР В.Е. Грум-Гржимайло и академик И.П. Бардин. Рельсовая комиссия – совершенно уникальное сообщество железнодорожников, металлургов и ученых многих отраслей народного хозяйства, поскольку отвечает за безопасность движения, наделена огромными полномочиями, о ее важнейшей роли в государстве говорит тот факт, что она пережила все революции и перестройки.

На сегодняшний день общие требования к рельсам определяются межгосударственным стандартом «Рельсы железнодорожные» [45]. Что касается материала рельсов, ГОСТ обязывает изготавливать их из спокойной стали мартеновского, конвертерного или электросталеплавильного производства.

К настоящему времени сформировались следующие совершенно определенные тенденции совершенствования структуры стальных рельсов:

а) максимальное устранение неметаллических включений [45];

б) формирование однородной и максимально дисперсной структуры тонкопластинчатого перлита. В частности, межпластиночное расстояние в перлите достигло предельно возможных на сегодняшний день значений 0,08 – 0,12 мкм.

Такая структура обеспечивается химическим составом стали с повышенным содержанием углерода, близким к эвтектоидным значениям (0,8 %), легированием марганцем (около 1 %), а также хромом, никелем, медью (по 0,2 %).

Современная технология плавки рельсовой стали нацелена на максимальное удаление примесей. Разливка рельсовой стали ведется только в автоматическом режиме контроля технологии и с обязательной выдачей паспорта плавки. Сложившаяся уникальная система предусматривает автоматическую отбраковку заготовок при нарушении технологических параметров разлива заготовки.

Технология прокатки рельсов помимо придания заготовке точной формы, обеспечивает глубокую и полную проработку литой структуры: уплотнение осевой зоны, закрытие и заварку усадочных пустот и несплошностей, возникших при кристаллизации металла, раздробление, благоприятное формообразование и ориентирование неметаллических включений и крупных дендритов. Важно отметить, что в заявляемом проекте изготовления рельсов из литого чугуна [40] такой глубокой проработки структуры не будет.

Технология термической обработки стальных рельсов на сегодня основывается на строго регламентированном быстром охлаждении, что обеспечивается сложившейся десятилетиями достаточно сложной инфраструктурой прокатного производства и автоматизированным оборудованием.

Программной статьей, обосновывающей перевод железнодорожных рельсов с материала «сталь» на материал «чугун» является публикация [40]. Остановимся подробнее на представленных в ней материалах.

Данные о высоких прочностных характеристиках бейнитного чугуна (достигнуты значения предела прочности до 1000–1400 МПа) можно признать вполне достоверными и совпадающими с общемировыми тенденциями. Однако на сегодняшний день они отнюдь не являются макси-

мальными. Достаточно сказать, что еще с 1991 г. стандарт одного из лидеров в производстве бейнитных чугунов – корпорации «Mechanite Worldwide» (Великобритания) заканчивается маркой K-12003 [2]. Для данной марки предусмотрен предел прочности не ниже 1200–1500 МПа при значениях относительного удлинения 3–5 %. Другой зарубежный стандарт («Общество чугуна с шаровидным графитом» (DIS, США) предусматривает марку ADI-6 с еще большими показателями ($\sigma_b=1585$ МПа и $\sigma_T=1240$ МПа.) [2].

Следует отметить, что программная публикация [40] по замене стальных рельсов на чугунные содержит всего лишь четыре литературных источника. Причем все они являются ссылками на работы самих же авторов и, к тому же не относятся к статьям в рецензируемых изданиях, а представляют собой тезисы докладов. Это нельзя признать достаточным, так как общее число публикаций в мире по бейнитным чугунам давно превысило тысячу.

В работе [40] используется устаревшая терминология. Авторы используют термин «сталистый чугун», при выплавке которого применяют металлическую шихту, содержащую стальной лом наряду с чушковым чугуном и чугуном возвратом (согласно толкового машиностроительного словаря). Но от термина «сталистый чугун» предлагали, (цитируем известный справочник [46]): «отказываться от употребления» еще в 1947 г. В современных справочниках [2, 47] этот термин вообще отсутствует.

