

УДК 621.78.669.13

Гогаев К. А.
Подрезов Ю. Н.
Волощенко С. М.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ БЕЙНИТНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ ДЛЯ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ

Несмотря на уникальные литейные свойства чугуна, долгое время воспользоваться этим преимуществом не удавалось, что было связано с низкими механическими характеристиками чугуна ввиду повышенной хрупкости из-за большого содержания углерода. Поэтому изделия из чугуна не выдерживали конкуренции стальным конструкциям. Во второй половине прошлого века были созданы чугуны нового поколения, среди которых высокопрочный бейнитный чугун с шаровидным графитом (БЧШГ), который по комплексу служебных свойств оказался конкурентоспособным по отношению к стальным изделиям, которые работают на износ. Одной из новых областей использования БЧШГ – это сменные орудия (лемеха, лапы культиваторов и др.) обработки почвы для сельскохозяйственной техники.

Процесс получения БЧШГ намного более сложный, чем в случае обычных чугунов. Технология получения необходимых служебных характеристик требует учета многих факторов, способных влиять на процесс структурообразования бейнита и остаточного аустенита. Бейнитный чугун следует рассматривать как сложный материаловедческий объект, конечная структура и свойства которого зависят от технологических условий на разных этапах изготовления изделий. Это особенно важно учитывать с позиции на то, что практическим следствием работы будет создание технологических условий для массового производства сменных деталей сельскохозяйственной техники.

При производстве БЧШГ особое внимание уделяется состоянию производства модификаторов. Модифицирование способствует образованию наиболее благоприятной формы и равномерного распределения графита. При этом в зависимости от характера воздействия на структуру чугуна элементы модификатора условно квалифицируются на графитизирующие, стабилизирующие и сфероидизирующие.

Основная цель графитизирующего модифицирования – увеличение количества зародышей графита. Основная идея сфероидизирующего модифицирования – создать условия образования зародышей графита, у которых скорость роста при затвердевании чугуна одинакова во всех направлениях. Основным сфероидизатором является Mg, также Ca, В, иттрий, РЗМ цериевой группы. Надо отметить, что Ca имеет сродство к кислороду и сере. Поэтому при введении его в чугун оказывает раскисляющее и десульфуризирующее действие. Наиболее распространенной остается технология модифицирования чугуна в ковшах, которая является довольно простой, однако имеет существенные недостатки. Прежде всего, это относительно низкое и нестабильное усвоение модификатора, особенно магния, повышенное дымовыделение и пироэффект. Это касается кускового модификатора.

Для увеличения усвояемости модификатора стали использовать его в порошковом варианте. Однако большой проблемой оказалось формование этого модификатора, т.к. он представлял собой многокомпонентную порошковую систему, компоненты которой имеют разные характеристики пластичности.

Существующие многокомпонентные порошковые системы по отношению к их формовости рассматриваются как матричнонаполненные. Матрицу создают компоненты (порошки), материал которых при формовании находится в пластичном состоянии. В соответствии данными [1] многокомпонентные порошковые системы могут быть разделены на 3 группы: докритические (пластичных составляющих > 50 %), критические (~ 50 % трудноформуемых компонентов) и закритические (трудноформуемых составляющих > 50 %).

В составе модификатора, разработанного в ИПМ НАН Украины, который используется для модифицирования высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, входят Fe, Al, Mg, SiBa, SiCa, FeS, рефтокон, РЗМ. Все составляющие модификатора использовались в виде порошков и были разделены на 2 группы: на пластичные и хрупкие. К первой группе относятся алюминий, магний и железо, а к второй – силикокальций, силикобарий, ферросилиций, РЗМ и рефтокон. При этом использовались пластичные порошки промышленных марок, величина фракции которых составляла 160 – 400 мкм. Хрупкие порошки были получены размолом слитков (кроме рефтокона, который использовался в состоянии поставки) с фракционным составом от 100 до 3000 мкм, при этом фракции от 200 до 400 мкм составляла более 50 %. Был разработан состав модификатора КМК1: 7,5 % Mg, 35 % SiCa, 17 % Al, 9 % SiBa, 17,5 % Fe, 12 % рефтокон, 9 % РЗМ. Пластичные порошки в количестве 40,5 % образовали матрицу модификатора.

