ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(Кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства)

№ 9 сентябрь 2010

Председатель редакционного совета и Главный редактор
СЕМЁНОВ Е.И.

Зам. председателя редакционного совета:
ДЁМИН В.А.
КОЛЕСНИКОВ А.Г.

Зам. Главного редактора:
КЛЕЙЗЕР П.Е.
СЕРИКОВА Е.А.

Редакционный совет:
БЕЛЯКОВ А.И.
БЛАНТЕР М.С.
БОГАТОВ А.А.
БОКОВ А.А.
ГАРИБОВ Г.С.
ГРОМОВ В.Е.
ГУН И.Г.
ЕВСЮКОВ С.А.
ЖЕСТКОВА И.Н.
ЗАРУБИН А.М.
КАПУСТИН А.И.
КАСАТКИН Н.И.
КОШЕЛЕВ О.С.
КРУК А.Т.
МОРОЗ Б.С.
МУРАТОВ В.С.
НАЗАРЯН Э.А.
ОВЧИННИКОВ В.В.
ПАСЕЧНИК Н.В.
ПОВАРОВА К.Б.
ПОЛЕТАЕВ В.А.
СЕМЁНОВ Б.И.
СУБИЧ В.Н.
ТРЕГУБОВ В.И.
ШАТУЛЬСКИЙ А.А.
ШЕРКУНОВ В.Г.
ЯКОВЛЕВ С.С.
ЯМПОЛЬСКИЙ В.М.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
ДЮБКОВА Н.В.
СЕРИКОВА Е.А.
МАКАРЕНКО Е.Д.
СУРОВ И.Е.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу агентства "Роспечать" **81580**, по Объединенному каталогу "Пресса России" **39205**, по каталогу "Почта России" **60261**) или непосредственно в издательстве.

Тел.: (499) 268-47-19, 268-69-19
Факс: (499) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Литейное и сварочное производства

Джованни Маццарелли, Джузеппе Маццарелли, Беляков А.И., Сайфаев С.Г., Беляков. А.А. 10 лет литейному производству ООО "МеталЛитМаш" . . . 3

Беляков А.И., Егоркина Н.Д., Алексеев А.П. Производство массивных отливок из чугуна с шаровидным графитом . . . 8

Куликов В.И., Беляков А.И., Аксёнова Л.И. Анализ состояния чугунных элементов насосов после 50-летней эксплуатации на канале им. Москвы . . . 14

Ткаченко С.С., Кривицкий В.С. Станкостроение и модернизация литейного производства . . . 22

Муравьёв В.И., Ким В.А., Аксёнов А.В. Автоматическая аргонодуговая сварка труб из алюминиевого сплава АМг3М . . . 26

Кузнечно-штамповочное производство

Медведев И.П., Крук А.Т. Оптимизация технологических решений по обеспечению точности крупных поковок . . . 30

Прокатно-волочильное производство

Волков К.В., Марьин Б.Н., Ким В.А., Евстигнеев А.И., Новикова Т.В., Марьин С.Б., Шпорт В.И. Влияние интенсификации многоручьевой прокатки на структуру и свойства металла . . . 36

Материаловедение и новые материалы

Беляков А.И., Беляков А.А. Структура, физико-механические, технологические свойства и области применения хромосодержащих чугунов . . . 40

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Журнал выходит при содействии:
Академии Проблем Качества Российской Федерации; Министерства образования и науки Российской Федерации; Воронежского завода тяжелых механических прессов; ЦНИИЧермет; ВНИИМЕТМАШ; ИМЕТ РАН; Каширского завода "Центролит"; АМУРМЕТМАШ; ООО "МЕТАЛЛИТМАШ"; ФГУП ГНПП "Сплав"

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Заготовительные производства в машиностроении", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

© "Издательство "Машиностроение", "Заготовительные производства в машиностроении", 2010

SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

BLANKING PRODUCTIONS IN MECHANICAL ENGINEERING

(Forging and stamping, foundry and others productions)

№ 9 September 2010

Chairman of Editorial Committee and Editor-in-chief
SEMENOV E.I.

Chairman Assistants:
DEMIN V.A.
KOLESNIKOV A.G.

Editorial Assistants:
KLEYZER P.E.
SERIKOVA E.A.

Editorial Committee:
BELYAKOV A.I.
BLANTER M.S.
BOGATOV A.A.
BOKOV A.A.
GARIBOV G.S.
GROMOV V.E.
GUN I.G.
EVSYUKOV S.A.
ZHESTKOVA I.N.
ZARUBIN A.M.
KAPUSTIN A.I.
KASATKIN N.I.
KOSHELEV O.S.
CRUCK A.T.
MOROZ B.S.
MURATOV V.S.
NAZARYAN E.A.
OVCHINNIKOV V.V.
PASECHNIK N.V.
POVAROVA K.B.
POLETAEV V.A.
SEMENOV B.I.
SUBICH V.N.
TREGUBOV V.I.
SHATULSKY A.A.
SHERKUNOV V.G.
YAKOVLEV S.S.
YAMPOLSKY V.M.

This issue prepared with assistance of specialists:
DYUBKOVA N.V.
SERIKOVA E.A.
MAKARENKO E.D.
SUROV I.E.

An advertiser is responsible for the promotional materials

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency **81580**, on the united catalogue "Pressa Rossii" **39205**, catalogue "Pochta Rossii" **60261**) or immediately in the edition of the journal.

Ph.: (499) 268-47-19, 268-69-19
Fax: (499) 269-48-97
Http://www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru, zpmpost@rambler.ru

CONTENTS

Casting and Welding Productions

Mazzarelli Giovanni, Mazzarelli Giuseppe, Belyakov A.I., Sayfaev S.G., Belyakov A.A. 10 years of foundry productions LLC "MetalLitMash" 3
Belyakov A.I., Egorkina N.D., Alekseev A.P. Production of heavy castings made of spheroidal graphite iron 8
Kulikov V.I., Belyakov A.I., Aksenova L.I. Analysis of condition of cast iron elements in pumps after 50 year working period on the Moscow canal 14
Tkachenko S.S., Krivitsky V.S. Machine-tool industry and modernization of casting foundry 22
Murav'ev V.I., Kim V.A., Aksenov A.V. Automatic argon-arc welding of pipes from aluminium alloy AMg3M 26

Forging and Stamping Productions

Medvedev I.P., Kruk A.T. Optimization of technological solutions to ensure the accuracy of large forgings 30

Rolling and Drawing Productions

Volkov K.V., Mar'in B.N., Kim V.A., Evstigneev A.I., Novikova T.V., Mar'in S.B., Shport V.I. Influence of polystream rolling intensification on structure and properties of metal 36

Physical Metallurgy and New Materials

Belyakov A.I., Belyakov A.A. Structure, physical and mechanical, technological properties and use of chrome alloyed cast irons 40

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing of competitors for the academic degrees theses

Reprint is possible only with the reference to the journal "Blanking productions in mechanical engineering"

© "Mashinostroenie Publishers", "Blanking productions in mechanical engineering", 2010

УДК 621.74

Джованни Маццарелли, Джузеппе Маццарелли,
А.И. Беляков, С.Г. Сайфаев, А.А. Беляков *(ООО "МеталЛитМаш", г. Коломна)*

10 лет литейному производству ООО "МеталЛитМаш"

Приведены этапы проведения модернизации литейного производства ООО "МеталЛитМаш". Представлены современное оборудование и технологические процессы, а также типовые отливки, изготовляемые на предприятии для различных отраслей машиностроения, и художественное литье.

The upgrading of caster LLC "MetalLitMash" are considered. The modern equipment and technological processes and also the typical casting for machine-building industry and art casting are presented.

Ключевые слова: реконструкция; участок оборудования; чугун.

Keywords: overhaul; section equipment; cast iron.

ООО "МеталЛитМаш" – это предприятие, имеющее богатый производственный опыт по изготовлению отливок различной массы из чугуна в разовые формы, накопленный десятилетиями в ПО "Коломенский завод тяжелых станков".

Основной профиль предприятия – производство и реализация отливок для различных отраслей народного хозяйства из разных марок чугунов. ООО "МеталЛитМаш" – предприятие со 100%-ным иностранным капиталом (Metals&Machinery Industries Ltd., Великобритания).

Большой вклад по становлению и перевооружению предприятия сделали и делают члены совета директоров Джованни и Джузеппе Маццарелли, а также работники предприятия.

Большую организационную работу по становлению предприятия ведут генеральный директор С.Г. Сайфаев и главный инженер Н.В. Зверев. С приходом в 2005 г. в ООО "МеталЛитМаш" первого заместителя генерального директора, канд. техн. наук, лауреата премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники А.И. Белякова, заместителя генерального директора, инженера А.А. Белякова, зам. главного инженера А.А. Ильина, главного металлурга М.Н. Шиловой активизировались работы по внедрению современных технологических, новых материалов и оборудования, позволяющих улучшить качество литья и условия труда. Во внедрение современного оборудования существенный вклад внесли работники предприятия начальник технического бюро М.Г. Внуков, О.Н. Самсонова, А.Н. Самсонов, В.Н. Солянкин, рабочие В.А. Чуриков, С.В. Воробьёв, стерженщица З.А. Колосова и многие другие.

В освоение и внедрение современных технологических процессов, в разработку технологий на предприятии большой вклад вносят начальник технологического бюро, "Заслуженный машиностроитель РСФСР" В.М. Субботин, начальник ОТК А.П. Комаров, начальник бюро компьютерного моделирования технологических процессов С.А. Сербо, старший технолог Т.И. Валькова, технологи Г.В. Савина, А.Н. Суходольский, З.Н. Морозова, мастера П.К. Воронин, Д.В. Тельнов.

Отработкой режимов плавок и способов модифицирования различных марок чугунов (ЧПГ, ЧШГ, низко- и высоколегированных чугунов) занимаются зам. генерального директора И.И. Задорожный, главный металлург М.Н. Шилова, мастера Ю.Ф. Широков, М.В. Попокин, рабочие М.Ю. Широков, В.А. Новиков.

Во внедрение современного оборудования по анализу металлов, контролю химического состава и механических свойств сплавов, твердости, определения свойств различных формовочных и стержневых смесей существенный вклад вносят начальник литейной лаборатории инженер Н.Н. Дрожжина, сотрудники лаборатории Г.Н. Короткова и О.В. Шпак.

Большой вклад в своевременном выявлении брака и обеспечении качества изготовляемого литья вносят начальник ОТК А.П. Комаров и сотрудники ОТК Г.А. Соколова и О.А. Порватова.

Работу по экономической политике предприятия проводит экономический отдел, возглавляемый главным бухгалтером А.С. Сбитневой и сотрудниками А.Е. Бирюковой, Г.Д. Альшиной, Е.И. Ивановой.

За выполнение производственной программы отвечает модельный участок, возглавляемый А.П. Соловьёвым и высококвалифицированные работники В.К. Холодков, В.А. Варшавский, А.С. Трифонов, С.И. Земсков, А.В. Громов и др.

Как известно, в решении любых задач все решают кадры, начиная от рабочего до руководителей производств и обеспечении трудовой дисциплины на предприятии, поэтому большая работа в подборе специалистов проводится руководителем по работе с персоналом И.А. Матвеевой и сотрудниками Т.И. Сафоновой и др.

За своевременное обеспечение материалами, комплектующими для оборудования отвечает служба ОМТС, возглавляемая А.С. Даниленко и сотрудниками М.С. Копцовым, Ю.Н. Исаевым.

На предприятии осуществляется работа по его сертификации по ИСО 9001 и немецкому регламенту QR 83, проводимая первым зам. генерального директора А.И. Беляковым и сотрудником И.В. Ядренцевой.

В 2006 г. в ООО "МеталЛитМаш" создана служба маркетинга, которую возглавил зам. генерального директора А.А. Беляков. Служба маркетинга за очень короткое время увеличила объем заказов в 1,5–2,0 раза. Данной службой выиграны следующие тендеры: изготовление отливок для музея-заповедника Царицыно, реставрация чугунной лестницы на колокольне Ивана Великого в Кремле и др.

Успех и достижения в работе определяются прежде всего высоким творческим потенциалом и высокой ответственностью его сотрудников. Сотрудники предприятия печатаются в различных изданиях, участвуют в конференциях и выставках. В настоящее время на предприятии под редакцией канд. техн. наук А.И. Белякова совместно с сотрудником РГАТА проф., канд. техн. наук А.А. Жуковым подготовлена и находится в печати монография по производству отливок из ЧШГ, обобщающая собственный опыт предприятия, других предприятий и ученых России и зарубежья.

На протяжении многих лет ООО "МеталЛитМаш" тесно сотрудничает с ведущими научно-исследовательскими и учебными институтами нашей страны. Большой вклад во внедрении экологически чистых ХТС на основе жидкого стекла, отверждаемого сложным эфиром – ацетатами этиленгликоля внесли работники ОАО "НПО "ЦНИИТМАШ" д-р техн. наук, лауреат Ленинской премии П.А. Борсук, инженер А.С. Кафтанников.

Литейное производство ООО "МеталЛитМаш" состоит из пяти подразделений: чугунолитейный цех мелкого и среднего литья, чугунолитейный цех тяжелого литья, копровый и модельный цеха и строящийся механический цех.

ООО "МеталЛитМаш" за 10 лет своего существования претерпевает третью реконструкцию предприятия. В начале на конвейере были установлены две пары встряхивающе-прессовых машин с размером опоки в свету 800×600×300/300 мм отечественного производства (Сиблитмаш), которые прослужили: одна пара три месяца, другая – шесть месяцев.

На втором этапе реконструкции были закуплены встряхивающе-прессовые машины с теми же размерами опок итальянского производства, которые проработали до третьей полной реконструкции литейного цеха.

Членами совета директоров Джованни и Джузеппе Маццарелли, а также работниками ООО "МеталЛитМаш" принято решение о необходимости дальнейшей модернизации и крупномасштабной реконструкции предприятия. По этапам старое оборудование будет заменено на оборудование нового поколения ведущих производителей Италии с самыми современными технологиями.

В настоящее время чугунолитейный цех мелкого и среднего литья является основной заготовительной базой предприятия и при двухсменном рабочем графике выпускает около 8 000 т отливок в год. Особенностью производства является многономенклатурность и разносерийность. В литейном цехе производятся отливки из чугунов с пластинчатым графитом марок СЧ15–СЧ30, с шаровидным графитом марок ВЧ 40–ВЧ 60 и специальных чугунов марок ЖЧХ1–ЖЧХ3, ЧХ16М, ЧХ28, ЧЮ22Ш и др.

Чугунолитейный цех мелкого и среднего литья технологически подразделяется на три основных участка: плацевый, конвейерный и обрубной.

В ООО "МеталЛитМаш" намечены следующие этапы развития литейного производства.

Полная реконструкция конвейерного участка. На конвейерном участке мелкого и среднего литья установлена автоматическая формовочная линия фирмы Belloi&Romagnolli (Италия) с размером опоки в свету 1000×800×300/300 мм и производительностью 100...120 форм в час. Линия работает в режиме непрерывного цикла, т.е. формовка, простановка стержней, заливка, охлаждение и выбивка форм происходят параллельно на литейном конвейере.

Установка автоматической формовочной линии позволила: изготовлять отливки в соответствии с требованиями мировых стандартов; увеличить классы размерной и весовой точности отливок; повысить выход годного, снизить расход жидкого чугуна; улучшить товарный вид отливок; снизить себестоимость отливок; улучшить условия труда в цехе.

С установкой автоматической формовочной линии потребовалась полная реконструкция землепри-

Рис. 1. Смеситель интенсивного перемешивания и его общий вид

готовительного отделения. В начале 2008 г. произведена замена старого смесеприготовительного оборудования на новое с полной автоматизацией и контролем смесеприготовления.

На участке смесеприготовления установлено следующее оборудование: охладитель-гомогенизатор периодического действия для охлаждения формовочной смеси с контролем температуры; три бункера для хранения формовочной смеси; смеситель интенсивного перемешивания фирмы Belloi&Romagnolli (Италия) производительностью 90 т/ч (рис. 1).

Устанавливаемый смеситель оснащен мощным и надежным поршневым гидромотором. Перемешивающий блок включает в себя два вращающихся узла, которые, помимо вращения вокруг своей оси, перемещаются, перекрывая всю поверхность ванны.

За счет использования на каждом вращающемся узле планетарного редуктора процесс перемешивания осуществляется с высокой скоростью. Каждый вращающийся узел состоит из трех перемешающихся лопастей с полотнами – скребками, подчищающими поверхность дна ванны. Все узлы снабжены износостойкими накладками. Чистота стенок смесительной ванны поддерживается двумя скребками, которые также оснащены острыми накладками из износостойкого материала.

Комбинированное действие вращающихся узлов определяется суммой скоростей, создаваемых в ванне планетарным устройством, бегунами интенсивного перемешивания и лопастями – скребками. В результате за ограниченное время цикла перемешивания формовочной смеси придаются оптимальные свойства.

Формовочная смесь является основным фактором, от которого зависит качественное выполнение формовки, а следовательно, и качество отливки.

Для контроля приготовляемой смеси смеситель и охладители оснащены устройством автоматического контроля формуемости, прочности и влажности сырых формовочных смесей, бентонитов (GSC).

Система автоматического контроля качества формовочной смеси GSC управляет работой бегунов, осуществляет дозированную подачу воды и ввод добавок, обеспечивая, таким образом, производство неизменно качественной формовочной смеси.

Программа использует следующие входные параметры, необходимые для точного измерения уплотняемости: температура регенерированной формовочной смеси; влажность регенерированной формовочной смеси; масса загрузки; требуемое значение уплотняемости.

На автоматической линии освоено производство ответственных отливок для автомобильной промышленности (картер, ступицы, кронштейн из чугуна ВЧ 40, тормозные барабаны для автобусов и грузовых машин из чугуна СЧ25), станкостроительное литье (каретки, муфты, шкивы и др. из чугунов СЧ20 и ВЧ 45), машиностроительное литье (фланцы, колеса и др.), арматурное литье (диски, фланцы из ВЧ 40 и др.) массой 1...100 кг.

Реконструкция плаца и стержневого участка. На плацу производится крупное (до 10 т) и среднее чугунное литье, выполняются разовые и мелкосерийные заказы. Крупное и среднее литье изготовляют в формы и стержни из холоднотвердеющих смесей (ХТС-альфасет-процесс). На участке установлен двухрукавный шнековый смеситель фирмы Sogemi (Италия) максимальной производительностью 30 т/ч (рис. 2). На смесителе возможно ступенчато изменять его производительность 11, 15 и 30 т/ч смеси.

Формы и крупные стержни делают из ХТС на основе жидкого стекла, отверждаемого сложным эфиром – ацетатами этиленгликоля, освоенных работниками предприятия в сотрудничестве со специалистами ОАО "НПО "ЦНИИТМАШ".

На плацу отливают отливки для станкостроительной промышленности (станины, передние и задние бабки и др.), металлургической промышленности (вкладыши, пуансоны (из чугуна ЧХ16М2), матрицы,

Рис. 2. Шнековый смеситель производительностью 30 т/ч

а) *б)*

Рис. 3. Вкладыши из чугуна марки ЧГДШ массой 7 т:
а – в литом состоянии; *б* – после механической обработки

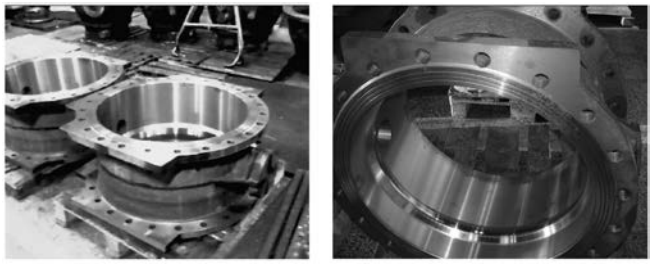


Рис. 4. Запорная арматура из чугуна ВЧ 40 диаметром 400 мм и массой 150 кг

шибера, тормозные желоба и др.) и для других отраслей (рис. 3, 4).

Реконструкцию стержневого участка проводят с установкой современных стержневых машин. Стержни для автоматической линии изготовляют на двух пескострельных стержневых машинах фирмы Primafond (Италия) с камерами объемом 10 и 20 л.