Используемый авторами термин «молибденовый каркас» вообще никак не согласуется с существующими материаловедческими представлениями, т.к. многими публикациями еще в 70-е годы показано, что молибден в количестве 0,5 % (как у авторов проекта) полностью (разумеется, при условии качественной плавки) растворяется в аустените [48, 49]. Не подвергая сомнениям, достоверность полученных авторами данных, предложим им более реалистичное и достоверное объяснение. Вероятнее всего, обнаруженные флуктуации молибдена связаны с неполным растворением ферросплавов или недостаточным перемешиванием металла в печи, т.е. обусловлены некачественно проведенной плавкой.

Как положительный момент следует отметить, что состав высокопрочного чугуна, из которого предлагается изготавливать рельсы, защищен одним патентом Республики Беларусь [38]. Однако, для того, чтобы начинать такой крупный проект, необходимы заделы по приоритетам в десятки

патентов (на параметры литья и химические составы, на режимы термообработки, на оборудование).

Предлагаемая в [40] аббревиатура «ВЧТГ» создана так, что из-за игры слов (точнее букв), она стала очень созвучна с широко известной литейщикам аббревиатурой «ВЧШГ» (высокопрочный чугун с шаровидным графитом). Только авторы в данном случае буквой Г обозначают слово «Гомсельмаш». Выражаем сомнения, что стоило так «вплотную прижиматься» к известной марке, ведь это напоминает стиль подражания оригинальной обуви, когда вместо известной марки «Adidas», пишут и «Adibas» и «Abidas».

Предлагаемая авторами [40] аббревиатура высокопрочного чугуна «МОНИКУ» (на том основании, что он легирован элементами Mo, Ni, Cu), пожалуй, будет только мешать, т.к. она опять-таки весьма созвучна с уже известными «нимониками» – сплавами для газотурбинных двигателей. К тому же общепринятый принцип маркировки, основанный на условном обозначении, выраженном буквами и цифрами, показывающими примерный химический состав, и так имеет слишком много исключений. На сегодня в резолюции любой мало-мальски представительной научной конференции по чугунам и сталям записывают «избегать нестандартных маркировок».

Что касается главной идеи авторов [40] о замене стальных рельсов чугунными, несмотря на заманчивость устранения из технологической цепочки операции прокатки в случае производства литых чугунных рельсов, выскажем осторожные опасения в вероятности успешной реализации проекта.

Свою позицию обоснуем рядом указанных ниже аргументов, которые относятся как к микроструктуре и технологии, так к экономике и строительству.

1. Микроструктура чугунных рельсов

1.1 О включениях графита в структуре чугунных рельсов Мы уже описывали структуру стали, используемой для железнодорожных рельсов – чрезвычайно мелкая, однородная (практически без включений), равнопрочная, с очень малым расстоянием между пластинами перлита – примерно 0,1 мкм. Хотим еще раз акцентировать внимание на ключевые слова: «чрезвычайно мелкая, равнопрочная».

Что же мы наблюдаем в структуре чугуна? В структуре чугуна присутствуют крупные включения графита размером 50–100 мкм, что на три порядка больше, чем в стали. Причем структурные

составляющие чугуна весьма различаются между собой по прочности. Прочность графитных включений по отношению к бейнитной матрице в тысячи раз меньше, по сравнению с ней он является фактически пустотой. Поэтому в одной и той же детали эффективное сечение (сечение металлической матрицы, отвечающее за общую прочность), если ее изготавливать из стали – больше, а если из чугуна – меньше. То есть равнопрочная стали деталь из чугуна должно иметь большее сечение.

В структуре чугуна графитные включения могут располагаться по-разному. Разумеется, целью литейщиков является их равномерное распределение. Но в реальности так получается не всегда, что обусловлено множеством факторов: спецификой литейной формы, временем срабатывания и живучестью модификатора и др. Характерный пример расположения графитных включений в структуре высокопрочного чугуна приведен на рис. 5.

На такой протяженной детали как рельс (длина 25 метров) статистически неизбежно обнаружится место, где графитные включения будут располагаться неравномерно, сгруппируются или выстроятся в цепочку. Это приведет (если не на первом, то на десятом или сотом рельсе) к появлению трещин, последующему разрушению и аварии.