Затем были проведены модельные эксперименты систем Fe–FeSi и Al– FeSi при разных содержаниях хрупкой составляющей. Прессование этих систем производили с различными усилиями. При этом были получены цилиндрические образцы, которые подвергались диаметральному сжатию. Модельные испытания подтвердили одно из основных положений теории прессования и прокатки порошков о определяющей роли насыпной плотности (форма частиц) для получения качественных заготовок [2].

Для прокатки порошка использовали прокатный стан с горизонтальным расположением валков диаметром 500 мм. Скорость прокатки 1,5 м/мин. При гравитационной подаче порошка толщина полосы h_n связана с диаметром валков D формулой [1]:

$$h_n = \frac{\alpha^2 D}{2(\mu \cdot Z - 1)}, \quad (1)$$

где α – угол захвата порошка, в радианах;

μ – коэффициент удлинения, равный отношению скорости выхода полосы v_n к скорости подачи порошка $v_{пор}$;

Z – степень уплотнения, равная отношению плотности полосы ρ_n к плотности свободно насыпанного порошка $\rho_{нас}$.

Величина Z изменяется в интервале 2,05 – 2,38, т.е. для получения необходимой толщины полос, с учетом формулы (1) можно подобрать необходимый диаметр валков:

$$D = \frac{h_n}{(0,0080 \div 0,0052)}. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены свойства полос модификатора полученного на стане с валками \varnothing 500 мм.

Таблица 1

Характеристика полос модификатора КМК1

Толщина, мм	Плотность, г/см ³	Степень уплотнения, Z	Прочность на срез, МПа
4,46	2,01	2,05	5,66
3,38	2,19	2,23	9,90
3,18	2,29	2,34	18,33
2,88	2,33	2,38	17,76

Выбор химического состава чугуна определялся с одной стороны влиянием легирующих элементов на структурообразование в бейнитном чугуне с шаровидным графитом, с другой – формой и размерами деталей, а также условиями их нагружения. Для улучшения прокаливаемости были использованы Mo, Cu и Ni. Для сохранения оптимальных литейных свойств и прочности состав чугуна был принят таким: 3,2 – 3,4 % C; 1,4 – 1,6 % Si; 0,2 – 0,3 % Mn; 0,18 % Mo; 0,3 % Cu; 0,4 % Ni; Cr < 0,02 %; P < 0,02 %; S < 0,02 % остальное Fe.

В табл. 2 приведены свойства БЧШГ в литом состоянии модифицированного наиболее распространенными промышленными модификаторами, включая разработанный КМК1. Плавки осуществлялись в индукционных электропечах.

Таблица 2

Структура и механические свойства БЧШГ в литом состоянии,
модифицированного различными модификаторами

Используемые композиции модификатора	Структура чугуна		Механические свойства			
	ССГ, %	Феррит, %	σ_b , МПа	δ , %	НВ	КС, Дж/см ²
КМК1	90–93	42–55	641	4,4	210	75
ЖКМК4Р	85–88	30–40	620	3,6	217	79
Ni-Mg-Ce	87–90	20–25	635	3,4	220	71
Cu-Mg	82–85	45–55	561	2,7	270	53
ФСМг-7	82–55	45–55	534	3,1	205	65

Было установлено, что оптимальное соотношение прочности, пластичности и ударной вязкости демонстрирует модификатор КМК1. Структура полученного чугуна состоит из перлитно-ферритной смеси и шаровидного графита, при этом степень сфероидизации графита (табл.2) составляет 90 – 93%, что значительно выше, чем при использовании других модификаторов. Модификатор КМК1 хорошо усваивается, проявляет стабильное действие и обеспечивает получение БЧШГ без отбела (отсутствие в структуре первичной карбидной фазы).

Важнейшую роль в технологии производства литых деталей грунтообрабатывающей сельхозтехники из БЧШГ с использованием порошковых модификаторов играют режимы термической обработки, которые влияют на процесс структурообразования бейнита и остаточного аустенита. Результаты исследований показали, что оптимальная температура аустенизации – 890 ± 10 °С, поскольку при этой температуре происходит переход феррита в аустенит. При этом структура чугуна состоит из аустенита, следов феррита и шаровидного графита. Фазовый состав $A = 98$ %, $\Phi_{сл} = 2$ %.