В дальнейшем предусмотрена покупка еще 2–3 стержневых машин. Полная реконструкция стержневого участка обеспечит: высокое качество поверхности отливок; уменьшение затрат на производство за счет снижения расхода электроэнергии; снижение брака на 20...30 %; снижение трудоемкости финишных операций; улучшение экологических показателей.

Реконструкция обрубного участка. На участке обрубки установлено новое очистное дробеметное оборудование проходного типа с вращающимися подвесками марки "Sandermatic" фирмы OMSG (Италия) (рис. 5), аналогичное оборудованию, установленному в ОАО "Транспневматика" (г. Первомайск). Установка туннельного типа с автоматическим циклом для обработки заготовок, подвешенных на вращающемся крюке.

Тележки передвигаются с постоянным шагом с помощью цепи. Цепь приводится в действие автоматически, пошагово продвигая все тележки до окончания цикла. Данное оборудование предназначено для крупносерийного производства. На рис. 6 приведены

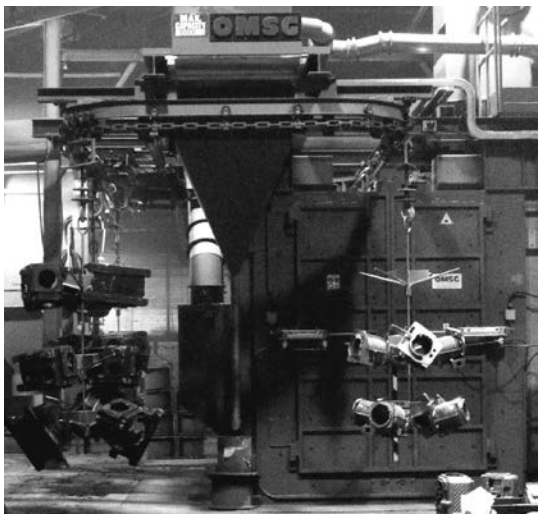
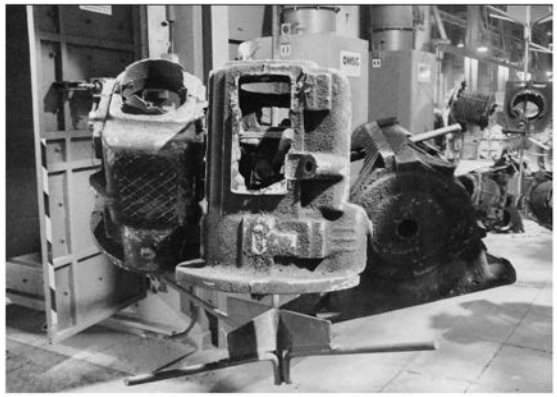


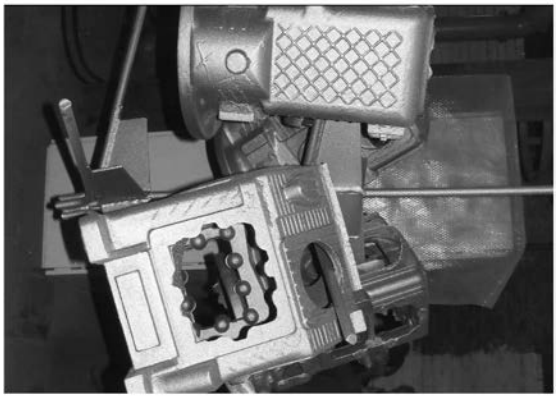
Рис. 5. Проходное дробеметное оборудование марки "Sandermatic" фирмы OMSG (Италия)

отливки до и после дробеметной обработки. В ближайшее время будет смонтирован второй дробемет.

Реконструкция плавильного отделения. Чугунолитейный цех оснащен тремя индукционными печами, промышленной печью емкостью 6 т и двумя печами емкостью 1 т. При дальнейшей реконструкции пла-



а)



б)

Рис. 6. Отливки до (*а*) и после дробеметной обработки (*б*)

Точность определения химического состава чугунов различных марок на приборе ТГА "ЛИТИС"

Марка чугуна	Отклонения по определению содержания элементов, %						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
СЧ15–СЧ30	±0,090	±0,17	±0,006	±0,004	±0,008	±0,042	–
ИЧХ16М	±0,083	±0,04	±0,010	±0,001	–	±0,660	±0,043

вильного отделения предусмотрена установка 20-тонной среднечастотной печи, 80-тонного миксера и автоматической заливки (преспур) фирмы Fomet (Италия), чтобы обеспечить максимальную производительность автоматической линии.

Контроль химического состава и технологических параметров выплавляемых чугунов по ходу плавки осуществляют на приборе термографического анализа (ТГА) "ЛИТИС". В таблице приведены данные по точности определения химического состава выплавляемых чугунов. Как видно из таблицы, прибор "ЛИТИС" позволяет с достаточно хорошей точностью определять оперативно химический состав по ходу плавки.

Также литейная лаборатория оснащена современным спектрометром "АРГОН-5" (рис. 7) производства фирмы ООО "Спектрософт" (г. Троицк).

Технологические службы предприятия занимаются разработкой и внедрением прогрессивной технологии, модельно-литейной оснастки и материалов, средств механизации и автоматизации производственных процессов, технологического сопровождения действующего производства.

Специалистами предприятия проведены следующие работы по модернизации производства и совершенствованию технологических процессов литейного производства:

• приняты к использованию модификаторы для чугунного литья, позволяющие снизить отбел чугуна, стабилизировать механические свойства, улучшить обрабатываемость отливок;

• внедрены самовысыхающие противопригарные покрытия, способствующие улучшению качества поверхности отливок;

• внедрены фильтровальные сетки для чугуна из стеклоткани и керамики;

• внедрены термоизмерители погружного типа Digilance фирмы Heraeus Electro-Nite (Бельгия), повысившие точность замеров температуры металла;

• создан участок по изготовлению экзотермических втулок (экзотермические смеси защищены патентами), позволивших повысить выход годного и качество отливок из чугунов с шаровидным графитом и специальных чугунов.

Рис. 7. Общий вид спектрометра "АРГОН-5"

В ООО "МеталЛитМаш" выполняются заказы по изготовлению чугунного художественного литья. Например, совместно с ООО РПП "Таргет–Цель" была отлита и отреставрирована чугунная лестница на колокольне Ивана Великого в Кремле.

В модельном цехе изготовляют новые модели из дерева, металла и пластмассы, технологический инструмент и шаблоны, ремонтируют оснастку.

В копровом цехе осуществляют разделку и сортировку чугунного и стального лома.

Полная реконструкция литейного цеха мелкого и среднего литья позволит увеличить выпуск литья до 30 000 т в год.

Джованни Маццарелли, Президент предприятия;
Джузеппе Маццарелли, член совета директоров;
Алексей Иванович Беляков, канд. техн. наук, первый зам. генерального директора,
bai49@mail.ru*;*
Александр Григорьевич Сайфаев, генеральный директор;
Алексей Алексеевич Беляков, зам. генерального директора по маркетингу

УДК 621.74

А.И. Беляков, Н.Д. Егоркина, А.П. Алексеев *(ООО "МеталЛитМаш", г. Коломна)*

Производство массивных отливок из чугуна с шаровидным графитом

Приведены результаты исследований по изготовлению отливок из чугуна с шаровидным графитом марки ВЧ 50 массой 30 т. Показано, что разработанные рекомендации по технологии, выбору состава чугуна, режимам обработки и заливки обеспечивают получение необходимых свойств, что подтверждено вырезкой образцов из реальных отливок. Применение экзотермических оболочек для обогрева прибылей позволило повысить выход годного и обеспечить плотность металла.

The results of studies production of castings made of spheroidal graphite iron type VCh 50 on weighing 30 tons are considered. It is shown that the technical recommendations worked out for the casting system, the composition of the alloy, the regimes for modification and casting of the metal all secure the obtaining of the necessary characteristics of the castings, as is confirmed by analysis of cut out samples from the casting itself. The use of exothermal sleeves provides form higher percentage of useful metal in the casting and higher density of the metal.

Ключевые слова: чугун с шаровидным графитом; экзотермическая оболочка; прибыль; отливка.

Keywords: spheroidal graphite iron; exothermal sleeve; head; casting.

При изготовлении массивных отливок важной задачей является получение в литом состоянии требуемой структуры металлической основы чугуна, так как термическая обработка отливок больших размеров и масс связана со значительными затратами и не всегда является достаточно эффективной.

Как известно, в отечественном станкостроении венцы больших зубчатых колес изготовляются стальными. Венцы зубчатых колес диаметром до 5 м получают из цельнолитой заготовки, венцы большого диаметра набирают из отдельных секций.

Из опыта зарубежной практики известно, что лучшими эксплуатационными свойствами обладают венцы (диаметром до 17 м), изготовленные из перлитного или бейнитного чугунов с шаровидным графитом (ЧШГ).

ЧШГ благодаря хорошим антифрикционным свойствам увеличивает долговечность эксплуатации зубчатых колес и повышает класс точности передачи. Кроме того, снижается трудоемкость изготовления венцов при литье заготовок за счет лучших литейных свойств ЧШГ и при механической обработке за счет лучшей его обрабатываемости.

Венцы из низколегированного ЧШГ с повышенной твердостью (перлитные, бейнитные) применяют для уменьшения износа и повышения в 4–5 раз срока службы при работе в условиях смазки с примесью абразива (венцы поворотной рамы шагающих экскаваторов, рудно-размольных мельниц), для значительного повышения точности, снижения массы венцов и значительного сокращения приработки крупных металлообрабатывающих станков.

По стандартам Германии DIN 17100 и DIN 17200 такие показатели для зубчатых передач, как предел контактной прочности и предел выносливости при изгибе (рис. 1) определяются твердостью и типом материала (чугун, сталь), при этом бейнитный ЧШГ соответствует уровню улучшаемых сталей и многократно превосходит литую сталь 50Л.

В 1982 г. был подписан договор о совместном производстве тяжелых карусельных станков между Коломенским заводом тяжелых станков (КЗТС) и фирмой "Шисс" (Германия). По условиям договора базовые узлы станков – основания, планшайбы, венцы, коробки скоростей, двухстоечные порталы, стойки и станины изготовляет КЗТС, а фирма "Шисс" – детали поперечины, консоли, суппорты и обрабатывающие головки. Оба предприятия получили таким образом возможность выпускать высокопроизводительное оборудование, используя технические достижения друг друга.

По требованию фирмы "Шисс" венец на планшайбе должен быть изготовлен из ЧШГ марки ВЧ 50. Однако из-за отсутствия на КЗТС опыта производства ЧШГ зубчатые венцы для станков изготовлялись из нетермообработанной стали марок 45Л или 50Л. Из-за отсутствия на КЗТС возможности для высокотемпературной обработки отливок была поставлена задача разработки технологии изготовления крупнотоннажных отливок с преимущественно перлитной структурой в литом состоянии.

Все предварительные исследования проводили на литейной базе НПО ЦНИИТМАШ*. Влияние состава ЧШГ на структуру и свойства отливок в различных сечениях исследовали на ступенчатой пробе с толщинами 50, 100 и 150 мм. Химический состав исследованных чугунов приведен в табл. 1.

---

* В работе принимали участие канд. техн. наук В.И. Куликов, инженер В.А. Анохин.

В различных толщинах ступенчатой пробы устанавливали хромель-алюмелевые термопары для снятия кривых охлаждения и определения времени охлаждения различных сечений (рис. 2).

Как видно из рис. 2, время затвердевания в толщинах 50, 100 и 150 мм составляет 12, 36 и 55 мин соответственно. Время затвердевания сечения 150 мм соответствует времени затвердевания в подприбыльной части отливки без использования экзотермических втулок.

Данные по влиянию толщины стенки отливки и химического состава чугуна в литом состоянии на микроструктуру и механические свойства приведены в табл. 2.

Из представленных в табл. 1, 2 данных видно, что незначительное легирование исходного чугуна (плавка К5) Cr, Ni и Cu увеличивает твердость от 190 до 240 НВ (плавка К6). Увеличение содержания Mn, Cr и Cu повышает твердость чугуна до 285 НВ (плавки К8...К11).

Варьирование углеродом (2,80...3,80 %) и кремнием (1,40...3,10 %) плавки К8 и К10, табл. 2 в указанных пределах на твердость чугуна в литом состоянии почти не сказывается. Однако в чугуне плавок К8 и К9 содержится повышенное количество цементита (до 11 %) по сравнению с чугунами плавок К10 и К11 (до 3 % цементита).

Для получения преимущественно перлитной структуры чугуна в литом состоянии зубчатого венца и механических свойств: $\sigma_в$ свыше 500 МПа и твердости 220...280 НВ рекомендуемый состав чугуна должен быть следующим, % мас.: 3,2...3,6 C; 1,8...2,7 Si; 0,7...1,2 Mn; до 0,15 P; 0,3...0,6 Cr; 0,3...0,7 Cu; 0,15...0,20 Al.

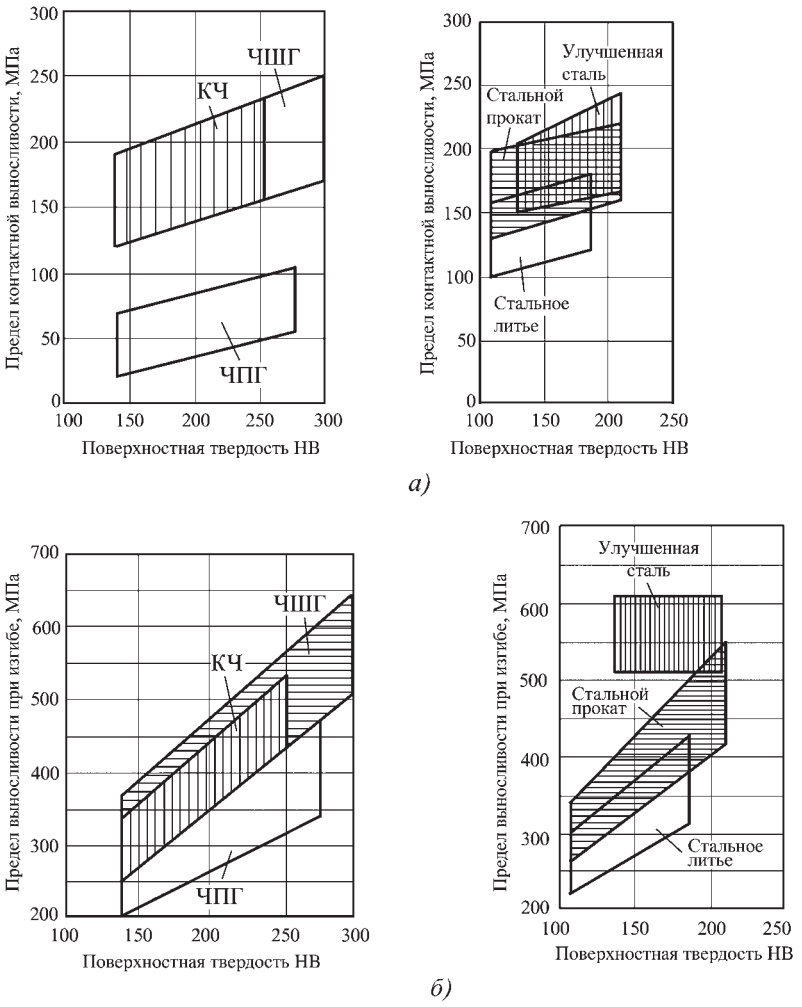


Рис. 1. Диаграммы для определения эксплуатационных свойств различных материалов:
а – предел контактной выносливости; *б* – предел выносливости при изгибе

1. Химический состав исследованных чугунов, % мас.

Номер плавки	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	S	P	Mg
К3	3,80	1,70	0,78	0,21	0,46	0,01	–	0,004	0,260	0,027
К4	3,57	1,41	0,76	0,22	0,34	0,43	–	0,004	0,160	0,086
К5	3,45	1,54	0,44	0,15	–	–	–	–	0,048	0,053
К6	3,58	1,48	0,82	0,23	0,41	0,05	0,12	–	0,090	0,100
К7	3,58	1,52	0,79	0,25	0,39	0,39	0,10	–	0,200	0,073
К8	3,93	1,85	1,13	0,43	0,39	0,61	0,24	0,005	0,110	0,033
К9	3,75	1,77	1,08	0,54	0,34	0,84	0,20	0,004	0,100	0,048
К10	3,00	2,77	1,29	0,38	0,28	0,64	–	–	0,180	0,063
К11	2,80	3,11	1,24	0,41	0,29	0,78	–	–	0,120	0,049
630	3,32	1,82	1,22	0,21	0,25	0,70	0,14	0,030	0,130	0,047
692	3,25	1,90	1,01	0,37	0,25	1,01	0,19	0,020	0,120	0,082

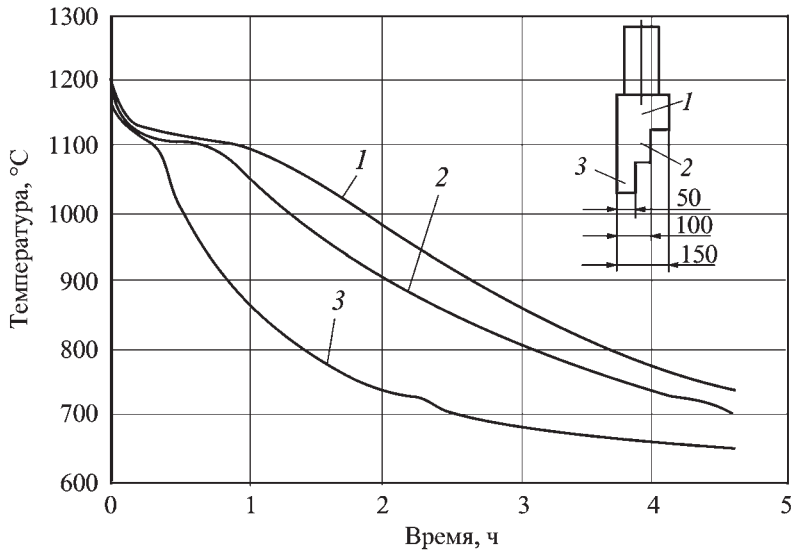


Рис. 2. Кривые охлаждения в ступенчатой пробе

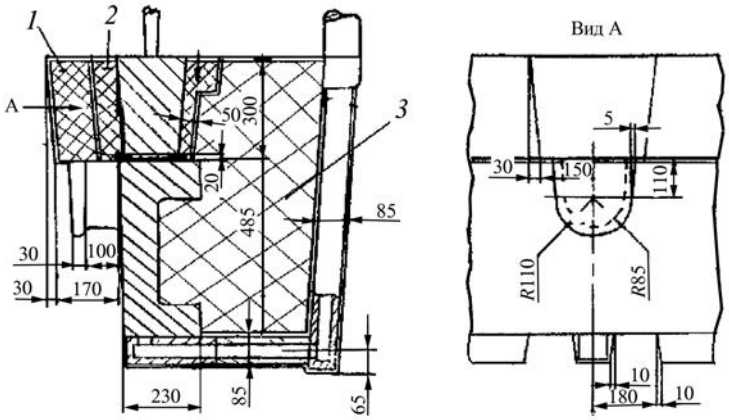
Конструкция венца имеет Г-образное сечение, масса 15 т, диаметр 4000 мм, высота 180 мм, преобладающая толщина отливки 100...150 мм. Принятая конструкция заготовки имела П-образное сечение, которая в дальнейшем разрезалась на два венца. Черновая масса заготовки около 30 т.

Технологию изготовления венца зубчатого колеса отрабатывали на 1/6 части массой 2 т (рис. 3).