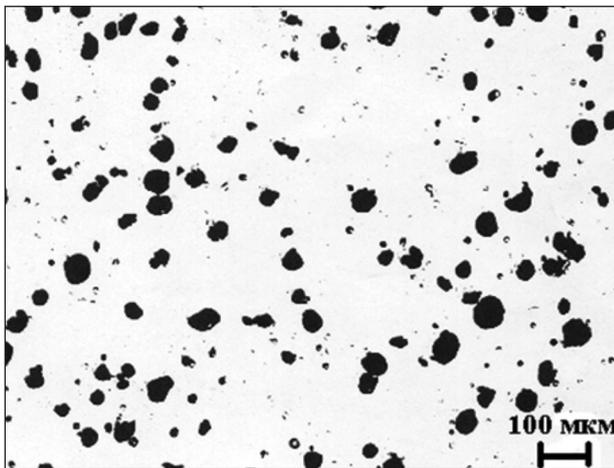


Рис. 5. Пример микроструктуры высокопрочного чугуна с шаровидными включениями. Не травлено. $\times 100$. Хорошо видны включения графита, попавшие в плоскость шлифа. На длинномерной детали статистически неизбежно появление неоднородных зон группирования графитных включений или их выстраивания в цепочку, провоцирующее развитие трещины

1.2. Дефекты и дефектоскопия рельсов В настоящее время большинство исследователей признает [50, 51], что трещина в рельсе возникает на базе инородных включений, микропустот, флокенов и развивается между ними.

Для изучения дефектов ученые изучают их макро- и микроструктуру, неметаллические включения, испытывают образцы при различных температурах. Но наиболее полную оценку качества рельсов дают полигонные испытания рельсов в условиях Экспериментального кольца на станции Щербинка (РФ). Полный реестр дефектов рельсов ведет зав. отделением конструкций железнодорожного пути ВНИИЖТа Л.Г. Крысанов. Под его руководством составлена классификация дефектов рельсов и каталог дефектов, насчитывающий десятки позиций. В своем выступлении на очередном совещании рельсовой комиссии [52] Л.Г. Крысанов рассказал, что рельсы отечественного производства выдерживают 500 млн. тонн пропущенного груза. Уровень отказов рельсов составляет 5 шт. на километр пути. Он назвал также основные дефекты рельсов, по которым их приходится демонтировать. У рельсов производства Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК) это поперечные трещины в головке (дефект 21), горизонтальное расслоение головки из-за наличия неметаллических включений (30 Г), отслоение и выкрашивание металла по поверхности катания в закаленном слое (при отсутствии наплавки, дефект 17). Дефекты 21 и 17 также наблюдаются у рельсов производства Кузнецкого металлургического комбината (КМК). Кроме того, встречается дефект 10 – отслоение и выкрашивание металла на поверхности катания головки из-за недостатков технологии. Специалистов особенно беспокоит наличие дефекта 17 (отслоение и выкрашивание), которое влечет за собой снижение скорости движения поездов.

Таким образом, вся сложившаяся дефектоскопия рельсов построена на максимальном выявлении инородных включений. Включения графита в чугуне будут распознаваться и трактоваться приборами как дефекты. Понадобится создание с нуля новой системы дефектоскопии.

1.3. О коэффициенте трения. Наличие в структуре чугунного рельса графитных включений, выходящих на его поверхность, будет способствовать улучшению смазывания при качении стальной колесной пары и, соответственно уменьшать коэффициент трения. Следовательно, тормозной путь поездов увеличится, что повлияет на всю организацию движения.

1.4. О металлической матрице чугуна. Еще одной проблемой, которую авторы проекта, не рассматривают, является то, что соотношение бейнита и аустенита в структуре чугуна железнодорожного рельса будет нестабильным по времени. По мере эксплуатации (воздействия на рельс колесной пары, а величины нагрузок при этом превышают 300 кН) остаточный аустенит будет постепенно распадаться. Это известный факт, на котором основаны упрочнение обкаткой роликами, а также дробеструйная обработка. Поэтому доля пластичной фазы, аустенита, в структуре будет постепенно уменьшаться и, соответственно, возрастет хрупкость рельсов.

1.5. О различии в значениях порога хладноломкости чугуна и стали. Известно, что повышение содержания углерода облегчает переход железоуглеродистых сплавов в хладноломкое состояние. В случае чугунных и стальных рельсов содержание углерода будет отличаться от 0,8 % у стали до примерно 3,6 % у чугуна. Считается, что каждые дополнительные 0,1 % С повышают температуру порога хладноломкости примерно на 20 °С. Это делает проблемным использование чугунных рельсов в северных климатических регионах.