В дальнейшем были проведены исследования по изотермической закалке при температурах 310 и 350 °С [3, 4], после которой основу металлической матрицы составляет бейнит (до 75 %), а также остаточный аустенит и шаровидный графит. Результаты механических испытаний указывают на то, что твердость несколько снижается при повышении температуры закалки, тогда как пластичность и ударная вязкость (до 15 %), трещиностойкость незначительно возрастают. Поэтому повышение температуры закалки способствует повышению служебных характеристик деталей, которые работают при ударных нагрузках.

Для исследования процесса износа была разработана оригинальная методика оценки триботехнических характеристик образцов из БЧШГ, которая моделирует условия эксплуатации деталей грунтообрабатывающей сельхозтехники для различных грунтов. В качестве абразивных сред использовали влажный и сухой песок, чернозем малогумусный и глина обычной влажности (10 %). Образцы имели размер 10x10x20 мм, и испытывались на скорости 3 м/с, что соответствовало скорости движения трактора 10 км/час. Удельное нагружение составляло 0,8 МПа (соответствует удельной нагрузки на лемех при вспашке). На рис. 1 представлены данные по износу для образцов из БЧШГ в сухом песке, которые свидетельствуют о значительных преимуществах образцов закаленных при 350 °С с выдержкой 2 – 3 часа по сравнению с другими режимами изотермической закалки. На рис. 2 приведены результаты сравнительных испытаний на износ образцов из БЧШГ после изотермической закалки при 350 °С (выдержкой 2 часа) и закаленной стали 65Г.

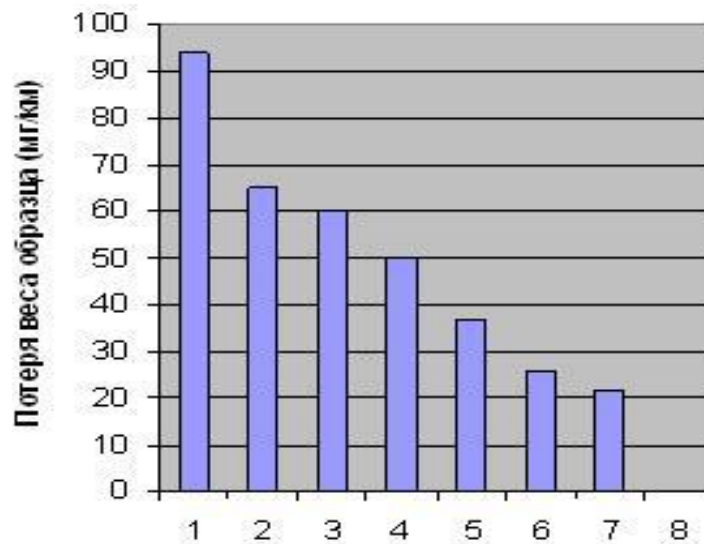


Рис. 1. Износостойкость образцов из БЧШГ в сухом овражном песке после различной изотермической закалки: 1 – температура нагрева 900 °С (30 мин). Закалка в масло с отпуском 320 °С (3 часа); 2 – температура нагрева 900 °С, 30 мин. Изотермическая закалка при температуре 310 °С (1 час). 3 – то же, выдержка 2 часа; 4 – то же, выдержка 3 часа; 5 – температура нагрева 900 °С (30 мин). Изотермическая закалка 350 °С, выдержка 1 час; 6 – то же, выдержка 2 часа; 7 – то же, выдержка 3 ч.