На рис. 3 показана технология изготовления 1/6 части венца зубчатого колеса с литниковой системой и прибылями. Разработанная технология моделирует заводскую технологию по условиям заливки, формообразования, затвердевания и остывания. Форму изготовляли из жидкостекольной смеси, окрашивали графитовой быстросохнущей краской. Отливку 1/6 части венца зубчатого колеса (рис. 4) осуществляли по двум вариантам: без

2. Микроструктура и механические свойства чугуна в литом состоянии в различных сечениях

Номер плавки по табл. 1	Толщина ступеньки, мм	Микроструктура, %				Механические свойства		
		ШГф	П	Ф	Ц	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ
К5	50	5	70	30	–	532	4,6	197
	100	5	70	30		553	7,0	187
	150	4,5	45	55		330	2,0	175
К6	50	5	100	–	–	468	2,0	241
	100	5				443		229
	150	4,5				430		241
К7	50	5	100	–	–	481	2,0	241
	100	5				448	–	
	150	4				435	–	
К8	50	5	92	–	8	462	–	269
	100	5	91		9	488		269
	150	4,5	97		3	388		255
К9	50	5	89	–	11	512	–	285
	100	5	89		11	430		
	150	4,5	91		9	460		
К10	50	5	98	–	2	550	–	269
	100		98		2	535		
	150		100		0	500		
К11	50	5	97	–	3	500	–	285
	100		98		2			
	150		98		1			
630	Отливка	5	98	2	–	513	–	250
692			96	4		500		262



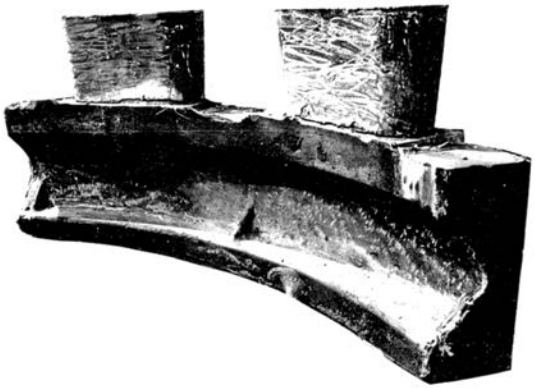


Рис. 4. Отливка 1/6 части венца зубчатого колеса

Рис. 3. Технология изготовления 1/6 части венца зубчатого колеса:
1 – стержень перекрытия; *2* – овальная экзотермическая оболочка; *3* – центральный стержень

применения экзотермических втулок и с ними.

При сборке формы для снятия кривых охлаждения устанавливали хромель-алюмелевые термопары. Схема установки и кривые охлаждения различных вариантов изготовления 1/6 части венца зубчатого колеса приведены на рис. 5.

Масса одной овальной открытой экзотермической втулки с толщиной стенки 40...50 мм составляла 60 кг.

Чугун плавили в двух индукционных печах ИЧТ-1. Химический состав чугуна приведен в табл. 1 (плавки К3 и К4). 750 кг жидкого чугуна модифицировали чистым магнием в герметизированном ковше, а остальные 900 кг чугуна – 1,1 % Cu–Mg-лигатурой в двухтонном ковше. После обработки Cu–Mg-лигатурой на поверхность жидкого чугуна присаживали 0,5 % ФС75 от общей массы чугуна и переливали чугун из герметизированного ковша. Температуру чугуна при заливке форм поддерживали в пределах 1250...1280 °С, при этом продолжительность заливки составляла 80 с.

Из рис. 5 видно, что применение экзотермических втулок для обогрева прибылей увеличивает затвердевание отливки в 2,0–2,5 раза по сравнению с обычной прибылью. Вырезка темплетов из отливок показала, что в отливке, изготовленной с применением экзотермических втулок, раковины и усадочная пористость отсутствовали, а в детали с обычными прибылями в тепловых узлах была обнаружена усадочная пористость.

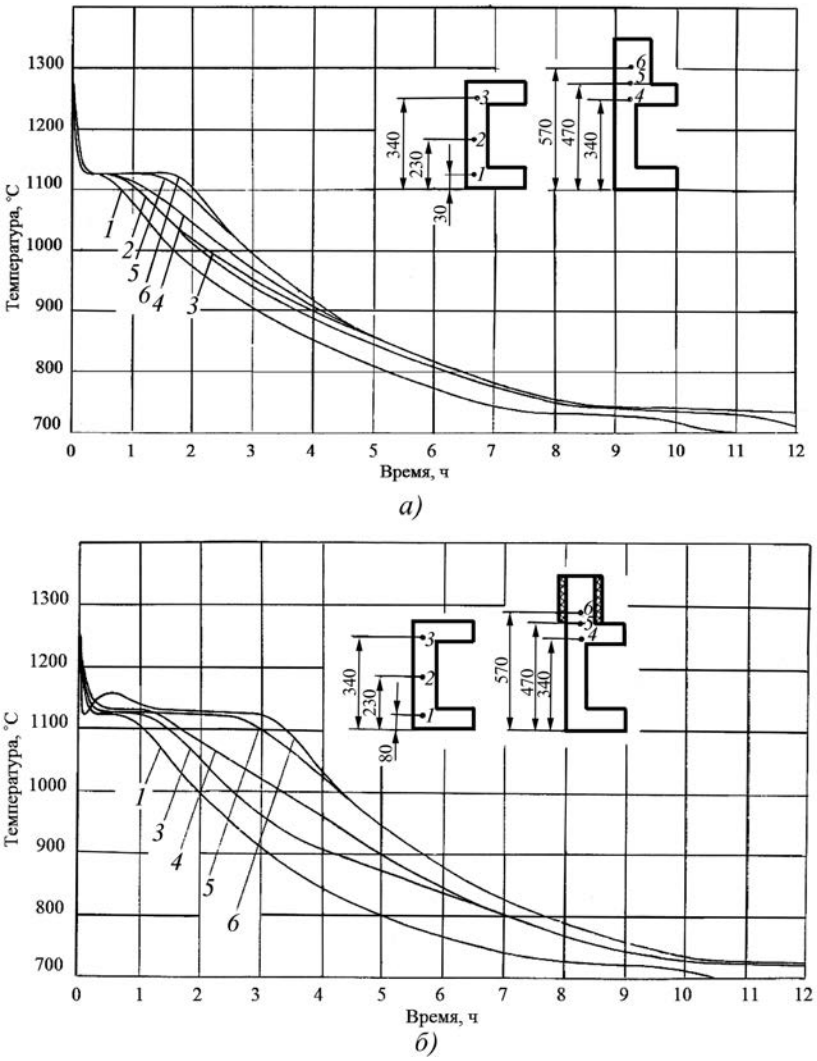


Рис. 5. Кривые охлаждения 1/6 части венца зубчатого колеса при различном исполнении:
а – с обычными прибылями; *б* – с экзотермическими вставками

Рис. 6. Сборка формы для отливки венцов зубчатых колес

Для улучшения отбивки прибылей от отливки применяли стеклоткань марки КС-11-ЛА, которую располагали между прибылью и отливкой.

Исследование микроструктуры и механических свойств чугуна в литом состоянии, вырезанного из сектора, показали, что форма графита и металлическая основа, механические свойства и твердость соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к указанным выше венцам.

Опытно-промышленные отливки венцов из низколегированного ЧШГ изготовляли в литейном цехе крупного литья КЗТС.

Форму и стержни изготовляли из жидкостекольной смеси, окрашивали водной графитовой краской и после сборки просушивали переносными сушилами с газовыми горелками. Форму изготовляли в кессоне. По модели формировали только наружную часть кольца, внутреннюю часть выполняли стержнями, которые собирались в кольцо из шести частей. Стержни фиксировали по центровому "болвану", выполненному по модели. Форма спаренного венца в процессе сборки показана на рис. 6.

Разъем формы проходил по верху прибыли, таким образом прибыли оказывались закрытыми опокой, в которой кроме двух стояков делались выпоры диаметром 50 мм по числу прибылей.

Для изучения условий кристаллизации реальной отливки в различных сечениях были установлены хромель-алюмелевые термопары. Запись изменения температуры проводилась на потенциометре ЭПП.

Подвод металла осуществляли сифонной литниковой системой с внутренней стороны кольца через восемь стояков и питателей, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга на протяжении 3/4 длины внутренней окружности кольца. Шлаковик сечением 100×80 мм расположили по верху "болвана". Стояки и питатели собирали из литейного припаса с внутренним диаметром 40 мм.

Для питания отливки равномерно по окружности устанавливали 12 обычных прибылей массой по 200 кг (в первоначальном варианте), в последующих отливках после анализа работы прибылей ограничились шестью экзотермически обогреваемыми прибылями. Для обеспечения отделения прибылей от отливки между ними устанавливали разделительную кремнеземную сетку марки КС-11-ЛА.

Исходный чугун плавили в двух вагранках производительностью 10 и 20 т/ч. Для повышения температуры металла, предназначенного для получения чугуна с шаровидным графитом, перед загрузкой шихтовых материалов в вагранку давали удвоенную топливную колошу. Температура жидкого чугуна на желобе вагранки достигала 1400 °С. Химический состав опытной плавки приведен в табл. 1 и 2 (плавки 630, 692).

Чугун модифицировали комбинированным способом. Часть металла обрабатывали металлическим магнием в герметизированном ковше конструкции ЦНИИТМАШ емкостью 6 т. При этом в разогретый до температуры 600...700 °С герметизированный ковш набирали 5,0..5,5 т чугуна из вагранки. В зарядную камеру ковша помещали 35 кг чистого магния и 5 кг криолита. Реакция модифицирования протекала 7...10 мин.

Другую часть металла 16...17 т обрабатывали Cu–Mg-лигатурой в открытом ковше емкостью 30 т. На дно ковша устанавливали перегородку из огнеупорного кирпича, образующую карман, в один из которых помещали лигатуру. При выпуске металла из копильника ковш ориентировали таким образом, чтобы струя металла попадала в сторону, противоположную карману с лигатурой. Одновременно на струю присаживали медь и алюминий в необходимых количествах согласно рекомендуемому химическому составу.

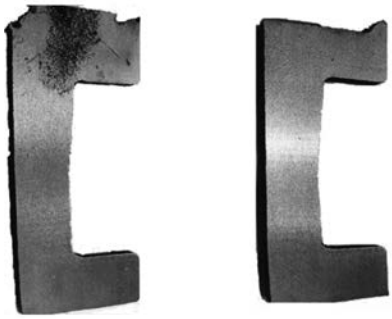
Обработанный магнием металл из герметизированного ковша переливался в 30-тонный ковш с чугуном, обработанным лигатурой. При переливе на струю присаживался мелкодробленый ферросилиций ФС75 в количестве 50...75 кг для вторичного модифицирования. После очистки шлака металл заливали в форму.

Первая отливка, несмотря на удовлетворительные механические свойства и структуру, разломилась при выбивке в результате больших внутренних напряжений, возникших при ее охлаждении, из-за недостаточной податливости литейной формы. Эта отливка была разрезана в различных сечениях для исследования качества металла, установления усадочных дефектов непосредственно в теле отливки.

Анализ данных показал, что установка 12 необогреваемых прибылей не обеспечивает направленности кристаллизации, так как температура металла в прибыли снижается быстрее, чем в верхней части отливки. Это было подтверждено исследованиями при разрезке отливки на темплеты в местах установки прибылей и между ними (рис. 7).

Верхняя часть отливки под прибылями имеет пористость, в сечениях между прибылями пористость отсутствует.

Устранение недостатков, выявленных при исследовании первой отливки, было осуществлено изменением технологии формы и применения экзотермической смеси для обогрева прибылей. Центральный стержень изготовили полым в виде кольца с толщиной стенки 300 мм, кроме того в кольце сделали зазор шириной 50 мм по всей его высоте.



а) б)

Рис. 7. Темплеты, вырезанные из опытной отливки:
а – из подприбыльной части отливки; *б* – между прибылями

Контактирующая между собой площадь торцев стержней, образующих внутреннюю поверхность венца, была уменьшена в 4–5 раз благодаря выборке глубиной 10 мм таким образом, что контакт между стержнями обеспечивался только по поверхности, прилегающей к металлу, толщиной 40 мм. Остальная площадь торца стержня имела зазор с соседним стержнем шириной 20 мм. Все пустоты и зазоры при сборке формы заполнялись сухим песком и отработанной жидкостекольной смесью.

Разработанная технология обеспечила необходимую податливость формы и получение целых (без трещин) отливок. По данной технологии отлиты три опытные заготовки. Общий вид заготовки и готовой детали показаны на рис. 8.

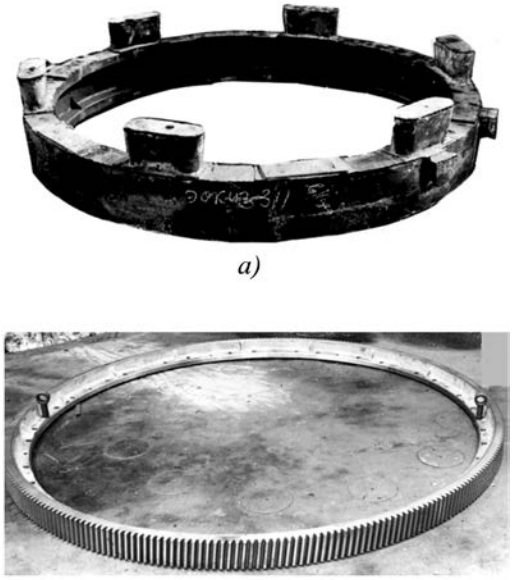
Заливку формы осуществляли при температуре 1265...1275 °С по пирометру. Продолжительность заливки 75 с. Через 2 ч после заливки при температуре отливки около 1000 °С верхняя опока освобождалась от груза, а через 72 ч отливка извлекалась из формы.

Структуру и механические свойства чугуна исследовали на клиновых заготовках с рабочим сечением 25×25 мм и на образцах, вырезанных из тела отливки. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Структура чугуна всех плавок в клиновых заготовках по ГОСТ 3443–87 перлитная с графитом шаровидной формы и небольшого количества компактной формы. Размер включений графита 30...250 мкм. Площадь, занятая графитом, 3...10 %. Перлит тонкопластинчатый и зернистый составляет 92...98 % площади шлифа; встречаются отдельные включения феррита и небольшие оторочки феррита вокруг графита. Фосфидная эвтектика – изолированная, площадь наибольших включений 6000 мкм^2.

В структуре некоторых заготовок сечением 25×25 мм имеется небольшое количество цементита.

Структура чугуна в отливке аналогична структуре чугуна в клиновой пробе (по ГОСТ 3443–87) по форме и размеру графитовых включений, количеству перлита и фосфидов; отличается содержанием цементита. В образцах, вырезанных из тела отливки, цементит не обнаружен. Неметаллические включения располагаются преимущественно около горизонтальных поверхностей отливки, по остальному сечению их количество незначительно, а распределение равномерное.



а) б)

Рис. 8. Заготовка на два венца массой 35 т (*а*) и выточенный венец (*б*) зубчатого колеса из ЧШГ

При исследовании структуры чугуна в различных точках сечения отливки разницы не обнаружено. Исследование распределения неметаллических включений показало, что рабочие поверхности венцов сульфидов не содержат.

Предел прочности при растяжении чугуна всех плавок в литом состоянии составляет $\sigma_в$ = 500...553 МПа, а $\sigma_в$ чугуна непосредственно в отливке – 500...513 МПа. Наиболее высокие значения $\sigma_в$ отмечаются в нижней и средней части отливки; в верхней части отливки $\sigma_в$ ниже примерно на 10 %. Предел прочности чугуна под прибылью ниже, чем в таком же сечении между прибылями. Это подтверждается исследованием темплетов отливки, вырезанных под прибылью и между прибылями.

Термообработка: нагрев до 870 °С, выдержка при этой температуре 3 ч и охлаждение на воздухе повышает в 1,3–1,5 раза предел прочности чугуна при растяжении как в образцах из клиновых заготовок, так и в образцах, вырезанных из отливки.

Предел прочности чугуна в теле отливки после термообработки достигает 670 МПа, при этом твердость чугуна возрастает от 253 до 286 НВ. При этом структура металлической основы чугуна перлитная с участками зернистого перлита. Феррит в структуре чугуна после термообработки сохраняется в небольших количествах только в виде оторочки вокруг графита.

Алексей Иванович Беляков, канд. техн. наук, первый зам. генерального директора,
bai49@mail.ru;
Нинель Дмитриевна Егоркина, канд. техн. наук;
Александр Петрович Алексеев, инженер

УДК 621.74

В.И. Куликов, А.И. Беляков*, Л.И. Аксёнова
*(ОАО "НПО "ЦНИИТМАШ", г. Москва, *ООО "МеталЛитМаш", г. Коломна)*

Анализ состояния чугунных элементов насосов после 50-летней эксплуатации на канале им. Москвы

Проведен анализ чугуна закладных насосов после 50-летней эксплуатации по определению состава чугуна, механических свойств, коррозионной и кавитационной стойкости в лабораторных и промышленных условиях. Анализ механических свойств образцов, вырезанных из крышек люка, показал, что чугун соответствует марке СЧ15. Замена агрегатов на новые с повышенной в 1,5 раза производительностью, но встроенные в корпусные детали прежних насосов, заложенных в гидротехнический бетон насосных станций, позволяет продлить срок эксплуатации канала им. Москвы на 25...30 лет.

The analysis of cast iron embedded pumps after 50 year working period is performed. Analysis were carried out in both working and laboratory conditions to determine the composition of the alloy, the mechanical properties and corrosion and cavitation resistance. Analysis was carried out on samples cut out from manhole covers has shown that the alloy is type SCh15. Substitution of the old moving parts with new ones with productivity of 1,5 times more, without substituting the cemented pump bodies has shown that the lifecycle of these pumps, installed in the Moscow canal, can be increased by further 25...30 years.

Ключевые слова: чугун; коррозионная и кавитационная стойкость.

Keywords: cast iron; corrosion and cavitation resistance.

Чугун с пластинчатым графитом (ЧПГ) давно применяют в качестве конструкционного материала для подземных водоводов, насосов, тюбингов, успешно работающих в водных средах и растворах различных соединений.

Во многих странах ЧПГ предпочитают другим материалам для водопроводных труб благодаря его высокой естественной коррозионной стойкости. Доля чугунных труб, приходящаяся на водоводы крупнейших городов Западной Европы и США, построенных в основном около 150 лет назад, составляла, как правило, около 95 %.

Широкие полевые испытания труб из ЧПГ наряду с другими материалами были выполнены национальным бюро стандартов США в 1922 г. (36 000 образцов в 17 видах почв в течение 12 лет), а также американскими фирмами Jas Assatiation (60 образцов чугунных труб в течение 4 лет) и Petroleum Institute (16 трубопроводов длиной по 330 м с разными защитными покрытиями, в том числе и битумным в 16 типах различных почв). Коррозионная стойкость труб из ЧПГ была тем выше, чем мельче зерно и дисперснее графит, чем выше процент связанного углерода и толще литейная корка, которая состоит главным образом из смеси ферросиликатов и оксидов.

В связи с проводимым техническим переоснащением и реконструкцией гидросооружений, например канал им. Москвы, связанных с заменой насосных агрегатов на новые с повышенной в 1,5 раза производительностью, но встроенные в корпусные детали прежних насосов, заложенных в гидротехнический бетон насосных станций канала. Чугунные корпусные детали проточной части насосов в течение 50-летнего периода интенсивно эксплуатировались без подновления и замены в условиях коррозионного и кавитационного воздействия водной среды.

Учитывая, что в насосах отдельные чугунные закладные детали, работающие с начала эксплуатации, имевшие небольшую исходную толщину (14 мм) и менее благоприятную с точки зрения коррозии ферритную структуру металлической основы (крышка малого люка), встает вопрос о возможности и сроках дальнейшей эксплуатации.

В связи с изложенным в задачу настоящей работы входило:

– исследование механических свойств, структуры и состава чугуна закладных деталей насосов после 50-летней эксплуатации;

– исследование коррозионной и кавитационной стойкости чугуна различных элементов насосов;

– исследование и рекомендации по выбору чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ) для закладных и проточных элементов гидросооружений.

Исследования химического состава чугуна, структуры металлической основы и механических свойств проведены на деталях крышек малого люка, закладных и проточных частях насосов. Химический состав, микроструктура и механические свойства деталей закладных частей, крышек люка и рекомендуемых составов чугуна приведены в табл. 1 и 2.

Анализ химического состава (плавки 1–9, см. табл. 1), микроструктуры и механических свойств де-

1. Химический состав исследованных деталей, закладных частей и чугунов, % мас.