1.6. О структуре сварного шва. Современные рельсы имеют длину не только 25 метров, широко используются сваренные из нескольких рельсов т.н. «плетей» длиной 120 метров. Сварка чугуна – отдельная проблема, обусловленная рядом факторов:

- высокой текучестью чугуна в жидком состоянии, вызывающей необходимость использования подформовки;
- сильным образованием газов в жидкой ванне, вызывающим пористость шва;
- высокой неравномерностью распределения температур при нагреве или охлаждении, вызывающем появление трещин в процессе сварки.

Но даже не технологические проблемы главное. Допустим, чугунные рельсы сварили, но из-за ускоренного охлаждения металла сварочной ванны полученный шов будет содержать совсем иную, не содержащую графита, отбеленную, очень хрупкую, ледебуритную структуру. Как известно, показатели ее пластичности практически равны нулю, о каком же динамическом воздействии в данной зоне и ее усталостной прочности тогда можно говорить?

2. Неучтенные особенности предполагаемой технологии изготовления чугунных рельсов. Рельс – длинномерная деталь, следовательно, его структура должна быть однородной, а свойства

должны быть гарантированно стабильными и одинаковыми по всей длине.

Аксиомой для литейщиков является то, что литой чугун характеризуется, во-первых, неизбежными литейными дефектами (поры, раковины), во-вторых, нестабильностью структурных характеристик по сечению (форма, размер и распределение графита).

И если структуру металлической матрицы после литья еще можно как-то исправить, выровнять термической обработкой, с графитными включениями так поступить невозможно: такими, какими они сформировались при отливке – такими и будут в готовой детали.

Например, Лидский литейно-механический завод изготавливает гильзы из чугуна для Заволжского моторного завода по давно отработанной технологии, но периодически имеет претензии из-за нестабильности структуры. Однородность и стабильность структуры чугуна – проблема даже для именитых фирм. Лидер в производстве поршневых колец «Goetze® Piston Rings» при производстве заготовки в виде втулки длиной порядка 400 мм вынужден выбрасывать в отходы срединную часть, т.к. в ней наблюдаются пористость и пониженные свойства. А в данном случае предполагается получать изделие в десятки метров длиной ..., каким же образом из него будут вырезать дефектные куски?

Во-вторых, где будут отливать такие длинномерные детали? Очевидно, что литье в песчаные формы не обеспечит стабильных и воспроизводимых результатов. Перспективны технологии и оборудование непрерывного литья. Но существуют ли в Беларуси отработанные технологии для серийного литья таких ответственных и длинномерных деталей или их нужно создавать с нуля? Как будут ликвидироваться типовые дефекты структуры непрерывного и полунепрерывного литья – места «неслитин», «неспаев», трещин, т.н. «линий отсечки» и др.?

В-третьих, важно заранее представлять, где будет проводиться термическая обработка рельсов? Для того, чтобы образовалась аустенито-бейнитная структура необходимо до начала изотермической выдержки не допустить мартенситного превращения. Обычно это обеспечивается за счет быстрого (секунды, десятки секунд) переноса изделия из печи в среду, обладающую повышенной теплоемкостью, чтобы быстро выровнять температуру по сечению. Как правило, для этого используют специальные термические ванны с расплавленной солью или селитрой. Где и как будет

происходить перенос 25-тиметровых деталей?

Возможной альтернативой ваннам могут быть ведущие сейчас за рубежом и в России разработки по автоматизированному управляемому охлаждению в газовой среде, а также водо-воздушному охлаждению (употребляют еще термины «спрейерное охлаждение» или «душирование»). При этом водо-воздушная смесь, содержащая капли воды заданной дисперсности, создается специальными устройствами и равномерно распределяется по поверхности охлаждаемого тела. Управление скоростью охлаждения обеспечивается за счёт изменения плотности орошения поверхности. Но реализуема ли такая технология для длинномерных изделий типа рельсов?

3. Возможные проблемы при строительстве рельсового завода. Если предполагается осуществить окупаемый проект изготовления чугунных рельсов, то прибыльную работу обеспечит только специализированное высокопроизводительное и массовое производство. На российском рельсовом «поле» давно сосуществуют два гиганта: Нижнетагильский и Кузнецкий металлургические комбинаты, между которыми всегда идет негласное соревнование за качество рельсов. В Беларуси литейное производство, например, МАЗа, или Гомсельмаша, совершенно несопоставимо с ними по мощностям, и маловероятно что, выполняя основные заказы, эти предприятия между делом смогут выпускать еще и рельсы.