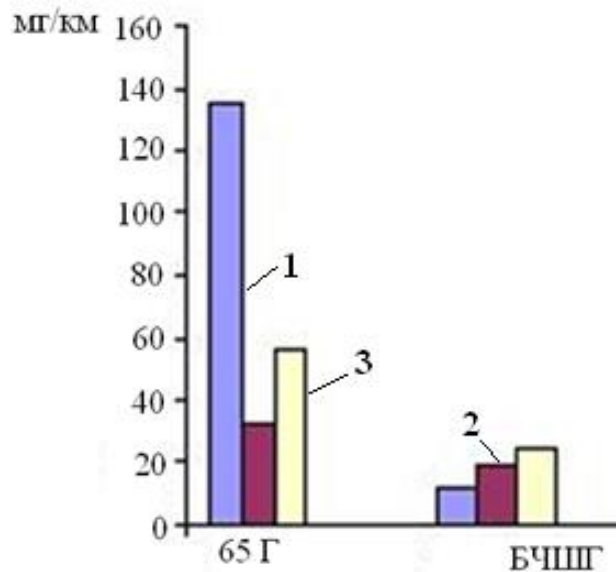


Рис. 2. Результаты сравнительных лабораторных триботехнических испытаний образцов из стали 65Г после термообработки и образцов из БЧШГ после закалки при температуре 350 °С и выдержки 120 мин: 1 – сухой овражный песок; 2 – глинистая почва увлажненная; 3 – овражный песок увлажненный

Ввиду того, что обычно твердость является косвенным показателем износостойкости, для определения механизма износа БЧШГ была определена твердость при индентировании с различными усилиями (табл. 3).

Таблица 3

Значения твердости от глубины внедрения индентора для БЧШГ закаленного при 350 °С

Усилия, г	10	20	50	100	200
Твердость, ГПа	8,7	8,5	8,0	6,5	5,5
Глубина, мкм	0,7	0,9	1,67	2,8	3,8

Данные, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о том, что поверхностный деформированный слой имеет размер ~ 2 мкм. Его твердость совпадает с твердостью полученной при идентификации нагрузкой 50 г. Она составляет 8,0 ГПа, что в 1,6 раза выше твердости матрицы. В связи с резким градиентом деформации твердость резко понижается с глубиной и при нагружении усилием 200 г на глубине 4 мкм она приближается к твердости матрицы.

Здесь надо отметить, что наиболее интересное физическое явление, которое характерно для бейнитных структур, состоит в превращении остаточного аустенита в мартенсит под действием деформации (TRIP – эффект, transformation induce plasticity). Результаты рентгеноструктурного анализа, выполненные на образцах из бейнитного чугуна, изотермически закаленных при температурах 310 и 350 °С с разным временем выдержки хорошо согласуется с этими представлениями. В структуре чугуна, закаленного при 350 °С с выдержкой 1 час, обнаружено 35 % остаточного аустенита. После 2 часов выдержки его количество составило 31 %, а при выдержки 3 часа понизилось до 27 %. Результаты исследований деформированных образцов показали, что после изотермической закалки при 350 °С пластическая деформация приводит к частичному распаду остаточного аустенита. При всех выдержках распадается примерно пятая часть от начального количества.

Такое незначительное количество материала подвергающееся превращению в мартенсит существенно влияет на процесс деформационного упрочнения, поскольку такой переход сопровождается значительным изменением объема. В широко известных TRIP – сталях изменение остаточного аустенита от 10 до 8 % приводит к практическому трехкратному упрочнению стали в диапазоне деформации 0 – 10 % [5].

У образцов, подвергнутых изотермической закалке при 310 °С превращение аустенита в мартенсит под действием деформации не происходит.

Обнаруженный частичный распад аустенита под действием деформации является, очевидно, значимым для повышения интенсивности упрочнения. Для этого подтверждения были приведены исследования. Поскольку при испытаниях на растяжение возможности изучения деформационного упрочнения ограничены в виду малой пластической деформации до разрушения, были проведены исследования на одноосное сжатие. При этом образцы закаленные при 350 °С продемонстрировали аномально высокую скорость упрочнения (табл. 4). Так при увеличении пластичной деформации от 0 до 0,2 напряжение увеличивается от 1000 до 2200 МПа при этом средняя скорость упрочнения достигает 6000 МПа. У образцов закаленных при 310 °С скорость упрочнения значительно ниже. При увеличении деформации от 0 до 0,35 напряжение увеличивается от 1200 до 2200 МПа, что соответствует средней скорости упрочнения 3000 МПа. Для подтверждения этого механизма был изучен похожий физический эффект – формирование зоны процесса дефектообразования в пластической области у вершины подвижной трещины вследствие градиента деформации. Для этого с помощью сканирующего микроскопа была изучена пластичная зона вблизи трещин на образцах бейнитного чугуна, который подвергался разной изотермической закалке и испытанию на трещиностойкость. Эти исследования показали, что мартенситное превращение в приповерхностном слое бейнитного чугуна, закаленного на 350 °С способствует резкому увеличению его износостойкости как за счет упрочнения поверхностного слоя, так и вследствие уменьшения склонности к образованию трещин.