Номер детали, плавка	C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P	Mg	Примечание
1	3,61	1,10	0,97	–	–	–	0,24	–	Детали проточной части
2	3,81	1,55	0,89			0,075	0,35		
3	3,63	2,49	0,58			0,099	0,42		Крышка люка
4	3,41	2,83	0,49			0,120	0,74		
5	3,80	2,33	0,57			0,104	0,48		
6	3,65	2,28	0,48			0,151	0,29		
7	3,43	2,38	0,46			0,148	0,66		
8	3,96	2,30	0,49			0,132	0,27		
9	3,44	1,35	0,62			0,122	0,25		
М1*	3,30	3,46	1,44	0,10		0,036	0,093	0,065	Отливки ЦНИИТМАШ
М2	3,48	2,37	1,27	–		0,015	0,062	0,056	
М3*	3,35	2,25	2,02	0,10		0,009	0,043	0,065	
М4	1,92	3,85	2,03	18,65	0,66	0,014	0,046	0,080	
М5	2,98	2,10	1,09	–	–	0,009	0,048	0,062	
М6**	3,05	2,72	8,36	11,50	1,72	0,004	0,060	0,110	
К7	3,75	1,77	1,08	–	–	0,004	0,060	0,070	

*0,91 % V; 0,39 % Mo; 0,80 % Cu; 0,90 % Al. **0,35 % Al.

талей закладных частей и крышек люка (плавки 2, 5, 6, см. табл. 2,) показал, что по прочности чугун соответствует маркам СЧ10–СЧ18.

Микроструктура чугуна закладных и проточной частей насосов – перлитная с участками фосфидной эвтектики, а крышек люка – ферритно-перлитная.

При разрезке крышек люка в отдельных деталях в поверхностном слое обнаружены газовые раковины.

Механические свойства образцов, вырезанных из крышек люка, показали, что прочность на изгиб в теле отливки в 1,2 раза выше, чем во фланце, что, вероятно, связано с большей их толщиной из-за припуска на механическую обработку.

2. Микроструктура и механические свойства исследуемых чугунов

Номер детали, плавка	Микроструктура по ГОСТ 3443–87				Механические свойства					
	Форма графита	П	Ф	Ц	$\sigma_в$	$\sigma_т$	$\sigma_{изг}$	Стрела прогиба f, мм	δ, %	НВ
					МПа					
2	1	100	100	–	170	–	312	1,3	–	175
5	2	20	80		150		210	1,5		114
6	2	50	50		100		183	1,4		91
М1	ШГф5	86	4		520		–	–		217
М2		98	–	2	590	410			2,0	225
М3		96	4	–	520	–			–	321
М4*		–	–	8	540	240			45	140
М5		96		4	520	–			–	230
М6*		–		8	390					245
М60*				6	418					245
К73		100		–	600					321

* Основа матрицы – аустенитная.

3. Кавитационная стойкость чугунов

Плавка	Номер образца	НВ	Плотность, г/см^3	Потери массы образца, мг				
				за время испытания, ч			Значение	
				1	2	3	Среднее	Относительное
Ст3	1	183	7,8364	48,0	104,0	183,0	151,0	1,00
	2	130		22,0	99,0	140,0		
	3	129		28,7	79,8	129,9		
2	1	170	7,1733	18,8	40,5	93,4	103,3	1,34
	2	156		32,5	67,1	98,7		
	3	154		35,4	82,4	117,9		
М4Т	1	156	7,2093	17,1	50,0	97,6	91,3	1,52
	2	165		12,5	26,7	65,8		
	3	154		52,5	78,7	110,5		
М60	1	245	7,3678	14,7	40,4	63,5	68,6	2,07
	2			20,0	46,2	68,5		
	3			19,0	55,4	73,8		
М6Т	1	265	7,3678	13,8	26,3	44,1	59,7	2,38
	2	250		30,0	50,0	76,1		
	3	280		17,2	37,3	58,9		
М4ТХ	1	–	7,2093	11,0	15,6	37,3	52,1	2,67
	2			15,9	32,3	50,2		
	3			20,7	47,5	68,7		
К73А	1	260	7,1897	10,5	23,6	39,9	51,6	2,69
	2	255		15,3	26,4	67,3		
	3	265		20,0	30,2	49,5		
М1Т	1	311	7,0262	11,2	25,6	26,8	31,0	4,37
	2	300		11,0	23,5	32,1		
	3	295		11,8	25,6	34,1		

Примечание. Кавитационная стойкость и плотность эталона стали Ст3 принята за единицу.

В связи с тем, что закладные элементы в процессе работы подвергаются воздействиям коррозии и кавитации, то влияние химического состава и структуры чугунов на стойкость к коррозии и кавитационному воздействию исследовали на образцах, вырезанных из закладных частей насосов канала им. Москвы, и других образцах ЧШГ лабораторной выплавки. Основным видом термообработки была нормализация образцов после нагрева и выдержка 4 ч при 920 °С.

Кавитационную стойкость определяли на магнитострикционной установке МСУ конструкции ЦНИИТМАШ* при испытании образцов (плавки 2, М1, М4, М6, К7, см. табл. 1) в течение 3 ч со взвешиванием их через каждый час, размах колебаний вибратора 70 мкм при частоте 6000 Гц.

Этот метод позволяет получить характеристики кавитационной стойкости металлических материалов применительно к жестким условиям работы насосного и гидротурбинного оборудования (в реальных условиях эксплуатации закладных частей насосов кавитационное воздействие значительно меньше) и дает возможность выявить наличие взаимосвязи между прочностными характеристиками, твердостью и кавитационной стойкостью.

Результаты по кавитационной стойкости различных материалов приведены в табл. 3.

Максимальная кавитационная стойкость получена на образцах с более высокой твердостью. Чугуны с ферритной структурой имеют наибольшую потерю

* Исследования выполнены канд. техн. наук А.Ф. Дегтяревым.

массы и наоборот, чем больше в структуре перлита, тем выше их стойкость. Приведенные данные по кавитационной стойкости стали Ст3 (выбрана в качестве эталона) подтверждают это. В чугунах, имеющих дисперсную структуру перлита или мартенсита, твердость увеличивается, и соответственно возрастает кавитационная стойкость.

Увеличение скорости охлаждения или применение обработки холодом повышает кавитационную стойкость (в последнем случае это связано с превращением остаточного аустенита в мартенсит) на примере образцов плавок М4Т и М4ТХ.

На рис. 1 показан характер повреждений образцов после испытаний на магнитострикционной установке. Вследствие пониженного сопротивления образцов с меньшей твердостью на рабочей поверхности образуются радиальные углубления, а в сталях с более высокой твердостью такие углубления мало заметны, а на некоторых образцах за 3 ч испытаний радиальные борозды не образуются.

При испытании материалов с чередованием коррозионного воздействия в воде в течение 24 ч и кавитации в течение 5 мин (после 12 циклов указанного воздействия образцы взвешивают) общая продолжительность испытаний составляет 36 суток коррозии и 3 ч кавитационного воздействия. Общие потери массы увеличиваются в 1,5–2,0 раза по сравнению с испытаниями без чередования с коррозией, что связано, по-видимому, с невысокой коррозионной стойкостью исследованных чугунов в воде.

Таким образом, в исследованном классе чугунов с пониженной коррозионной стойкостью сопротивление кавитационной эрозии возрастает с повышением твердости металла.

Кавитационная стойкость перлито-ферритного чугуна, использованного в закладных частях насосов канала им. Москвы, находится на достаточном высоком уровне. Учитывая, что за период функционирования насосной станции (около 50 лет) по результатам исследования заметного разрушения чугунов по причине кавитационной эрозии не наблюдалось, сроки эксплуатации закладных частей из чугуна могут быть продлены еще на 25 лет.

Одной из основных характеристик материала закладных частей и прочих деталей насосов водоснабжающих станций является их коррозионная стойкость.

В работе проведены сравнительные испытания коррозионной стойкости ЧПГ (плавка 2, см. табл. 1) и ЧШГ (плавка М1, см. табл. 1) применительно к условиям работы деталей насосов водоснабжающих станций канала им. Москвы.

Коррозионное поведение металла оценивали по результатам лабораторных испытаний и испытаний в естественных условиях гидроузла № 3 Яхромской насосной станции. При лабораторных испытаниях в качестве коррозионной среды использовали водопро-

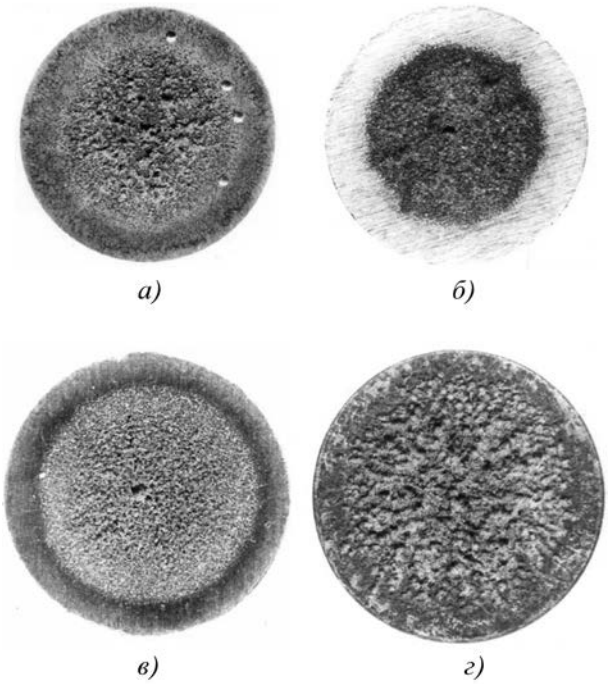


Рис. 1. Образцы после испытаний на кавитационную стойкость:
а – плавка 2, образец № 1; *б* – плавка М4Т, образец № 1; *в* – плавка К73, образец № 2; *г* – плавка М1Т, образец № 1

водную воду с [Cl] – 20...24 мг/кг при температуре 20...22 °С.

Исследовали плоские образцы размером 40×15×3 мм со шлифованными поверхностями. Образцы подвешивали в испытательном сосуде (ванне) при их полном погружении в раствор. В течение всего периода испытаний через раствор продувался воздух от компрессора. Общее время испытаний 3000...3400 ч с периодическим промежуточным отбором образцов (для построения кинетики процесса) через 250, 500, 1000 и 2000 ч. На каждый отрезок времени испытывалось не менее трех параллельных образцов. Скорость общей коррозии оценивали весовым методом после удаления продуктов коррозии. Пересчет потерь массы на проницаемость, мм/год, проводили по формуле

$$\Pi = \frac{K}{\gamma} 10^{-3} ,$$

где K – скорость коррозии, г/(м^2·год); γ – плотность металла, г/см^3.

Поскольку в реальных условиях в ряде узлов чугун находится в контакте со сталью 20, оценивали влияние такого контакта на коррозионное поведение чугунов. Контакт осуществлялся непосредственным соприкосновением разнородных материалов с одинаковым размером поверхности. При лабораторных испытаниях определяли также потенциал коррозии в водопроводной воде по отношению к каломельному электроду сравнения и изменение его во времени.

4. Химический состав воды насосной станции гидроузла № 3 канала им. Москвы (по данным Яхромского РГС)

Параметр	Значение
Водородный показатель pH, мг-экв/л	7,0
Общая жесткость, мг-экв/л	3,0...3,5
Содержание железа, мг/л	0,25
Азот солевого аммиака, мг/л	2,0
Азот нитридов, мг/л	0,001
Азот нитратов, мг/л	5,0
Хлориды, мг/л	18,0
Окисляемость натуральной пробы, мг O_2/л	1,6...3,2

В емкости гидроузла испытывали плоские образцы размером 50×100×4 мм. Время испытаний в этом случае составляло около 5000 ч. Испытывали образцы, полностью погруженные в среду, вне контакта и в контакте со сталью 20. Состав воды при испытании в естественных условиях в гидроузле приведен в табл. 4.

Продукты коррозии на образцах, прошедших испытания, удалялись сначала механически, а затем катодным восстановлением в расплаве щелочи и соды (60 % $CaCO_3$; 40 % NaOH) при плотности тока около 25 А/дм^2 в течение 3 мин.

В табл. 5 приведены результаты испытаний исследованных составов чугунов на общую коррозионную стойкость в лабораторных условиях.

Анализ этих результатов и визуальный осмотр поверхности образцов после испытаний и удаления продуктов коррозии (табл. 6) показали, что металлическая основа серого чугуна и легированного ЧШГ имеет в водопроводной воде при температуре 20...22 °С высокую скорость коррозии.

Не прослеживается разница в количественных характеристиках скорости коррозии (она находится в пределах разброса экспериментальных данных) и характера кинетики процесса во времени. Коррозионные потери за 3000 ч испытаний для обоих материалов равны ~400 г/м^2, и в пересчете на глубинный показатель скорости коррозии составляет ~140 мкм/год (пониженно стойкие материалы, балл 6).

6. Внешний вид чугунных образцов, испытанных в лабораторных условиях, после удаления продуктов коррозии

Материал	Испытания	
	на общую коррозию	при контакте со сталью 20
	в течение	
	3000 ч	3410 ч
ЧПГ	Потемневшая поверхность; протравлена структура образца; коррозия равномерная	Темная поверхность; протравлена структура; коррозия равномерная; по периферии контакта полосы повышенной травимости
ЧШГ	Почерневшая поверхность, протравлена структура; при увеличении ×25 обнаружено небольшое количество мелких очагов язвенной коррозии	Почерневшая поверхность; при увеличении ×25 наблюдается рельефная поверхность с вытравлением металлической фазы, очевидно, вблизи графитовых включений; на периферии контакта зона повышенной травимости

Кинетика коррозии металлов (рис. 2), свидетельствующей о том, что не наблюдается торможения процесса во времени, а лимитирующей стадией процесса является электрохимическая реакция, а именно – реакция кислородной деполяризации, что свойственно для непассивирующихся материалов в нейтральных аэрируемых электролитах, каким является водопроводная вода.

Внешний вид поверхности образцов после испытаний (см. табл. 6) подтверждает, что при воздействии этой среды на металле формируется толстый слой продуктов коррозии в виде гидрооксида железа

5. Результаты испытаний на общую стойкость ЧПГ и ЧШГ в водопроводной воде с продувкой воздуха при 20 °С

Длительность испытаний, ч	Убыль массы образцов		Скорость коррозии	
	г	г/м^2	г / (м^2·ч)	мкм/год
250	0,08803 / 0,08283*	57,6 / 53,8	0,230 / 0,215	258,8 / 241,8
500	0,14457 / 0,14508	101,3 / 94,3	0,203 / 0,189	227,7 / 213,6
1000	0,29093 / 0,26293	191,5 / 170,8	0,191 / 0,170	215,0 / 191,1
2000	0,45653 / 0,47618	297,0 / 309,4	0,148 / 0,154	166,7 / 173,2
3000	0,56568 / 0,60760	375,9 / 394,8	0,123 / 0,131	138,1 / 147,4

* В числителе приведены значения для серого чугуна, в знаменателе – для легированного чугуна.

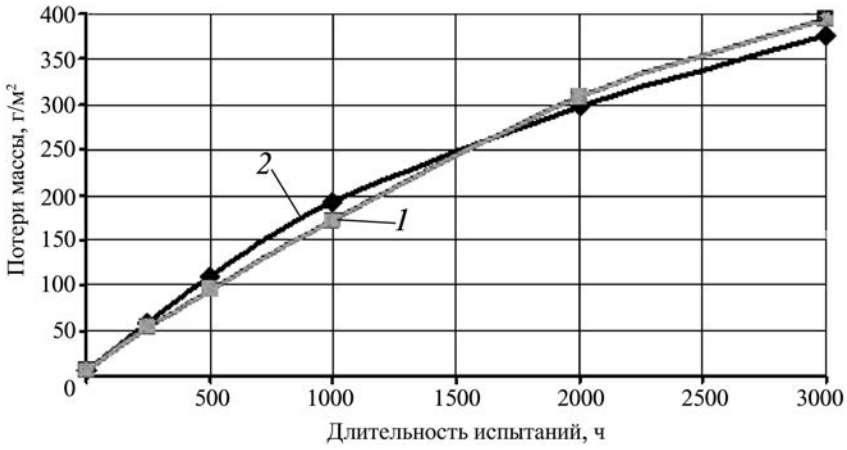


Рис. 2. Кинетика общей коррозии ЧШГ (*1*) и ЧПГ (*2*) в водопроводной воде при 20 °С с продувкой воздухом (лабораторные условия испытаний)

$Fe(OH)_3$, при этом верхний слой достаточно рыхлый и легкоудаляемый, а слой, находящийся в контакте с металлом, более плотный и трудноудаляемый.

Характер поверхности образцов после удаления продуктов коррозии свидетельствует, что она носит равномерный характер, со следами существенного растрава, на металле легированного чугуна обнаружены отдельные мелкие очажки язвенной коррозии.

Значения стационарных электродных потенциалов исследованных материалов в водопроводной воде практически одинаковы и равны 0,50...0,54 В (по отношению к насыщенному каломельному электроду сравнения). При выдержке в среде он несколько сдвигается в отрицательную сторону (за первые 10 ч) и до ~400 ч испытаний остается практически постоянным, равным 0,68...0,70 В.

Практически одинаковые значения скорости коррозии серого и легированного (содержащего Cu, Ti и V до 1 % каждого) чугунов обусловлены, по-видимому, тем, что в металле этих чугунов отсутствует хром, являющийся основным элементом, повышающим коррозионную стойкость. Содержание его в металле 0,05...0,08 %. Известно, что повышение коррозионной стойкости чугунов наблюдается только при 1,5 % Cr.

По кинетической зависимости скорости коррозии (см. рис. 2) получено уравнение

$$Ó = K_1 \tau,$$

где У – убыль массы, г/м^2; K_1 – постоянный коэффициент, равный 0,15; τ – время, ч.

По уравнению рассчитана убыль массы и глубинные показатели скорости коррозии за отдельные отрезки времени испытаний, и проведена экстраполяция на срок до 30 лет. Как видно из табл. 7 сходимость результатов расчета и экспериментальных данных удовлетворительная, не превышает 15 %, находится в пределах разброса экспериментальных данных, по которым строилась зависимость.

Исходя из расчета, убыль массы металла за 10 и 30 лет составит 13 140 и 39 420 г/м^2 соответственно, что в пересчете на абсолютную величину утонения образцов равно 2 и 6 мм.

Результаты оценки влияния контакта со сталью 20 на коррозионную стойкость исследованных составов чугунов в водопроводной воде приведены в табл. 8.

Контакт чугуна со сталью 20 при отношении поверхностей 1:1 вызывает увеличение скорости коррозии как ЧПГ, так и легированного ЧШГ в 1,2–1,3 раза, т.е. в этой коррозионной паре более электроотрицательной составляющей является чугун, однако эффективность работы пары невелика. Это подтверждается и значениями электродных потенциалов металлов. Для чугунов, как было указано ранее, они лежат в пределах 0,50...0,54 В (НКЭ), для стали 20 – 0,44...0,46 В (НКЭ).

Контакт чугуна со сталью 20 не изменяет и характера процесса во времени: кинетика и в этом случае описывается прямой, а экспериментальные значения

7. Экспериментальные и расчетные характеристики коррозионной стойкости

Длительность испытаний, ч	Потери массы, г/м^2		Глубина коррозии, мм	
	эксперимент*	расчет	эксперимент	расчет
250	54	38	0,005	0,0045
500	94	76	0,012	0,0100
1000	171	152	0,021	0,0190
2000	309	304	0,040	0,0380
3000	395	456	0,050	0,0760
10 лет (87 600 ч)	–	13 140	–	2,0
30 лет (262 800 ч)	–	39 420	–	6,0

* Экспериментальные данные по результатам испытания серого чугуна в водопроводной воде с продувкой воздухом.