Авторы проекта предлагают создать передвижной литейный завод, располагающийся непосредственно на железнодорожных платформах [40, с. 19]. Но как в этом случае осуществляется подвод электроэнергии, систем водоохлаждения печи, как решаются вопросы смесеприготовления, удаления отходов, экологии? Авторы

предлагают еще более экстравагантное решение – мобильный завод для литья чугунных рельсов на базе колесного тягача [40, с. 19]. Но к такому варианту размещения еще больше аналогичных вопросов.

Мы являемся сторонниками классического подхода к рельсовому производству и считаем, что если в Беларуси, да еще в период кризиса вообще стоит начинать заниматься массовыми производством рельсов (что крайне сомнительно), то необходим новый специализированный завод. Но строительство такого завода будет соизмеримо по масштабу и затратам со строительством атомной электростанции. Приведем для примера типичные примеры рельсовых производств – Нижнетагильский, Чусовской металлургический заводы, Кузнецкий металлургический комбинат, завод «Азовсталь». Они занимают площади, сопоставимые с полноценными городскими районами.

Свежий пример такого строительства «с нуля» – Актюбинский рельсобалочный завод [53], запущенный в Казахстане в сентябре 2015 года. Завод производит продукцию фасонного проката и стальные удлиненные термоупрочненные рельсы длиной 120 метров. Насколько огромны масштабы строительства можно представить из фотографий на рис. 6.

После запуска завода на предприятии работает более 700 человек. Отметим, что капитальное строительство завода – это лишь часть проекта, существенная доля затрат пришлась на оборудование и технологии, большинство которых импортные (рис. 7). Компания Siemens VAI обеспечивает подготовку специалистов, в частности материаловедов: 14 человек прошли обучение в Римском университете материаловедения, который действует в составе Siemens VAI.



Рис. 6. Монтаж оборудования в цехах Актюбинского рельсобалочного завода [53]



Рис. 7. Установленное на Актюбинском рельсобалочном заводе (Казахстан) оборудование компании Siemens VAI [53]

4. Экономические показатели производства рельс из чугуна.

Предположения авторов об удешевлении в 2 раза чугуновых рельсов по сравнению со стальными не являются убедительными т.к. необходимые расчеты не приведены. На практике в ряде случаев, производство чугуна оказывается дороже, чем стали. К тому же не учтена стоимость всего цикла термической обработки на бейнитную структуру (особенно изотермической выдержки). А она крайне затратная и энергоемкая. Для таких длинномерных деталей, как рельсы, необходимо специальное оборудование для аустенизации и изотермической выдержки. Это оборудование непрерывного цикла, постоянно потребляющее электроэнергию.

Нужно отметить, что в Российской Федерации именно по причине дороговизны технологии изотермической закалки так медленно происходит переход изготовления тяжело нагруженных рельсов из стали перлитного класса на сталь с бейнитной структурой.

Авторы проекта по выпуску чугуновых рельсов пока еще не начинали считать стоимость затрат. Так может и не стоит начинать, поскольку уже есть не только теоретический, но и реальный пример. В Казахстане (экономика которого будет посильней белорусской) стоимость проекта по строительству рельсового завода в 2015 году превысила 400 млн долларов. Важно отметить, что даже богатый Казахстан использовал в основном, не собственные средства, а до 70 % заемных.

Авторы утверждают, что белорусские чугуновые рельсы будут востребованы в Казахстане. Может быть, до 2015 года Казахстану и не хвата-

ло рельсов. Но в сентябре 2015 г. вступил в строй Актюбинский рельсобалочный завод (АРБЗ). Теперь Казахстан – третий в мире завод по прокатке длинномерных рельсов длиной до 120 метров. Причем используется прогрессивная технология фирмы Siemens дифференцированного упрочнения поверхности за счет закалки водовоздушной смесью.

О каком импорте Казахстаном белорусских рельсов теперь может идти речь? Ведь мощность АРБЗ составляет 430 тысяч тонн проката, из них 230 тысяч тонн именно высококачественных рельсов. И на сегодня в Казахстане не только полностью закрыта потребность в рельсах, но и начаты поставки на экспорт в Узбекистан и Туркменистан, ведутся переговоры с Беларусью. А мы им собираемся делать встречное предложение о продаже еще несуществующих чугуновых рельсов...?

5. Зарубежный опыт. Почему за рубежом не занимаются рельсами из чугуна?