Таблица 4

Скорость упрочнения				
$T_{\text{зак}}$	ϵ	σ_0 , МПа	σ_1 , МПа	Скорость упрочнения, МПа
310	0–0,35	1200	2200	3000
350	0–0,2	1000	2200	6000

Наши расчеты показывают, что с учетом скорости движения современной сельхозтехники упрочненный слой 2 мкм будет изношен за 5 сек. Поскольку мартенситное превращение происходит по сдвиговому механизму со скоростью, которая приближается к скорости

звука, за это время на смену изношенному слою образуется новый упрочненный слой повышенной износостойкостью. Режим изотермической закалки 350 °С был использован при закалках лемехов, т.к. все модельные испытания на износ проводились при удельных нагрузках 0,8 МПа, что соответствует нагрузке на лемех при работе.

В современных экологически чистых технологиях обработки почвы большое внимание уделяют культивации. При этом виде сельхозработ характерна значительно меньшая глубина переработки земли, которая требует значительно меньших усилий. Расчетные данные свидетельствуют о том, на лапу культиватора воздействует удельное давление 0,2 МПа. Образцы подвергались изотермической закалке при температурах 300, 320, 350 °С. Здесь надо отметить, что износостойкость высокопрочного чугуна с шаровидным графитом после разных режимов закалки в диапазоне температур 300–350°С при всех исследуемых выдержках практически не отличаются и с научной точки зрения указывают на состояние базового механизма, который отвечает за повышенную износостойкость. На первый план выходят механизмы шаржирования твердыми частицами и смазка поверхности трения графитом.

Использование БЧШГ повышает износостойкость навесных орудий сельхозтехники по сравнению с стальными штампованными, которые в настоящее время используются у нас в стране и за рубежом. Вместе с этим следует отметить, что литейные технологии позволяют изменить форму сельхозорудия, учитывая информацию о характере износа изделий при этом значительно улучшить форму и качество рабочих поверхностей. Нами были разработаны и изготовлены новые конструкции лемехов и лап культиваторов. В таблице 5 представлена динамика износа лап культиваторов новой конструкции из БЧШГ в сравнении из стальными отечественными из стали 65Г.

Таблица 5

Динамика износа лап культиваторов в зависимости от материала и наработки в глинисто-черноземном грунте

Лапы культиватора материал	Масса до начала испытаний, г	Масса после испытаний, г	Износ по массе		Наработка лапы в га	Относительный износ на 1 га в г
			г	%		
БЧШГ	1320	1286,7	33,3	2,52	90	0,37
БЧШГ	1350	1312,2	37,8	2,8	90	0,42
БЧШГ	1310	1266,8	43,2	3,33	90	0,48
БЧШГ	1370	1325,0	45,0	3,28	90	0,50
БЧШГ	1380	1335,9	44,1	3,19	90	0,49
БЧШГ	1360	1315,0	45,0	3,3	90	0,50
серийный	1150	1020,0	130,0	11,3	21	6,19
серийный	1145	1005,0	140,0	12,2	25	5,60
серийный	1152	1010,0	142,0	12,3	22	6,45

Данная таблица свидетельствует о том, что после наработки от 21 до 25 га на одну лапу стальных вышли из строя. Лапы из БЧШГ после наработки 90 га продолжают эксплуатироваться.

Полевые испытания сельхозорудий, изготовленных из БЧШГ, прошли испытания в хозяйствах Киевской, Черкасской, Одесской и Полтавской областях. Стойкость лемехов, изготовленных по разработанной технологией с использованием прокатных порошковых модификаторов в 3 – 5 раз, а лап культиваторов в 5 – 7 раз выше по сравнению с отечественными аналогами. В сравнении с зарубежными аналогами стойкость в 1,5 – 3 раза выше. Настоящее время инструмент с БЧШГ используется в крупных хозяйствах, таких как «Агроэколо-

гия» и агрохолдинг «АСТАРТА» Шишацкого района, Полтавской области. Ведутся работы по внедрению грунтообрабатывающего инструмента из БЧШГ в крупные агрохолдинги Украины.