8. Результаты испытаний ЧПГ и ЧШГ на коррозионную стойкость в условиях контакта со сталью 20 в водопроводной воде с продувкой воздухом при 20 °С

Материал	Длительность испытаний, ч	Убыль образцов		Скорость коррозии	
		г	г/м^2	г / (м^2·ч)	мкм/год
ЧПГ	250	0,023	71,1	0,29	324,8
	500	0,040	120,4	0,24	273,4
	1000	0,063	189,0	0,19	212,8
	2250	0,164	490,4	0,22	245,4
	3410	0,206	615,2	0,179	201,0
ЧШГ	500	0,052	157,3	0,310	352,3
	1500	0,104	313,8	0,208	234,3
	3410	0,317	638,8	0,187	209,8

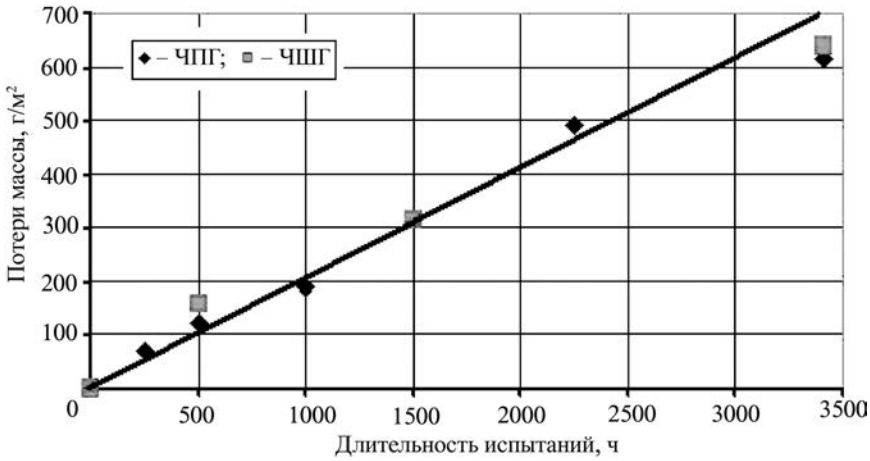


Рис. 3. Кинетика коррозии ЧПГ и ЧШГ в водопроводной воде с продувкой воздухом при 20 °С в условиях контакта со сталью 20 (лабораторные условия испытаний)

коррозионных потерь серого и легированного чугунов укладываются на одну прямую (рис. 3).

Некоторой особенностью поведения чугунов в водопроводной воде в условиях контакта со сталью 20 является наличие полос повышенной травимости по периферии контактирующих поверхностей (см. табл. 6). Полученные результаты позволяют заключить, что контакт разноименных металлов не приводит к существенному изменению коррозионного поведения чугунов и не дает как и при испытании вне контакта существенных преимуществ низколегированного чугуна по сравнению с ЧПГ.

В табл. 9, 10 и на рис. 4 приведены результаты испытаний, проведенных в условиях гидроузла. Коррозионные потери металла в этом случае существенно меньше, чем при лабораторных испытаниях. За 3000...3120 ч – в 2,5 раза. Поскольку первый отбор образцов проводился только через 3000 ч, кинетика начального периода коррозии не определена; в интервале 3000...5000 ч она носит характер, описываемый прямой с малым наклоном к оси абсцисс (см. рис. 4).

Прослеживается некоторая незначительная разница в коррозионной стойкости исследованных составов чугунов: скорость коррозии легированного на

9. Результаты испытаний ЧПГ и ЧШГ на общую коррозионную стойкость / коррозионную стойкость в контакте со сталью 20 в условиях гидроузла № 3 канала им. Москвы

Материал	Длительность испытаний, ч	Убыль массы		Скорость коррозии	
		г	г/м^2	г / (м^2·ч)	мкм/год
ЧПГ	3120	1,625 / 0,34	148,6 / 270,1	0,047 / 0,082	53,4 / 92,7
	3790	1,896	173,8	0,046	51,4
	4760	1,928 / 0,37	177,1 / 294,0	0,037 / 0,061	41,4 / 68,6
ЧШГ	3120	1,212 / 0,27	118,5 / 220,0	0,033 / 0,070	39,8 / 78,4
	3790	1,394	128,2	0,034	37,9
	4760	1,467 / 0,33	134,8 / 261,8	0,028 / 0,055	31,3 / 61,5

10. Внешний вид чугунных образцов, испытанных на гидроузле №3 канала им. Москвы, после удаления продуктов коррозии

Материал	Испытания	
	на общую коррозию	при контакте со сталью 20
	в течение 4760 ч	
ЧПГ	Структура протравлена. Поверхность с темными матовыми пятнами, количество которых больше, чем на образцах высокопрочного чугуна	Характер поверхности идентичен описанному после испытаний на общую коррозию без контакта. По периферии зоны повышенной травимости
ЧШГ	Местами протравленная структура в виде более темных пятен; при увеличении ×25 наблюдается рельефная поверхность с вытравливанием металлической основы, очевидно, вблизи графита.	

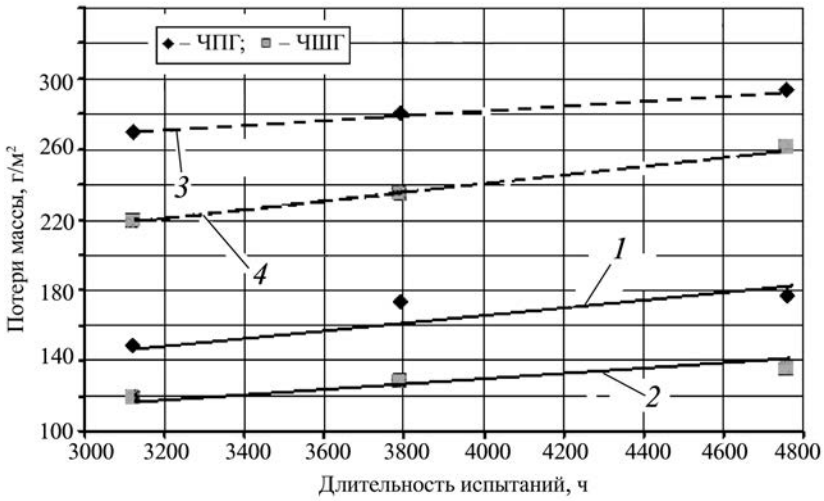


Рис. 4. Коррозионная стойкость ЧПГ и ЧШГ, испытанных в гидроузле канала Москва–Волга:
1, *2* и *3*, *4* – испытания вне контакта и в контакте со сталью 20 соответственно

~10...12 мкм/год меньше. Состояние поверхности образцов после испытаний и удаления продуктов коррозии свидетельствует о том, что она носит равномерный характер (см. табл. 10).

По количественным показателям скорости коррозии в условиях воздействия воды канала чугуны исследованных составов согласно десятибальной шкалы коррозионной стойкости могут быть отнесены к группе – стойкие материалы, балл 5. Более низкие значения коррозионной стойкости металла при испытании гидроузла по сравнению с испытаниями в лабораторных условиях, по мнению авторов статьи, обусловлены меньшей концентрацией хлоридов в среде и меньшей скоростью движения воды в емкости, что может приводить к концентрационной поляризации процесса.

На основании полученных результатов можно сделать следующее заключение:

• серый чугун после 50-летней эксплуатации, исследованный в водопроводной воде и воде канала им. Москвы на базе 3000...5000 ч испытаний имеет скорость коррозии 0,2 мм/год (пониженно стойкие материалы, балл 6);

• экстраполяция скорости коррозии по установленной закономерности показала, что возможное утонение стенки конструкции из чугунов за 30 лет составит не более 6 мм;

• контакт чугуна со сталью 20 приводит к увеличению скорости коррозии в ~1,7–2,0 раза и локальному местному повышению травимости металла;

• ЧШГ исследованного состава не имеет существенных преимуществ по сравнению с серым чугуном в отношении коррозионной стойкости в воде при температуре 20 °С.

Экстраполяция глубины поражения проведена на основе результатов, полученных в более жестких по сравнению с эксплуатационными условиями по [Cl] в среде и с учетом предполагаемого повышения мощности насосных агрегатов, поэтому реальные потери металла от коррозии при длительной эксплуатации оборудования будут заведомо ниже.

Василий Иванович Куликов,
канд. техн. наук;
Алексей Иванович Беляков,
канд. техн. наук,
первый зам. генерального директора,
bai49@mail.ru;
Людмила Ивановна Аксёнова,
канд. техн. наук

УДК 621.74

С.С. Ткаченко, В.С. Кривицкий *(Ассоциация литейщиков Санкт-Петербурга и Ленинградской области)*

Станкостроение и модернизация литейного производства

Представлено на сегодняшний день состояние литейного производства в станкостроительной промышленности России. Даны мероприятия по модернизации литейного производства современными оборудованием и наукоемкими технологиями, позволяющими повысить качество и выпуск широкого спектра отливок.

The article describes the current condition of the casting industry for the tool machine manufacturing complex in Russia. In further lists steps to be taken for the modernization of said casting industry via purchase of modern equipment and high technologies, which shall render possible quality improvements and the production of wide range of castings.

Ключевые слова: модернизация; литейное производство; изготовление форм; научные и инженерные кадры.

Keywords: modernization; casting industry; form preparation; scientific and engineering personnel.

Модернизация экономики в посткризисный период стала сегодня национальной идеей. Суть модернизации заключается в развитии инновационных процессов, новых технологий выпуска продукции высокого качества по самым передовым стандартам. В конечном итоге – создание конкурентоспособной экономики. Модернизация связана с подъемом внутренней обрабатывающей промышленности и совокупного спроса, интенсивным созданием новых рабочих мест [1].

Роль и значение машиностроения в промышленном развитии трудно переоценить. Это базовая отрасль промышленности. В машиностроении закладывается максимальная добавочная стоимость и производительность. Удельный вес машиностроения в структуре промышленного производства западных стран составляет от 37 до 50 %, в России около 20 %.

Механообработка является основным способом создания большинства изделий и будет таковой еще долгое время. Сегодня невозможно изготовить ни самолет, ни комбайн, ни автомобиль без современного станка или инструмента. Конкурентоспособность машиностроения и промышленности напрямую зависит от качественного и количественного состояния имеющегося парка металлообрабатывающего оборудования (МОО).

Реальная ситуация в промышленности такова, что, учитывая количественный состав парка (более 1,5 млн ед. станков и прессов) и его возрастной состав (70 % эксплуатируется 15–20 лет и более), отрасль стоит на пороге лавинообразного нарастания спроса на МОО.

Пятнадцатилетнее падение спроса на металлообрабатывающее оборудование привело еще и к технологическому отставанию в российском станкостроении и снизило конкурентоспособность выпускаемой продукции. Если в 1990 г. Россия занимала 3-е место в мире по производству станкостроительной продукции, то сейчас лишь 22-е. За эти годы отрасль потеряла около 40 профильных известных заводов, институтов и конструкторских бюро (ЛСПО им. Свердлова, Центролиты, Гипростанок, Оргстанкинпром, ПТИлитпром, ВНИИлитмаш, НИИСЛ и др.) [2].

"Переоснащение отечественной промышленности, конечно, невозможно без развития нашего российского станкостроения. И любая попытка решить эту проблему только исключительно за счет импорта, естественно, подрывает и экономическую, и технологическую безопасность нашей страны" (С.Б. Иванов – заместитель председателя правительства РФ).

Решение этой задачи возможно лишь благодаря приоритетному развитию инновационных технологий, для чего необходимо значительное увеличение объема инвестиций в науку (исследования и разработки, создание новых машин, оборудования и технологий, проектно-конструкторские разработки, приобретение патентов или лицензий, программных продуктов, обучение и подготовка кадров).

В США на науку выделяется более 3 % от ВВП страны, в России 0,5 %. США ежегодно вкладывает в НИОКР свыше 280 млн дол., страны ЕС – около 190, Япония – более 100, Китай – 60, Германия – 54, Россия – 6. Доля России – 0,3 % мирового рынка наукоемкой продукции (США – 36 %; Япония – 30 %; Германия – 9,5 %; Китай – 6 %) [3].

Несмотря на обвальное снижение инвестиций в науку, разрушение связей науки с производством в стране сохраняется некоторый уникальный научно-технический и образовательный потенциал, однако эффективность его практического использования для создания национальной инновационной системы крайне низка. За 1990-е годы более чем вдвое сократился объем работ, выполненных научными организациями по основному профилю. Новых владельцев предприятий интересовало не развитие и обновление производства, а получение максимальной прибыли, в том числе путем передачи в аренду и продажи основных фондов в ущерб основному производству.

В соответствии со "Стратегией развития станко-инструментальной промышленности России до 2015 г." выпуск МОО и КПО к 2012 г. должен быть увеличен в 4 раза (25 тыс. ед. МОО и 10 тыс. ед. КПО). По укрупненным расчетам для этого потребуется 420...430 тыс. т чугунных и 150...160 тыс. т стальных отливок, т.е в 3 раза больше производственных возможностей литейных цехов отрасли, для модернизации которых проекты еще не разрабатывались.

При выборе стратегии развития отрасли приходим к выводу: начинать надо не с обрабатывающих мощностей, а с обновления литейного производства как базового. При ны-

нешней промышленной политике обрабатывать скоро будет нечего. Уже сегодня многие станкозаводы перешли на ремонт и модернизацию станков с использованием базовых чугунных отливок или списываемого оборудования (станин, стоек, траверс, столов, саней и др.). Такие приоритеты косвенно подтверждают Турция, Китай, Бразилия, Польша и другие страны, резко увеличившие экспорт отливок.

Необходима реформа литейного производства. Возрождение литейного производства станкостроения нужно начинать с модернизации литейных производств ОАО "Сиблитмаш", Ивановского завода тяжелых станков, Воронежского завода "Тяжмехпресс", Савёловского машзавода, Рязанского станкозавода, Рязанского завода "Тяжпрессмаш", Новосибирского "Тяжстанкогидропресс" и др., имеющих богатый опыт изготовления сложных базовых отливок для отрасли на основе инновационных технологий, создания литейных комплексов с применением преимущественно отечественного литейного оборудования фирм "Сиблитмаш", "РЭЛТЭК", "Литаформ", "Амурлитмаш", "ЭКТА" и др.

Ряд образцов отечественного литейного оборудования уже сегодня отвечают критериям модернизации. Формовочные линии и машины, не уступающие по качеству и производительности зарубежным аналогам, серийно производятся на заводе "Сиблитмаш", индукционные печи промышленной частоты емкостью до 10 т изготовляет в Екатеринбурге компания "РЭЛТЭК", эти печи по многим технико-экономическим показателям превосходят печи передовых западных фирм и т.д.

Проведение реформы литейного производства не терпит отлагательств: около 80 % оборудования эксплуатируется более 20 лет, современное оборудование (преимущественно импортное) составляет всего 6 % от парка, основными плавильными агрегатами остаются вагранки (67,5 %), индукционные печи составляют около 30 %, дуговые электропечи – 2,5 %. Более 70 % литейных цехов – это мелкосерийное производство отливок с выпуском до 5 тыс. т в год и преобладанием ручного труда.

Определяющим в модернизации литейного производства является повышение качества продукции. Накануне вступления России во Всемирную торговую организацию (ВТО) необходимо адаптироваться к мировым стандартам, чтобы продукция отрасли стала конкурентоспособной по показателям "цена – качество – безопасность". Достижение этой цели возможно благодаря внедрению инновационных технологий в литейном производстве, реализации имеющегося потенциала.

По уровню производительности труда Россия отстает от США и Евросоюза в 4 раза, ресурсоемкость продукции и технологий в основных отраслях промышленности в среднем выше в 3–7 раз, чем в США и других индустриально развитых странах, а энергоемкость – почти в 3 раза [4].

Наибольший вклад в обеспечение безопасности, ускорение экономического роста, повышение конкурентоспособности продукции могут внести информационные технологии.

Компьютерное проектирование позволяет устранить все нестыковки в организации литейного производства. Автоматизированное моделирование литейных процессов дает возможность выявлять различные дефекты, остаточные напряжения, деформации отливок, определять объемную усадку; оптимизировать литейно-питающую систему, размеры и места установки прибылей; рассчитывать и минимизировать остаточные напряжения и деформации. Например, система автоматизированного моделирования (САМ) на заводе "Промлит" (Чебоксары) позволила снизить трудоемкость разработки литейной технологии в 2–5 раз, а ее длительность – в 3 раза; материалоемкость каждой отливки – на 10...50 %, энергоемкость производства и цеховую себестоимость при производстве каждой отливки – на 50 %, долю брака довести до 0,5 % [5].

Прорывное направление использования САМ в далекой перспективе – сохранение в системе управления литейным оборудованием технологического режима для каждой отливки. Это станет возможным по мере стирания граней по серийности благодаря использованию быстросменной оснастки.

Повсеместное применение компьютеров качественно повышает значимость творческого труда, связанного с нелогичным мышлением, основанном не на последовательных логических умозаключениях, а на озарениях, на мышлении не тезисами, а образами. Ведь компьютер предельно формализует логическое мышление и доводит его до совершенства, не доступного человеку [6].

Мощным фактором модернизации является реализация стратегии энергоэффективности и энергосбережения.

Оптимизация и повышение эффективности производства позволяют получить значительную экономию, соизмеримую с фондом оплаты труда персонала предприятия. Все это невозможно без применения новейших технологических разработок.

Общим для любых промышленных предприятий потенциалом в сокращении расходов (и особенно в литейном производстве) являются главным образом затраты на тепловую и электрическую энергию, а также на другие расходуемые ресурсы в зависимости от технологии производства (воды, топлива, материалов).

Оптимизация процессов позволяет сократить потребление энергии и ресурсов, уменьшить расходы на обслуживание, высвободить дополнительные площади, а также повысить надежность и качество работы инженерных и технологических систем. Сокращаются аварийность и простои на ремонт [7].

В литейном производстве имеются огромные резервы экономии металла (в среднем коэффициент использования металла по стране не превышает 0,6). Существенным ресурсом является уменьшение металлоемкости машин и оптимизация их структуры, сокращение отходов и потерь металла в процессе его кругооборота, снижение расхода металла на ремонтные нужды и нужды обороны.

Внедрение стратегий энергоэффективности и энергосбережения за счет ядерных, космических, медицинских технологий, стратегических информационных технологий и др. позволит сократить расход ресурсов не менее чем в 2 раза в экономике страны. Внедрение энергосберегающих технологий – это одновременно и усиление конкурентоспособности страны и важнейшая экологическая задача.

Одна из главных причин ухудшения экологической обстановки в нашей стране заключается в том, что на единицу конечной продукции потребляется в несколько раз больше сырья, материалов, воды, чем в развитых странах.

По степени ущерба, наносимого окружающей среде, литейно-металлургический комплекс занимает второе место среди отраслей промышленности после топливно-энергетического комплекса. Ухудшение качества окружающей среды ведет к заболеванию населения. По мнению медиков, более половины всех болезней вызывается вредным воздействием химических, физических и биологических факторов среды. Нет сомнений, что охрана окружающей среды является важным фактором развития литейного производства.

Сформировалось два направления охраны окружающей среды: восстановление экологического равновесия, т.е. строительство природоохранных объектов, создание газоводоочистных сооружений при модернизации основных производственных фондов – и предупреждение нарушения экологического равновесия путем рационального природопользования.

При этом решающая роль отводится малоотходным и безотходным технологиям, обеспечивающим охрану природы на более высоком качественном уровне.

"Устойчивое развитие – это гармоничное экономическое развитие, удовлетворяющее принципам социальной справедливости и экологической ответственности"(формулировка ООН).

Модернизация литейного производства должна быть направлена не только на решение экономических проблем, но и не в меньшей степени на создание комфортных условий для существования и деятельности человека. Это является серьезной проблемой. При производстве 1 т отливок из чугуна и стали выделяется около 50 кг пыли, 250 кг оксида углерода, 1,5...2,0 кг оксида серы, 1 кг оксида углеводородов и образуется до 5 т твердых песчаных отходов.

К мероприятиям по модернизации могут быть отнесены:

- *на плавильных участках* – замена вагранок индукционными печами (при этом объем вредных выбросов сокращается: пыли и углекислого газа – в 13 раз, двуоксида серы – в 30 раз), применение для плавки чугуна и стали дуговых печей постоянного тока с одним электродом сокращает пылевыделение в 2 раза;
- *на формовочных и стержневых участках* – создание и применение малотоксичных и нетоксичных составов смесей;
- *на обрубноочистных участках* – повышение эффективности работы вентиляционных систем и утилизация твердых отходов.

Из перечисленных мер следует особо выделить меры по экологической безопасности на стержневых участках, которые используют синтетические смолы в качестве связующих. По экспертным оценкам сегодня эти технологии дают до 70 % загрязнений природной среды от литейных цехов. При нагреве форм и стержней в интервале 400...800 °С наблюдается интенсивное выделение фенола, бензола, толуола, крезола, формальдегида, аммиака и других газов, которые в интервале температур 800...1200 °С приводят к образованию углекислого газа, оксидов углерода, углеводородов, двуоксида серы и азота [8]. Особо опасен канцерогенный бензопирен, который вызывает генные мутации и раковые заболевания (он образуется при неполном сгорании топлива) [9].

Синтетические смолы соответствуют технологическим требованиям и преобладают в результате экспансии зарубежных фирм в большинстве крупных литейных цехов, но не отвечают критериям модернизации или требуют больших инвестиций для приведения технологии и оборудования к экологическим нормативам, которые неподсильны большинству литейных цехов небольшой мощности, которые преобладают в стране.