И, наконец, почему за рубежом не проводят исследований по изготовлению рельсов из литого чугуна? Почему, если задать в интернете – поисковике: «rails made of cast iron» (железнодорожные рельсы из чугуна), обнаруживаются ссылки лишь на столетней давности исторические упоминания о чугуновых рельсах. Это при том, что данная тематика не является ни закрытой, ни секретной областью исследований. Если же для сравнения мы наберем в поисковике Google, к примеру: «gears of bainitic cast iron» (шестерни из бейнитного чугуна) – то можно обнаружить порядка ста семидесяти тысяч ссылок. Может надо сконцентрировать усилия именно на подобных направлениях?

Заключение

1. Высокопрочные чугуны с аустенито-бейнитной структурой – перспективный материал для изготовления ответственных машиностроительных изделий. Получаемые высокие характеристики позволят заменить чугуном сталь, экспортируемую из-за рубежа и использовать его при изготовлении широкого круга изделий.

2. Эти изделия могут быть высоконагруженными, достаточно массогабаритными, но компактными (под компактностью мы понимаем то, что они имеют размеры по всем трем осям координат близкие, или соотносимые между собой). Это, например, шестерни, гильзы, втулки. В условиях Беларуси, где по данным министерства промышленности насчитывается около 60 организаций, имеющих литейное производство, а большая часть машиностроительных предприятий располагает термическими цехами, высоко-

прочные бейнитные чугуны могут действительно составить существенную конкуренцию импортируемому стальному прокату.

3. Для координации работ по технологии и материаловедению высококачественных чугунов остро необходимо создание в Беларуси государственной программы научных исследований. В России, например, давно существует госпрограмма по бейнитному чугуну, объединяющая широкий круг исследователей с рядом таких крупных предприятий, как «КамАЗ». Комплексная программа в Беларуси должна включать разделы по централизованному определению типоразмеров подходящих для перевода на чугун деталей, литейное, технологическое и материаловедческое направления исследований, разработку соответствующих стандартов.

4. Идея совершенствования материала рельс возникла, вероятно, в связи с тем что, несмотря на кризисные явления в экономике, потребность в рельсах в странах СНГ в данное время возрастает. Например, стратегия транспортного развития России до 2030 года [54], предусматривает резкий рост железнодорожного покрытия территории РФ. Прогнозы экономистов говорят, что еще лет 200 у железных дорог не будет альтернативы в области транспорта. Автомобили, самолеты и корабли не смогут перевозить столько пассажиров и грузов, сколько железные дороги. И пока существуют железные дороги, инженеров-путейцев, металлургов, материаловедов будут волновать проблемы производства рельс и их эксплуатационные качества.

5. Но что касается длинномерных деталей, то использование чугуна для них, по-видимому, неэффективно, а для железнодорожных рельсов,

возможно и опасно.

6. Относясь с глубоким уважением к авторам проекта, выдвинувшим столь неординарное предложение, тем не менее, считаем, что вероятность успешной реализации проекта по переводу стальных железнодорожных рельсов на чугуны, невелика.

7. Все же было бы опрометчиво ставить на этом точку. Несмотря на кажущуюся стабильность, ситуация в конкурентной борьбе литого высокопрочного чугуна и стального проката весьма динамична. Пути развития техники не всегда очевидны и прогнозируемы. Приведем пример, показывающий, как даже специалисту – лидеру в своей области бывает трудно выполнить верный прогноз. Это пример не из металлургии, а из совсем другой области – компьютерной техники. Вот высказывание, которое кажется нам сегодня смешным: «Думаю, что весь мировой рынок компьютеров – это, может быть, пять экземпляров». А ведь эти слова произнес председатель совета директоров компании IBM Томас Уотсон, причем относительно недавно, в 1943 году [55].

8. Поэтому, не претендуя в данной публикации на истину в последней инстанции, было бы интересно услышать мнение о чугунных железнодорожных рельсах от широкого круга специалистов как в области литейной науки (например, ИТМ, БНТУ, БЕЛНИИЛИТ и других), так и представителей производства (директоров и главных металлургов предприятий), Белорусского общества литейщиков и металлургов (БелОЛиМ), Белорусского общества инженеров-механиков и, конечно, Всесоюзного научно исследовательского института железнодорожного транспорта.

При необходимости список использованных в статье источников можно узнать в редакции журнала