ВЫВОДЫ

1. Для обеспечения получения структуры металлической основы в тонких сечениях без отбела на основании проведенных исследований оптимизированы составы базового чугуна и модификатора.
2. Разработана технология получения модификаторов достаточно высокой прочности методом прокатки порошковых смесей.
3. Распад остаточного аустенита под действием деформации – основная причина повышения износостойкости чугуна, подвергнутого изотермической закалки при температуре 350 °С с выдержкой 2 – 3 часа.
4. Разработанная технология производства литых деталей для почвообрабатывающей сельхозтехники обеспечивает повышения их стойкости в сравнении с отечественными и зарубежными стальными аналогами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гогаев К.А. *Формование порошковых систем* / К.А. Гогаев, А.К. Радченко. – Донецк: Ноулидж, 2011. – 478 с.
2. Найдек В.Л. *Бейнитный высокопрочный чугун* / В.Л. Найдек, В.П. Гаврилюк, И.Г. Неижко. – К., 2008. – 140 с.
3. Гогаев К.А. *Особенности термообработки деталей навесного оборудования для сельхозтехники* / К.А. Гогаев, С.М. Волощенко // В кн.: *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. Цільова комплексна програма НАН України*. – Київ, 2012. – С. 464–468.
4. Гогаев К.О. *Бейнітний чавун для швидкозношуваних змінних деталей сільгосптехніки* / К.О. Гогаев, С.М. Волощенко // *Вісник Національної академії наук України*. – 2015. – № 9. – С. 64–68.
5. *Mechanical stability of individual austenite grains in TRIP steel studied by synchrotron X-ray diffraction during tensile loading* / R. Blonde, E. Limenez-Melezo, L. Zhco, J.P. Wright, E. Bruck Van der Zwaag S., Van Dijk N.A. // *Materials Science Engineering*. – 2014. – A 618. – P. 280–287.

REFERENCES

1. Gogaev K.A. *Formovanie poroshkovykh sistem* / K.A. Gogaev, A.K. Radchenko. – Doneck: Noulidzh, 2011. – 478 s.
2. Najdek V.L. *Bejnitnyj vysokoprochnyj chugun* / V.L. Najdek, V.P. Gavriljuk, I.G. Neizhko. – K., 2008. – 140 s.
3. Gogaev K.A. *Osobennosti termoobrabotki detalej navesnogo oborudovanija dlja sel'hoztehniki* / K.A. Gogaev, S.M. Voloshhenko // V kn.: *Problemi resursu i bezpeki ekspluatatsii konstrukcij, sporud ta mashin. Cil'ova kompleksna programa NAN Ukraini*. – Kiiiv, 2012. – S. 464–468.
4. Gogaev K.O. *Bejnitnij chavun dlja shvidkoznozhuvanih zminnih detalej sil'gosp'techniki* / K.O. Gogaev, S.M. Voloshhenko // *Visnik Nacional'noi akademii nauk Ukraini*. – 2015. – № 9. – S. 64–68.
5. *Mechanical stability of individual austenite grains in TRIP steel studied by synchrotron X-ray diffraction during tensile loading* / R. Blonde, E. Limenez-Melezo, L. Zhco, J.P. Wright, E. Bruck Van der Zwaag S., Van Dijk N.A. // *Materials Science Engineering*. – 2014. – A 618. – P. 280–287.

Гогаев К. А. – чл.-корр. НАН Украины, д-р техн. наук, проф., зав. отделом ИПМ НАН Украины

Подрезов Ю. Н. – д-р физ.-мат. наук, зав. отд. ИПМ НАН Украины

Волощенко С. М. – канд. техн. наук, ст. научн. сотр. ИПМ НАН Украины

ИПМ НАН Украины – Институт проблем материаловедения НАН Украины, г. Киев.

E-mail: TOC@ipms.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 10.03.2017 г.