Будущее за связующими неорганического происхождения (НОС). Это объясняется гарантированным наличием сырьевых материалов в промышленном объеме, минимальным воздействием на окружающую среду в результате исключения отходов и возможности их повторного использования, разнообразия способов отверждения при изготовлении форм и стержней, улучшения условий труда на рабочих местах в связи с отсутствием выбросов в атмосферу, конденсатов и запахов, высокой термостабильности [10].

Исследования последних лет в Германии и России подтверждают эту тенденцию (система "Кордис", металлофосфатные смеси, жидкостекольные смеси, неорганические связующие на основе сульфата магния и др.). Особенного внимания заслуживает жидкое стекло в качестве связующего. Возможности этой технологии далеко еще не исчерпаны. Долгие годы наша страна была лидером по ее применению. Использование новых методов отверждения ортосиликатов натрия газом, эфирами или кислотами позволяет считать этот процесс перспективным [11].

Опыт применения жидкостекольных смесей наработан, механизм формирования прочности изучен досконально, объемы производства литых заготовок по этой технологии значительны и будут возрастать по мере увеличения спроса при выходе из кризиса.

Другим удачным примером разработки смесей этого класса является применение связующих на основе алюмоборфосфатного концентрата. Эта разработка ПТИлитпрома (Санкт-Петербург) внедрена для производства отливок из разных сплавов на 40 заводах и получила название "ФОСКОН-процесс". Выявленные в процессе внедрения недостатки – низкая агрегативная устойчивость, приводившая к выпадению конденсата при длительном хранении стержней и повышению в связи с этим расхода связующего, в дальнейшем были ликвидированы при разработке связующего "ФОСЛИТ-1" (ТУ 2148-279-10964029–2007), получившего название "Гамма-М-ФОСКОН-процесс" (прочность смесей в отвержденном состоянии возросла на 10...15 %, расход связующего снизился на 5...8 % [12].

Критериям модернизации в полной мере соответствует вакуумно-пленочная формовка (ВПФ), которая за последние годы за рубежом перешла из разряда специальных видов литья в основные способы производства отливок в разовые песчаные формы, а в России бурно развивается для производства отливок из чугуна и стали различной серийности.

Технология ВПФ бесшумная и самая экологически чистая, так как во время заливки и охлаждения формы постоянно находятся под вакуумным отсосом всех выделяемых газов из герметично закрытой пленкой формы, что позволяет их централизованно утилизировать. Новые процессы отверждения форм "без связующих" обратимы, т.е. после отключения источника приложения силы уплотнения формовочный материал приходит в исходное состояние [13].

На государственном уровне важным направлением модернизации продекларированы нанотехнологии. Считается, что становление наноидустрии будет способствовать решению таких проблем человечества, как энергетическая, экологическая и продовольственная безопасность, качество жизни, образования и общественного управления.

Суть нанотехнологий – в возможности манипулировать отдельными атомами и молекулами веществ, перемещая их в микропространстве, соединяя элементы в определенном порядке по замыслу исследователя. Для наблюдения за этим процессом применяют растровые электронные микроскопы отечественного производства, "туннельные" микроскопы с увеличением до 70 млн крат [14].

Уже сейчас нанотехнологии позволяют получать материалы с принципиально улучшенными свойствами, многократно повышать эффективность процессов, создавать оборудование для тонких и высоких технологий со значительно меньшими удельными издержками, чем у аналогов при производстве традиционными способами [15].

Литейщики с 1970-х годов начали заниматься применением ультрадисперсных материалов, имея в виду известное физическое явление, что упрочняющие свойства материа-

лов возрастают с уменьшением диаметра составляющих, соответственно увеличиваются удельная поверхность, реакционная способность и т.д. Такой подход применялся для повышения качества формовочных смесей, огнеупорных покрытий, повышения свойств литейных сплавов.

Сегодня научные разработки направлены на получение наноразмерных материалов (нанометр (нм) – одна миллиардная часть метра, мера величины атомов и молекул), методов их применения, способов ввода в расплав, изучение механизма их воздействия на качественные характеристики материала или готовой отливки. Учитывая высокую стоимость получения наноразмерных материалов, их применение в литейном производстве целесообразно в качестве микродобавок к базовым материалам и сплавам для повышения их физико-механических, химических и эксплуатационных свойств. Эти направления научных разработок являются перспективными и экономически целесообразными при решении проблемы модернизации литейного производства [16].

Одной из главных проблем модернизации литейного производства является отсутствие эффективной системы подготовки кадров.

Между тем технологический разрыв между Россией и экономически высокоразвитыми зарубежными странами не только возрастает, но принимает угрожающие размеры, что обостряет проблему обеспечения технологической безопасности России. Только возрождение национальной экономики может остановить деградацию кадрового потенциала.

В создавшейся обстановке большую ответственность несут вузы и система профессионального образования. Модернизация требует новых кадров, что не произойдет без реформы образования в стране. По экспертным оценкам научно-исследовательскую деятельность осуществляют лишь 20 % вузов страны. Основным видом их деятельности остается образовательная, а научной деятельностью профессорско-преподавательский состав вузов занимается по "остаточному принципу". Необходимо коренным образом изменить структуру учебно-методической загрузки преподавателей, чтобы они больше времени посвящали науке [17].

Модернизация в этой сфере связана с системой непрерывной подготовки специалистов по управлению в сфере инновационной деятельности, с формированием механизма общественно-профессиональной аттестации учебных и научных программ, что позволит обеспечить необходимое качество подготовки кадров, создать систему аттестации специалистов. За рубежом наиболее эффективным способом финансирования инноваций является частногосударственное партнерство (до 30 % инвестиций идет на образование).

Становится очевидным, что система образования должна носить инновационный характер путем внедрения новейших образовательных технологий, развития интерактивных форм обучения, широкого использования оригинальных методов, позволяющих имитировать реальные ситуации (моделирование). Инновационный характер обучения предполагает глубокую интеграцию образования, науки и бизнеса [18].

Для среднего профессионального образования характерно резкое (в 2 раза) сокращение числа ПТУ и техникумов, где половина специальностей с производством уже не связана. Назрела реформа и среднего профессионального образования. Выход – в развитии бакалавриата, специализированных технических колледжей и ПТУ, обучение на специализированных курсах при заводах.

Сложная ситуация с подготовкой инженерных кадров и управленцев в литейном производстве ставит на повестку дня вопрос о необходимости вернуться к справедливой и проверенной временем практике отработки на производстве по полученной специальности в течение 2–3-х лет выпускниками вузов, обучавшихся за счет госбюджета.

Не исключен возврат к практике 1940–1950-х годов подготовки рабочих по литейной специальности через сеть двухгодичных образовательных центров или шестимесячных подготовительных курсов при литейных предприятиях.

Принятый закон об организации малых предприятий при научно-исследовательских организациях и вузах страны (июль 2009 г.) может стать эффективным средством привлечения молодежи к инновационным технологиям. При поддержке государства эти производства могут в короткие сроки адаптироваться к послекризисной ситуации и реализовать достижения научно-технического прогресса.

В нашу жизнь постепенно внедряется понятие "неоиндустриализация" как конечная цель модернизации производства и экономики. Оно означает такое масштабное технологическое перевооружение народного хозяйства, которое позволяет автоматизировать наши производительные силы, поднять удельный вес автоматизированных и компьютеризованных рабочих мест в экономике до уровня передовых индустриально развитых держав мира – и на этой основе резко нарастить конкурентоспособность отечественного производства товаров и услуг, увеличив заодно и качественно обновив оборонный потенциал страны [19].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Петраков Н.** Пути преодоления экономического кризиса // Экономист. 2009. № 7.
2. **Самодуров Г.В.** Государственная поддержка как фактор честной конкуренции // Индустрия. 2007. № 5.
3. **Кучуков Р.** Модернизация экономики: проблемы и задачи // Экономист. 2010. № 1.
4. **Сидоренков С.И.** Сокращение расходов как разумная альтернатива сокращению штатов // Индустрия. 2009. № 1.
5. **Макалин В.** Опыт применения систем моделирования литейных процессов // Литейное производство. 2010. № 2.
6. **Никитин А.** Кризис...сознания // Санкт-Петербургские ведомости. 2009 г. 1 июня.
7. **Иванцова Н., Хатрутдинов Р.** Ресурсосбережение и экологическая политика в металлургическом комплексе // Вопросы экономики. 1990. № 11.
8. **GISSEREI.** 2001. № 7.
9. **Платонов Б.П., Шапошников Ю.К., Маслова О.В., Степанова М.И.** // Литейное производство. 1989. № 2.
10. **GIFA 2007.** Изготовление форм и стержней с использованием химически отверждаемых связующих (раздел НОС) // Литейное производство. 2008. № 5.
11. **Фирстов А.П.** Об отверждении жидкостекольных связующих // Литейное производство. 2009. № 12.
12. **Ткаченко С.С., Кривицкий В.С.** Пути возрождения литейного производства станкостроения // Литейщик России. 2010. № 2.
13. **Буданов Е.Н.** Современные тенденции развития и применения основных технологий литья в разовые песчаные формы // Труды 8-го съезда литейщиков России. Т. 2. Ростов-на-Дону, 2007.
14. **Рыбкин В.А.** Направления развития технологий специальных способов литья. Раздел "Нанотехнологии в литейных процессах" // Литейное производство. 2010. № 2.
15. **Иншаков О., Фесин А.** О приоритете государства в сфере наноиндустрии // Экономист. 2009. № 10.
16. **Мамина Л.И., Дибров И.А.** Опыт и перспективы освоения нанотехнологий в литейном производстве // Литейщик России. 2009. № 7.
17. **Тодосийчук А.** Условия перехода к инновационной экономике // Экономист. 2010. № 2.
18. **Кечин В.А.** Современные проблемы и пути развития литейного профессионального образования // Литейщик России. 2009. № 4.
19. **Нешитой А.** К новой модели экономического развития–воспроизводственный аспект // Экономист. 2010. № 2.

Станислав Степанович Ткаченко, д-р техн. наук
execute@souzlit.ru;
Вилен Семёнович Кривицкий, канд. техн. наук

УДК 621.79:669.017

В.И. Муравьёв, В.А. Ким, А.В. Аксёнов
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)

Автоматическая аргонодуговая сварка труб из алюминиевого сплава АМг3М

Сварка тонкостенных труб характеризуется неоднородностью структуры и геометрических размеров сварного шва, вызванной динамикой развития температурного поля на замкнутой цилиндрической поверхности. Изменение сварочного тока по мере наложения сварного шва повышает его структурную стабильность и геометрическую точность. Даны рекомендации по разбивке траектории сварочного шва на сегменты, в пределах которых сварочный ток остается постоянным.

Welding of thin-walled pipes is characterized by heterogeneity structure and the geometrical sizes of the welded seam, caused dynamics of development of temperature field on the closed cylindrical surface. Variation welding currents in process of imposing of welded raises its stability of structures and geometrical accuracy. Recommendations about division of trajectory of welded on segments in which limits the size of welding current remains constant are made.

Ключевые слова: дуговая сварка; сварной шов; сила тока; режимы сварки; геометрические отклонения; микроструктура; предел прочности.

Keywords: arc welding; welded; current strength; welding modes; geometrical deviations; microstructure; ultimate strength.

Структура сварного шва отличается неоднородностью и высокой плотностью дефектов кристаллического строения, образующих концентраторы напряжений микро-, мезо- и макромасштабных уровней, которые в процессе эксплуатации изделия проявляются в повышенной хрупкости, пониженной химической, коррозионной стойкости и прочности. Основным фактором, влияющим на процессы формирования структуры сварного шва, является динамическое тепловое поле, развиваемое под действием электрической дуги. Скорость распространения теплоты превышает скорость перемещения дуги относительно свариваемого изделия, поэтому развитие структуры и зоны термического влияния на каждом участке сварного шва происходит при разных значениях температур и их градиентов [1].

При сварке прямолинейных швов на плоской поверхности максимальный градиент температуры и минимальное значение самой температуры возникают в начале сварного шва, затем наблюдается незначительный рост температуры и снижение его градиента. При сварке трубчатых изделий температура по мере перемещения дуги возрастает более активно, так как распространение теплоты от электрической дуги происходит по замкнутой цилиндрической поверхности, при этом наблюдается более резкое снижение градиента температуры. С уменьшением диаметра и толщины стенки трубы повышается степень изменения характеристик температурного поля (Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.)

Разные температуры и их градиенты вызывают развитие не только различных структур на отдельных участках сварного шва, но и влияют на его геометрические характеристики, такие как ширина и высота усиления сварного шва, а также ширина и глубина проплава.

В статье представлены результаты исследований по повышению стабильности структуры и геометрических характеристик сварного шва за счет управления силой тока в процессе автоматической сварки трубчатых изделий.

Методика исследования. Исследования проводили при сварке труб из алюминиевого сплава АМг3М диаметром 18...63 мм с толщиной стенки 1,0...1,5 мм. В качестве присадочного материала применяли проволоку диаметром 1,2 мм из материала АМг3Н. Процесс осуществляли на установке аргонодуговой сварки Orbimat 300 AC/DC с предварительным подогревом образцов до 100...150 °С.

Сварной шов накладывали за один оборот с небольшим нахлестком для исключения непровара. При этом сварочный шов разбивали на несколько равных сегментов без учета нахлестка. Нахлесток наносили поверх первого сектора и он соответствовал центральному углу ~15°.

Сварку вели на режимах, при которых сила тока менялась ступенчато с переходом от одного сегмента сварного шва к другому, число основных сегментов в зависимости от диаметра трубы – от 1 до 4. На рис. 1 представлена токовая диаграмма процесса при разбивке сварного шва на 4 основных сегмента и нахлест-

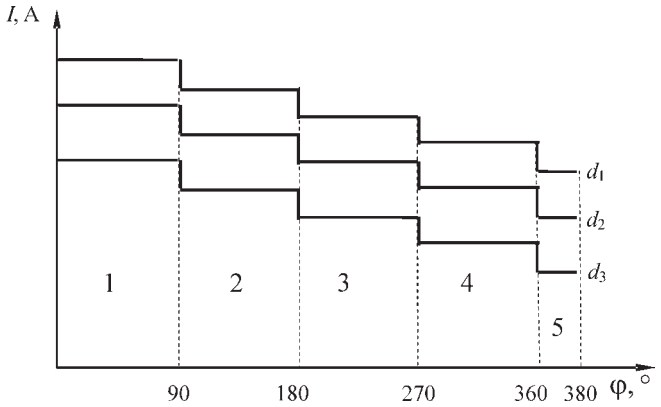


Рис. 1. Токовая диаграмма цикла сварки при разбивке сварного шва на пять сегментов при различных диаметрах трубы; $d_1 > d_2 > d_3$

ка (сегмент 5), при этом подача сварочной проволоки и скорость сварки оставались постоянными.

Геометрические размеры сварного шва измеряли штангенциркулем TESA®CCMA-M(0.510008) и инструментальным микроскопом УИМ-21. Замеры проводили на четырех участках, расположенных равномерно по дуге сварного шва от точки начала процесса, контролируемые параметры поперечного сечения шва показаны на рис. 2. Высота усиления и глубина проплавления могут принимать отрицательные значения в случае образования провалов. По результатам замеров вычислили абсолютные отклонения геометрических характеристик сечения сварного шва и их сумму, представляющую комплексный показатель геометрической однородности

$$K_{\text{ã}} = \Delta l + \Delta l_1 + \Delta q + \Delta q_1 .$$

Микроструктуру определяли на металлографическом микроскопе МИКРО-200 при 400- и 1000-кратном увеличении. Количественные показатели микроструктуры рассчитывали с помощью программы обработки изображений Image.Pro.Plus.5.1. Измеряли: фрактальную размерность границ раздела ($D_г$), периметр ($P_з$) и площадь ($S_з$) каждого зерна или другого микроструктурного образования, а также их общее количество (N), зафиксированное в зоне видимости оку-

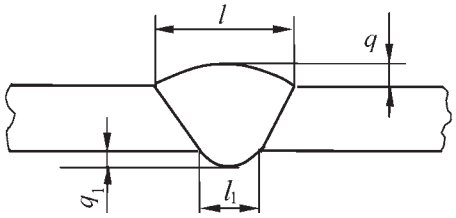


Рис. 2. Геометрические параметры сечения сварного шва:
l – ширина усиления; l_1 – ширина проплава; q – высота усиления; q_1 – глубина проплава

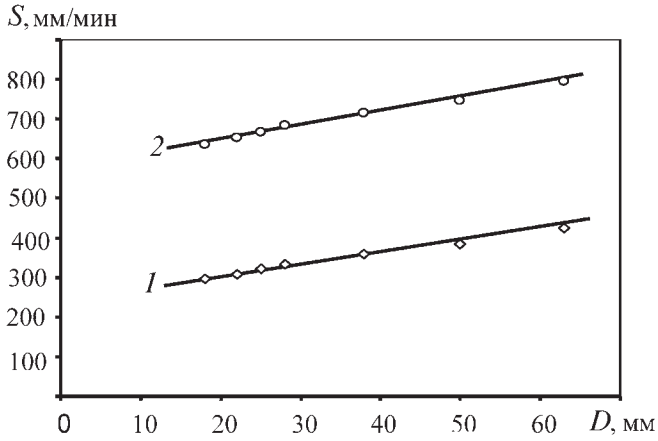


Рис. 3. Зависимость скорости подачи сварочной проволоки от диаметра трубы и толщины стенки:
1 – 1,0 мм; *2* – 1,5 мм

ляра. По результатам замера вычисляли комплексный показатель организации микроструктуры [2, 3]:

$$Q_{\text{ñ}} = \sum_{i=N} \left(\frac{D_{\text{ã}}}{2} \frac{P_{\text{ç}}}{S_{\text{ç}}} \right)_i .$$

Испытание образцов, вырезанных в области сварного шва, на разрыв осуществляли на универсальной испытательной машине INSTRON 3382.

Результаты исследования и их обсуждение. Силу сварочного тока, скорость перемещения дуги и скорость подачи проволоки определяли с учетом толщины стенки трубы, диаметра сварочной проволоки и диаметра трубы. В качестве критерия оптимизации принимали минимальное отклонение геометрических характеристик сечения сварного шва. Было установлено, что с увеличением диаметра трубы и толщины стенки величина сварочного тока и скорость подачи сварочной проволоки повышаются. На рис. 3 приведена зависимость скорости подачи проволоки от диаметра и толщины стенки трубы без регулирования токового режима. Зависимость носит линейный характер, при этом повышение толщины трубы от 1,0 до 1,5 мм приводит почти к двукратному повышению подачи.

Аналогичная оптимизация была проведена по сварочному току. Установлено, что при его постоянном значении в течение всего сварочного процесса отклонения геометрических характеристик сечения сварного шва максимальны. Ступенчатое понижение силы тока по мере наложения сварного шва приводит к ощутимому уменьшению абсолютных отклонений геометрических характеристик сечения шва, указывая на более высокую стабильность процесса, при этом с повышением ступеней изменения силы сварочного тока геометрическая стабильность возрастает.

Наименьшие отклонения геометрических размеров сварного шва достигаются при 4 и 5 ступенях регулирования тока, при этом на двух последних ступенях

1. Предел прочности ($\sigma_в$, МПа) сварного шва в зависимости от токового режима

Режим сварки	Угловая координата точки замера					
	15°	30°	90°	180°	270°	345°
Постоянная сила тока	225...230 / 227,5	225...230 / 227,5	–	205...215 / 210	–	190...210 / 200
2-ступенчатое регулирование	225...230 / 227,5	225...230 / 227,5	–	210...220 / 212,5	–	195...215 / 205
3-ступенчатое регулирование	225...230 / 227,5	225...230 / 227,5	225...235 / 230	225...230 / 227,5	220...225 / 222,5	210...220 / 215
4-ступенчатое регулирование	225...230 / 227,5	225...230 / 227,5	225...230 / 227,5	225...230 / 227,5	225...230 / 227,5	225...230 / 227,5
5-ступенчатое регулирование	225...230 / 227,5	225...230 / 227,5	225...235 / 230	225...230 / 227,5	225...235 / 230	225...230 / 227,5
Примечание. В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.						

можно осуществлять сварку на одних и тех же режимах, что незначительно упрощает процесс токового регулирования.

Анализ геометрических характеристик показал, что сварка при постоянном токе приводит к значительному увеличению ширины усиления, ширины и глубины проплава по мере наложения сварного шва, при этом высота усиления уменьшается, уходя в «минус», образуя в сечении сварного шва вогнутость. Это в конечном итоге проявляется на физико-механических характеристиках сварных соединений (табл. 1), а сам шов не отвечает требованиям ПИ 1.4.1555–2000.

При двухшаговом уменьшении силы тока геометрические параметры сварного шва изменяются менее интенсивно, но они также не укладываются в нормативные требования. При трехшаговом снижении силы тока геометрические параметры вписываются в нормативные требования, но абсолютный разброс отдельных характеристик сварного шва остается высоким. Начиная с четырехшагового токового режима, все геометрические характеристики сечения сварного шва соответствуют нормативным требованиям по величине и абсолютному разбросу.

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, показывает, что предел прочности сварных соединений достигает наибольших значений в начале процесса. Сварка в этой области происходит при минимальной температуре и максимальном градиенте температур. При одно-, двух- и трехшаговых токовых режимах прочность по мере наложения сварного шва снижается, а начиная с четырехшагового токового режима остается постоянной по всем сечениям.

На рис. 4 приведены значения суммарной геометрической погрешности сечения в различных сегментах сварного шва, а в табл. 2 – оптимальные режимы сварки при 4-ступенчатом регулировании токовым режимом для различных диаметров и толщин трубы.

На основании выполненных исследований получена эмпирическая зависимость для расчета начального (на первом сегменте) сварочного тока

$$I_{\text{ñâ}} = 50t + 0{,}215d - 20{,}508,$$

где t – толщина стенки, мм; d – диаметр трубы, мм; $I_{св}$ – сила сварочного тока, А.

На рис. 5 представлена диаграмма распределения параметра структурной организации сварного шва в зоне термического влияния, раскрывающая степень однородности микроструктуры. Параметр структурной организации $Q_с$ отражает плотность несовершенств кристаллического строения, влияющих на степень развитости границ раздела, размеры и форму кристаллита. Между параметром $Q_с$ и физико-механическими свойствами имеется тесная связь [3]. Анализ представленных результатов показывает, что регулированием шага и токовым режимом можно активно влиять на структурную стабильность сварного шва.

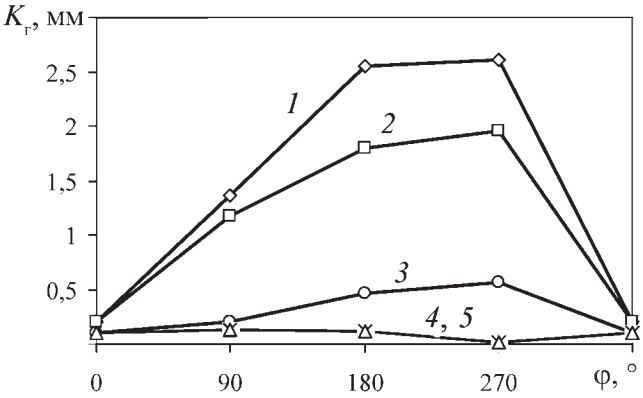


Рис. 4. Диаграмма распределения суммарного геометрического отклонения сечения сварного шва при диаметре трубы 38 мм и толщине 1,5 мм при:
1 – постоянной силе тока; *2* – двухступенчатом режиме; *3* – трехступенчатом режиме; *4* – четырехступенчатом режиме; *5* – пятиступенчатом режиме

2. Сварочный ток, А, при разбивке сварного шва на 4 сегмента при различной толщине стенки трубы (1,0 мм/1,5 мм)

Диаметр трубы, мм	Угловые значения сегментов				Нахлесток
	1	2	3	4	
	0...90°	90...180°	180...270°	270...360°	
18	33/58	30/55	26/51	26/51	24/49
22	34/59	31/56	27/52	27/52	25/50
25	35/60	32/57	28/53	28/53	26/51
28	36/61	33/58	29/54	29/54	27/52
38	38/63	35/60	31/56	31/56	29/54
50	40/65	37/62	33/58	33/58	31/56
63	43/68	40/65	36/61	36/61	34/59

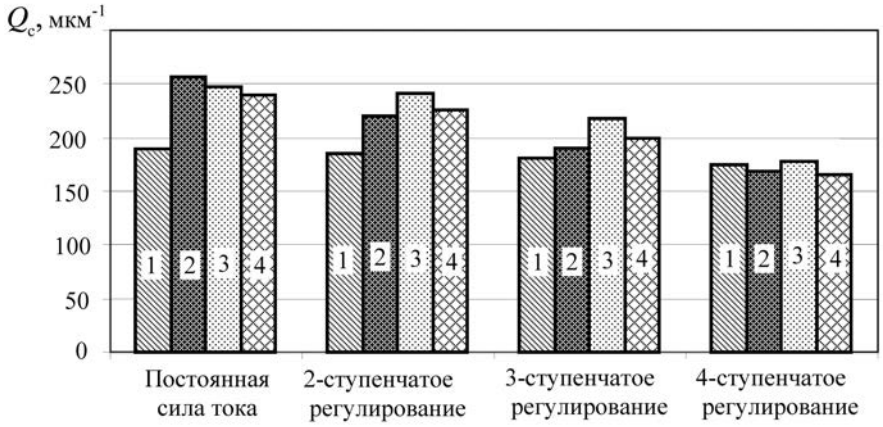


Рис. 5. Диаграмма распределения параметра структурной организации сварного шва при различных токовых режимах:
1–4 – номер соответствующего сегмента трубы

С повышением числа ступеней токового режима структурная стабильность возрастает.

Таким образом, корректировкой силы тока при сварке труб можно активно управлять геометрической стабильностью, механической прочностью и структурной стабильностью сварного соединения.

Выводы

1. Электрические режимы сварки необходимо выбирать исходя из толщины стенки трубы, диаметра сварочной проволоки, диаметра самой трубы и количества сегментов, в пределах которых наложение сварного шва необходимо осуществлять на соответствующих токовых режимах.

2. Корректировкой силы тока при сварке труб, предварительно разбив траекторию движения электрода на сегменты, можно активно управлять геометрической стабильностью, механической прочностью и структурной стабильностью сварного соединения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Новикова Д.П.** Высокотемпературная металлография сварных соединений. Киев: Наукова думка, 1989. 146 с.

2. **Иванова В.С., Баланкин Л.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А.** Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.

3. **Ким В.А., Муравьёв В.И., Шпилева А.А.** Зеренная структура и твердость титанового сплава ВТ20 после электронно-лучевой сварки // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 4 (634). С. 40–43.

Василий Илларионович Муравьёв, д-р техн. наук;
Владимир Алексеевич Ким, д-р техн. наук,
ktsm@knastu.ru;
Алексей Владимирович Аксёнов, аспирант

УДК 621.735

И.П. Медведев *(ОАО "КАМАЗ")*,
А.Т. Крук *(Воронежский государственный технический университет)*

Оптимизация технологических решений по обеспечению точности крупных поковок

Проведен анализ основных факторов, влияющих на точность поковок с учетом их последующей обработки и обеспечения качества деталей. Разработаны рекомендации по укрупненной оценке силы КГШП, расчету критериальных показателей прессов и другого оборудования для переоснащения заготовительных производств.

The analysis of major factors influencing the accuracy of forgings according to their subsequent processing and quality assurance details is performed. Recommendations for evaluation of enlarged force crank hot stamping presses, calculation of criterial indicators of presses and other equipment are developed for re-equipment of blanking productions.

Ключевые слова: оптимизация; режимы штамповки; параметры оснастки; факторы качества поковок; оценка силы штамповки.

Keywords: optimization; modes of punching; equipment parameters; factors of quality forgings; estimation of punching force.

Технологический подход к точности заготовок включает соответствие их размеров установленным в технической документации требованиям к деталям, получаемым из поковок. Здесь необходимо рассматривать припуски под механическую обработку как часть технологического цикла изготовления изделия. Критериями оценки точности поковок могут служить:

– для поверхностей поковок, не требующих последующей обработки, – недоштамповка в пределах допуска на деталь и шероховатость поверхностного слоя на вышеуказанной в чертеже детали;

– для обрабатываемых элементов – неравномерность величины недоштамповки, так как при механической обработке изменение припуска, определяемого через недоштамповку, влияет на получение требуемых технологических показателей процесса (точности, производительности, качества поверхностного слоя, износа инструмента и оборудования).

В случае использования для обработки заготовок электрохимической размерной обработки к припускам предъявляются дополнительные требования:

– минимальный припуск, с учетом анодного растворения материала по всей поверхности в зоне формообразования;

– соотношение между наибольшим и наименьшим припуском, определяемое с учетом допустимой высоты неровностей и глубины измененного слоя в пределах технологических возможностей метода, в зависимости от структуры и марки материала; обоснованностью выбора схемы обработки и технологических режимов.

Следующим критерием выбора вида поковок является их материалоемкость, которая составляет часть мероприятий по отработке технологичности конструкции, где требуется минимизировать затраты на процесс штамповки, расход материала на поковку и последующую механическую обработку.

С развитием нетрадиционных методов формообразования (электроэрозионных, электрохимических, комбинированных) стоимость удаления припуска с заготовок сложной формы существенно снижается и это открывает возможность расширить величину недоштамповки, обеспечив при этом снижение себестоимости поковки, удешевление изготовления оснастки (увеличение допусков рабочей части при изготовлении и в процессе эксплуатации); использование прессов меньшей мощности (уменьшение стоимости, расхода материалов на изготовление, лучшее использование мощности, площадей, снижение затрат на амортизационные расходы); снижение сроков освоения новых машин, где получение поковок является начальной стадией технологического цикла выпуска

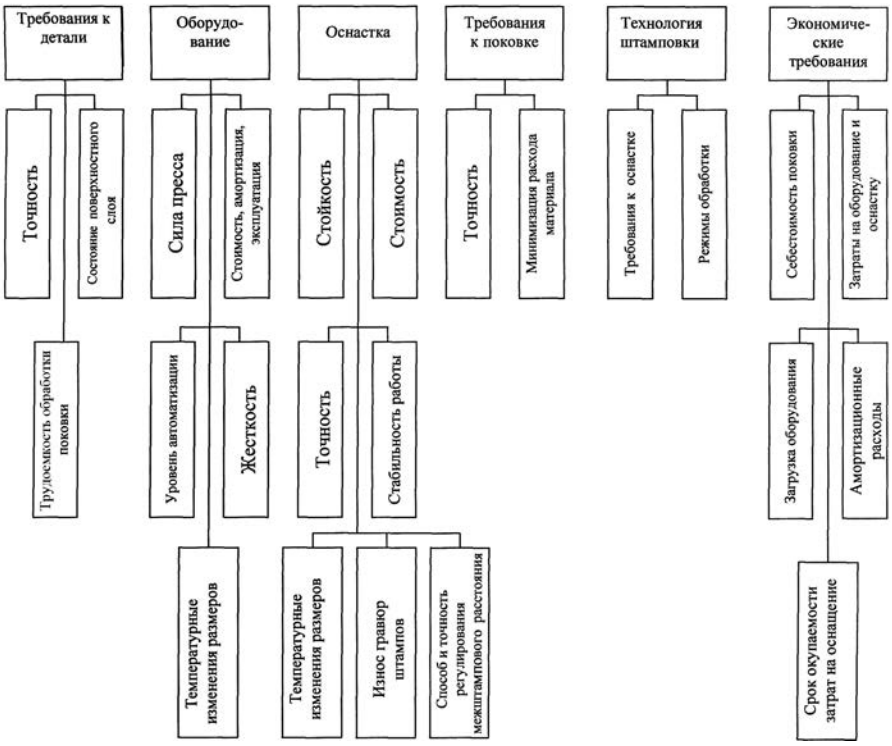


Рис. 1. Структура обеспечения точности деталей

изделий, определяет общие сроки поставки на рынок конкурентоспособной продукции.

Таким образом, под точностью поковок следует понимать диапазон рассеяния размеров за счет изменения характеристик и состояния оборудования, оснастки, стабильности технологических параметров.

На рис. 1 приведены факторы, влияющие на точность поковок.

На базе анализа требований к детали необходимо подобрать соответствующее оборудование.

Критерием выбора служит (см. рис. 1) сила пресса и его эксплуатационные характеристики. Здесь необходимо обосновать выбор модели КГШП и поставщика-изготовителя.

В табл. 1 приведены сведения о крупных прессах, поставленных для предприятий России за прошедшие годы для изготовления различных видов поковок [1].

Согласно [1] кривошипные горячештамповочные прессы подразделяют на классы: легкие – 6,3...16 МН, средние – 20...50 МН, тяжелые 63...160 МН.

Стоимость пресса и амортизационные затраты в основном определяются через его массу и энергопотребление [2]. Поэтому ограничения по массе заготовки, приведенные в табл. 1, позволяют получить экономически обоснованные данные для переоснащения производства и управления реконструкцией заготовительных производств машиностроительных предприятий.

Приведенные в табл. 1 сведения подтверждаются опытом работы комитета развития производственной системы ОАО "КАМАЗ" и достаточно полно отражены в работе [3]. Следует учитывать, что затраты на оснащение включают транспортировку, наладку, встраивание в линии, опытную эксплуатацию, затраты на обучение и переподготовку персонала. Это может составить сумму, соизмеримую с капитальными затратами на приобретение прессов. На этой стадии анализа выявляются большие преимущества при заказе продукции у отечественных производителей (в частности, у ОАО "ТМП", выпускающего КГШП с различной степенью автоматизации).

Расчет силы пресса может проводиться по программе Q-Form (разработчик ЗАО "Квантор-Софт"), которая позволяет получить достаточно хороший оценочный результат [4].

Расчет выполняется методом конечных элементов на стадии окончательной штамповки. Результаты расчетов, выполненных в ОАО "ТМП", приведены в табл. 2.

Экспериментальные исследования, проводимые на КГШП в ОАО "КАМАЗ", показали, что фактическая сила устанавливаемых прессов зависит от коэффициента трения (в расчетах принимался 0,4...0,5), определяемого через качество технологического смазочного материала (может изменяться до 8...9 %); средних напряжений текучести материала (изменение до 4...5 %); работы деформирования (может изменяться в диапазоне 6...7 %).

В [1] показано, что предел текучести стали 40Х после нагрева до температуры 1420 К составляет 1250 МПа; 1470 К – 1140 МПа; 1520 К – 1020 МПа. Для стали 50ХГА предел текучести составит соответственно 1590; 1460; 1340 МПа. Следовательно, расчетные зависимости в табл. 2 имеют погрешность ~10...15 %. Опыт использования в производстве прессов показывает, что при расчете их силы необходимо вводить повышающий коэффициент 1,15...1,2.

Исследования показали, что температура нагрева поковки на окончательной позиции штамповки должна быть не ниже (1500±50) К, а толщина облоя не менее 10 мм для стали 40Х и 12 мм – для стали 50ХГА.

На рис. 2 приведены зависимости, показывающие погрешность расчетов при различной толщине облоя.

Из рис. 2 видно, что выбранный КГШП с силой 125 МН обеспечивает получение поковки при нагреве заготовки до температуры более 1300...1350 К при толщине облоя свыше 8 мм.

1. К выбору КГШП для крупных поковок

Наибольшая масса типовой поковки, кг	Характеристика пресса			Страна-изготовитель
	Сила не менее, МН	Масса, т	Мощность, кВт	
0,58	10	66	35	Осредненные сведения фирм Франции, Германии, Японии, США, России
1,75	16	113	75	
3,34	20	177	130	
22,6	40	360	200	
53,1	63	575	445	
81,3	80	660	–	
120	100	1200	530	Россия
150...161	110	1089	596	Япония, Германия, США, Россия
	120	1250	530	
	125	1281	700	
247	160	1625	700	Германия
–	–	2400	800	Япония, Россия
		1800	600	

Погрешности расчета (около 10...12 %) не превышают доверительного интервала показателей при выборе КГШП из числа прессов нормального ряда даже с учетом диапазона изменения силы, принятого в различных странах (110...125 МН).

Для расчета силы пресса:

– определяют площадь поковки в плоскости разъема штампа (по чертежам заготовки и штампа);

– находят площадь облойного мостика;

– рассчитывают эквивалентный диаметр цилиндрической заготовки;

– определяют среднюю ширину облойного мостика;

– назначают температуру нагрева поковки с учетом потерь теплоты в зависимости от времени транспортировки заготовки и температуры штампа;

– находят по температуре поковки напряжения текучести;

– определяют силу штамповки (расчетная величина);

– выбирают или назначают КГШП по нормативным величинам размерного ряда (при переоснащении) или из имеющегося в наличии оборудования.

Из рис. 1 видно, что расходы на оборудование включают не только капитальные затраты, но и амортизационные.

Применительно к номенклатуре поковок, получаемых в ОАО "КАМАЗ", они рассмотрены в [3], где также показано, что для крупных поковок (масса до 105 кг), выпускаемых на автоматизированных линиях, расходы на амортизацию оборудования составляют до 30...37 % от себестоимости поковок, что на порядок выше по сравнению с мелкими заготовками (массой до 1 кг).

Если учесть, что себестоимость поковок коленчатого вала и балки передней оси до 65 раз выше по сравнению, например, с заготовками для зубчатых передач, получаемых на легких КГШП, то эксплуатационные и амортизационные расходы можно заметно снизить при обоснованном выборе прессов (здесь следует учесть, что расход энергии на штамповку у тяжелых прессов составляет до 3 % себестоимости, что в 2–3 раза больше, чем у легких и средних КГШП).

Снижение коэффициента использования материала до 10 % не оказывает значительного влияния на величину затрат при последующей механической обра-

2. Расчет силы пресса при штамповке крупногабаритных заготовок (режимы штамповки, принятые в ОАО "КАМАЗ")

Характеристика поковки			Температура, К			Сила пресса, МН	
Материал	Масса поковки, кг	Толщина облоя, мм	на выходе из индуктора	при окончательной штамповке	штампа	расчетная	экспериментальная
Сталь 40Х	75	8	1420	1380	450	129,1	–
		10	1470	1430	460...470	101,5	125
		12	1520	1480	520...540	81,7	125
Сталь 50ХГА	80...82	8	1420	1370	470	161,5	–
			1470	1430	470...480	150,0	–
			1520	1300	470...480	144,1	–
		10	1470	1240	470	131,1	–
		12	1600	1258	500...520	113,1	125

ботке, так как припуски на эти цели (при меньшей силе пресса) могут возрасти на 1...2 мм, что не влияет на технологические показатели чистовой обработки, хотя приводит к некоторым потерям материала.

Для крупных поковок доля затрат на материал близка к аналогичным показателям для мелких заготовок, изготовляемых на прессах силой 6,3 МН [3].

При анализе влияния качества оснастки на точность поковок основное внимание уделяется штампам (точнее, вставкам).

Опыт работы ОАО "КАМАЗ" с отечественными и зарубежными фирмами (Украина, Чехия) позволил разработать конструкции и технологию изготовления штамповой оснастки, учитывающие последние достижения технологической науки. Рабочий профиль вставок выполняют электрохимической размерной обработкой, показатели которой (в том числе точностные) приведены в [5], а также с применением электроискрового упрочнения профиля, что повышает стойкость оснастки (а, следовательно, стабильность размеров поковок) до 2,5 раз.

При допусках ±0,5 мм стойкость вставок штампов для окончательного формообразования профиля крупногабаритных заготовок составляет до 8000 изделий, что в 1,5–2 раза превышает показатели оснастки без упрочнения [3].

Стоимость оснастки для получения поковок коленчатых валов составляет 16,9 % от себестоимости, что не выше, чем затраты на эти цели у легких и средних прессов (до 22 %).

На рис. 3 детально рассмотрены показатели оснастки, определяющие точность деталей и включающие как режимные, так и вспомогательные показатели, такие как: система и эффективность удаления окалины

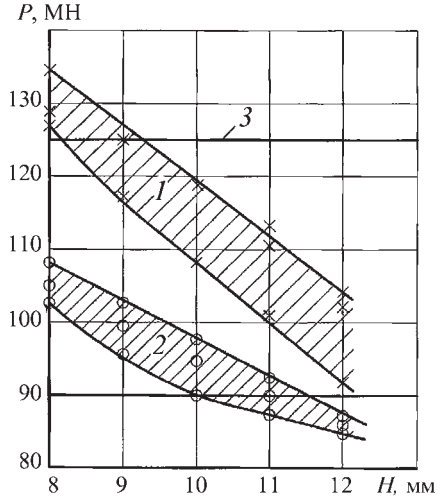


Рис. 2. Изменение силы окончательной штамповки от толщины облоя (материал 40Х, масса заготовки 70 кг):
1 – при температуре нагрева поковки 1420 К; *2* – при температуре нагрева поковки 1520 К; *3* – сила используемого пресса

на штамповочных переходах, доля участия исполнителей (уровень автоматизации и механизации работ).

Очевидно, что точное базирование заготовок в ручьях штампов, транспортировка изделий, переналадка оснастки возможны только с использованием подъемно-транспортных средств.

Для изготовления крупногабаритных поковок применяют автоматизированные линии с унифицированными элементами для возможности включения в поток новых видов оборудования (КГШП, перегружателей, охладителей, нагревателей, средств контроля и др.), складов-накопителей, используемых в процессе переоснащения производства под новую продукцию и в ходе замены устаревших и изношенных прессов и другого оборудования.

Приведенные в работах [1], [4] рекомендации по регулированию штампового пространства реализованы в отечественных КГШП, в том числе выпускаемых ОАО "ТМП". Из 548 полученных за последние годы заказов на средние и тяжелые КГШП более половины продукции было отгружено на экспорт (Япония, Франция, Ю. Корея, Китай, США, Италия, Индия, Испания) [2].

Это подтверждает хорошие потребительские и эксплуатационные показатели оборудования и оснастки ОАО "ТМП".

Перспективным вариантом повышения конкурентоспособности отечественной продукции, особенно крупносерийной, является получение поковок с точностью, обеспечивающей эксплуатацию деталей без последующей обработки или с минимальным объемом механических операций.

Из рис. 1 и 4 видно, что при значительном износе ручьев вставок от контакта с нагретым материалом главным фактором, определяющим точность заготовок, является стабильность размеров поковок по высоте изделия (см. рис. 4), зависящая от правильного выбора оборудования, оснастки, режимов штамповки и соблюдения технологической дисциплины.

Управляемыми параметрами являются: температурный режим, допустимый износ вставок, точная настройка положений ползуна пресса, обеспечение минимальных смещений частей штампа в горизонтальном и угловом (поворот элементов) направлениях, повторяемость размеров по высоте поковки (недоштамповка), жесткость исходных заготовок. Последнее зависит от конструкции изделий (определяется конструктором-разработчиком объектов обработки), конструкции штампов, повышающих суммарную жесткость системы поковка – оборудование – оснастка.

При недоштамповке крупных поковок до 4...5 мм целесообразно ограничить допуск на геометрически простые участки в пределах ±0,5 мм, что не может заметно снизить коэффициент использования материала и не вызовет необходимость последующей механообработки элементов заготовки, пригодных для эксплуатации без формообразующих технологических

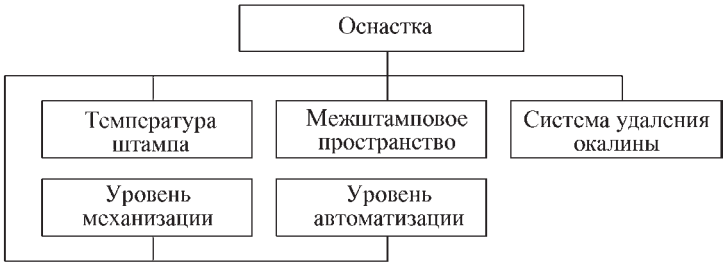


Рис. 3. Параметры оснастки, определяющие точность изготовления поковок

воздействий при завершении технологического процесса изготовления детали.

Жесткость поковок может быть повышена за счет создания технологических припусков, что вызывает необходимость назначения трудоемких операций по их удалению и сопряжению поверхностей в процессе изготовления деталей, поэтому такие мероприятия имеют ограниченную область применения.

В автомобилестроении добиваются повышения коэффициента использования материала до 0,99. Факторы, влияющие на коэффициент использования материала, приведены на рис. 5.

С этой целью может быть предложена замена материала, отвечающего эксплуатационным требованиям, на аналогичный, но в большей степени отвечающий условиям объемного формообразования, в частности, обеспечивающий получение на имеющейся технологической базе более точных поковок с меньшей толщиной облоя и величиной недоштамповки.

Отработка технологичности поковок позволяет заметно снизить себестоимость, повысить конкурентоспособность продукции, особенно в крупносерийном производстве, сократить сроки запуска в производство изделий новых поколений.

Технологический процесс штамповки (см. рис. 1) включает выполнение требований к количеству и качеству оснастки, ее совместимости со средствами управления и автоматизации процесса.

На рис. 6 отмечены основные контролируемые параметры процесса. К ним относятся: температура; соответствие пресса расчетной силе штамповки; обеспечение требуемого контактного сопротивления (наличие, качество и объем подаваемой смазки, положение при работе частей оборудования и оснастки относительно заготовки и др.); обоснованное время пауз между переходами; соблюдение регламентов обслуживания оборудования.

В автоматизированных линиях контроль режимов осуществляется автоматически. В случае нарушения работы транспортной системы подачи крупногабаритных заготовок для их нагрева датчиками активного контроля выключают нагреватели, а через 10...15 мин прекращают термическую обработку. Учитывая, что мощность установок до 1800 кВт, а потребление тока нагревательных устройств достигает $120 \cdot 10^6$ кВт-часов, такая автоматизация управления режимом нагрева дает значительный экономический эффект.

Несмотря на то что в серийном производстве технологическая документация достаточно стабильна во времени, постоянно идет совершенствование изделий, что вызывает необходимость переработки документации.

Для этого в составе ОАО "КАМАЗ" организованы современные подразделения для автоматизированного проектирования объектов производства, их элементов, технологических процессов и средств оснащения, управляющих, организационных и контрольных систем, что формирует в том числе и содержание работ по производству качественных поковок.

От обоснованного назначения точностных ограничений заготовок зависят не только технические, но и потребительские характеристики продукции, ее востребованность, где главным привлекательным фактором является цена (в том числе поковок), особенно при серийном производстве. В то же время постоянное повышение качественных показателей изделий вызывает необходимость финансирования дорогостоящих исследований. Это сказывается на стоимости продукции.

Оценочным критерием обоснованности затрат на повышение качества поковок является себестоимость выпускаемого изделия, определяющая прибыль предприятия и возможность его развития. При этом предполагается, что снижение себестоимости поковок происходит не в ущерб качеству и производительности процесса.

В [3] приведены сведения о путях экономического управления снижением затрат на выпуск крупных заготовок. Так, переход на использование автоматизированных линий для получения крупногабаритных поковок позволил снизить долю затрат на оплату труда от 3,12 до 1,5 % от себестоимости продукции, сокращены трудоемкость и число операций на участке исправления дефектов, все это подтверждает высокий уровень качества современных крупных поковок, определяющих точность базовых деталей транспортных средств.

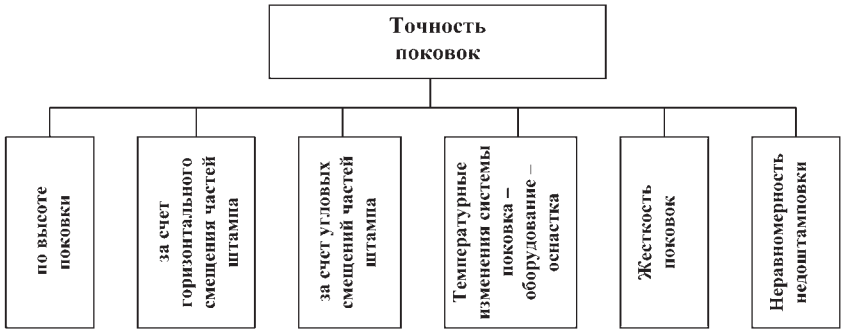


Рис. 4. Факторы, вызывающие погрешности поковок

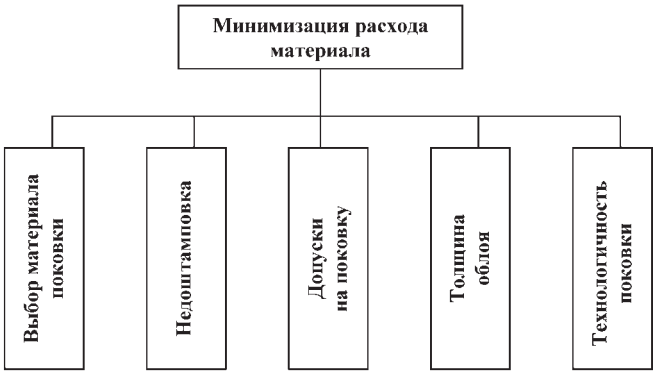


Рис. 5. Факторы, определяющие коэффициент использования материала при изготовлении поковок

Большинство КГШП ОАО "КАМАЗ" отработало более 20 лет, поэтому необходимо иметь перспективные планы переоснащения заготовительного производства с обоснованными объемами финансирования на приобретение оборудования, оснащение вспомогательными средствами (автоматизация, средства управления, оснастка и др.).

Это должно быть увязано с необходимостью проведения организационных, социальных мероприятий, с подготовкой кадров, на что потребуются значительные средства. Навыки работы исполнителей, обеспечивающих высокие качественные показатели изделий (в частности, точность поковок и деталей), зависят от загрузки заготовительного производства, особенно при возможности выпуска однородной продукции, что может существенно повысить технические и экономические показатели производства за счет снижения простоев, затрат на амортизацию оборудования, более полной выработки ресурса средств оснащения до их морального и физического старения.

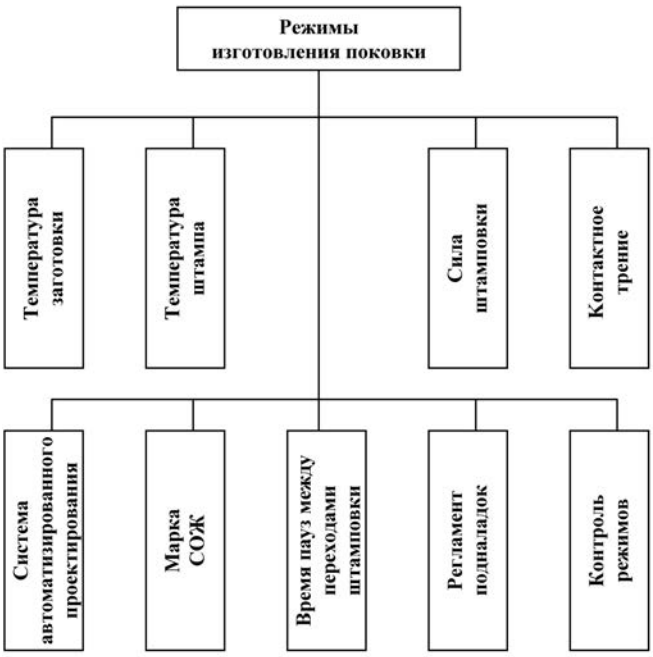


Рис. 6. Объекты и структура проектирования технологических режимов получения поковок требуемой точности

Заключение

1. Проведен анализ технологического процесса изготовления крупных поковок, позволивший выделить основные факторы, влияющие на качество заготовок и обеспечивающие технически и экономически обоснованные точностные показатели деталей на стадии получения поковок с учетом их последующей обработки и обеспечения качества деталей.

2. Разработаны рекомендации по укрупненной оценке силы КГШП, расчету критериальных показателей прессов и другого оборудования для переоснащения заготовительных производств. Рекомендации прошли проверку в процессе развития производственной системы ОАО "КАМАЗ" и при маркетинговых исследованиях в ОАО "ТМП".

3. Приведены технико-экономические показатели, включающие перспективные мероприятия по развитию кузнечных подразделений предприятий, выпускающих серийно средства грузового транспорта, что позволяет прогнозировать потребность в КГШП для выпуска крупногабаритных заготовок и загрузку предприятий (в основном отечественного станкостроения), специализирующихся на создании и изготовлении кузнечного оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Крук А.Т.** Разработка конструкции и методики проектирования тяжелых кривошипных горячештамповочных прессов: дис.... канд. техн. наук. Воронеж: ТМП, 2000. 208 с.

2. **Крук А.Т.** Проектирование и производство тяжелых кривошипных горячештамповочных прессов. Воронеж: ВГУ, 2003. 182 с.

3. **Семендий В.И., Акаро И.Л., Волосов Н.Н.** Прогрессивные технология, оборудование и автоматизация кузнечно-штамповочного производства КАМАЗа. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.

4. **Крук А.Т., Дибнер Ю.А.** Автоматизация процессов изготовления поковок коленчатых валов // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 4. С. 22–24.

5. **Смоленцев Е.В.** Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.

6. **Электрофизические** и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. Т. 1 / под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высшая шк., 1983. 247 с.

Игорь Петрович Медведев, председатель комитета по развитию производственной системы ОАО "КАМАЗ";
Александр Тимофеевич Крук, д-р техн. наук,
kruk.938@mail.ru

УДК 621.77

К.В. Волков*, Б.Н. Марьин, В.А. Ким, А.И. Евстигнеев, Т.В. Новикова*, С.Б. Марьин, В.И. Шпорт *(*ОАО "Амурметалл", Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)*

Влияние интенсификации многоручьевой прокатки на структуру и свойства металла

Рассмотрено влияние интенсификации многоручьевой прокатки на структуру и свойства металла.

Influence of polystream rolling intensification on structure and properties of metal is considered.

Ключевые слова: многоручьевая прокатка; скорость и температура прокатки; механические свойства; микроструктура изделия.

Keywords: polystream rolling; rolling speed and temperature; mechanical properties; microstructure of product.

Физико-механические свойства изделий, получаемых технологической обработкой, зависят от деформационно-термических условий формирования структуры, и могут быть улучшены за счет интенсификации процесса. Под интенсификацией процесса обработки металлов давлением понимают совокупность дополнительных по сравнению с традиционными способами мер или действий, направленных на повышение качества металлопродукции, снижение трудоемкости изготовления и уменьшение номенклатуры используемого оборудования и технологической оснастки.

Технологические возможности одноручьевой прокатки весьма ограничены, поэтому для повышения производительности процесса и одновременно обеспечения высокого качества продукции применяют различные способы интенсификации.

Силовая интенсификация заключается в концентрации высокой степени деформации на одной операции за счет изменения напряженно-деформированного состояния заготовки, создающего благоприятные условия для формоизменения. Напряженно-деформированное состояние при этом достигается путем дополнительного силового воздействия, прикладываемого к заготовке рабочими органами оборудования, специальными конструктивными элементами оснастки или специальными технологическими средствами и приемами. При совмещении силовой и термической интенсификации эффективность обработки возрастает.

Термическая интенсификация заключается в оптимальном распределении тепловых источников и стоков в зоне обработки, формирующих температурное поле в деформируемой заготовке с такими градиентными характеристиками, при которых возникающие термонапряжения будут способствовать пластической деформации металла и стимулировать развитие структур с необходимыми физико-механическими свойствами.

Для металлов с низкой теплопроводностью можно производить нагрев зоны деформирования, не охлаждая зоны передачи усилия, так как в процессе обработки зона передачи усилия не успевает прогреться до критических температур и сохраняет свои эксплуатационные свойства.

Нагрев заготовки может осуществляться двумя способами: прямым, когда теплота образуется непосредственно в нагреваемой зоне, и косвенным, при котором теплота от внешнего источника контактным, конвективным или радиационным способом передается в заготовку.

Охлаждение заготовок является составной частью термической интенсификации и осуществляется, как правило, контактными и конвективными путями. При контактном способе теплота отводится вследствие прямой теплопередачи в металлический охладитель в зоне контакта, а при конвективном – за счет омывания или обдувания заготовки различными хладоагентами.

Скорость деформации играет важную роль в деформационных процессах, которую необходимо учитывать при ОМД. С увеличением скорости деформации возрастают прочностные свойства металлов и повышается их хрупкость [1].

В статье рассмотрено влияние скорости деформирования, силовой и термической интенсификации на

1. Химический состав (% мас.) прокатанной арматурной стали

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Mo	V	Nb	Ca	Sn
0,20... 0,29	1,06... 1,2	0,38... 0,68	0,008... 0,023	0,014... 0,032	0,04... 0,05	0,14... 0,17	0,25... 0,34	0,006... 0,009	0,004... 0,006	0,012... 0,015	0,001	0,008... 0,009	0,0006... 0,0009	0,009... 0,013

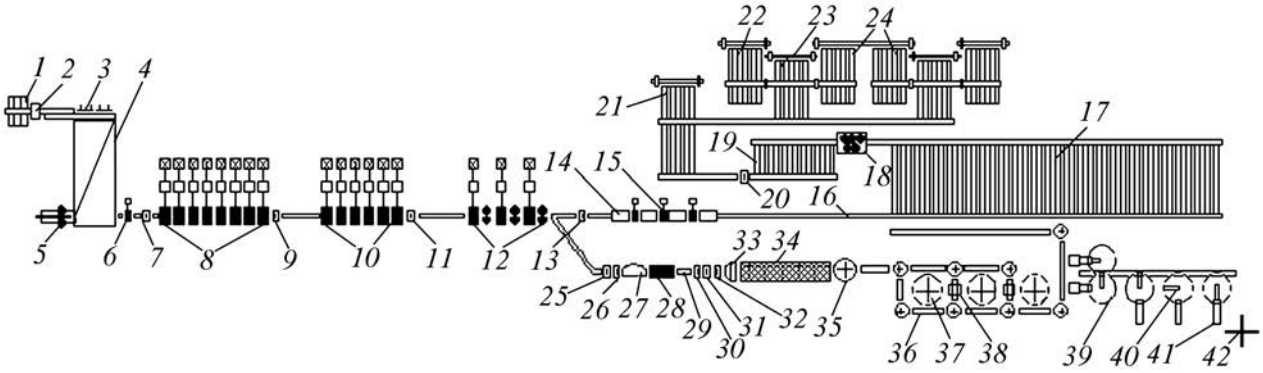


Рис. 1. Схема расположения технологического оборудования мелкосортно-проволочного стана 320/150:
1 – загрузочная решетка; *2* – кантователь; *3* – вталкиватель; *4* – нагревательная печь; *5* – стеллаж "возвратов"; *6*, *15* – трайб-аппараты; *7* – разрывные ножницы; *8* – черновая группа клетей 500/400; *9*, *11* –кривошипные ножницы № 51 и № 52; *10* – промежуточная группа клетей 400; *12* – чистовая группа клетей 320; *13* – кривошипно-эксцентриковые ножницы № 53; *14* – участок ускоренного охлаждения; *16* – рольганг; *17* – холодильник; *18* – роликоправильная машина; *19* – транспортер; *20* – ножницы холодной резки; *21* – пакетирующее устройство; *22–24* – штабелирующие устройства; *25*, *26* – кривошипно-эксцентриковые ножницы; *27* – петлерегулятор; *28* – десятиклетевой проволочный блок 215/170; *29* – установка водяного охлаждения; *30*, *31* – калибровочные ножницы; *32* – отходокрошитель; *33* – виткоукладчик; *34* – участок воздушного охлаждения; *35* – виткосборник; *36* – конвейер; *37* – опрокидыватели; *38* – уплотнение и увязка бунтов; *39* – устройство для передачи бунтов; *40* – съемник бунтов; *41* – транспортер; *42* – бунтопакетировочная машина

структуру и свойства арматуры №12, 14, 16 из стали 25Г2С при одноручьевой и двухручьевой прокатке на мелкосортном стане 320/150.

Методика исследования. Химический состав стали, из которой производится изделие (арматура класса А 400 из стали 25Г2С, ГОСТ 5781), представлен в табл. 1. Незначительное изменение химического состава имеет место от плавки к плавке, но в пределах допустимых значений по ГОСТ.

Схема технологического оборудования, на котором производится прокатка, приведена на рис. 1, а схема разделения двухниточного раската – на рис. 2. Режимы прокатки характеризуются скоростью прокатки и температурным перепадом между 2-й и 20-й клетью. Силовая и температурная интенсификация достигалась за счет варьирования скорости прокатки и температурного перепада между клетями, которые определяли температурное поле и напряженно-деформированное состояние заготовки. Скорость прокатки регулировали в диапазоне 12...17,5 м/с, максимальная температура на 2-й клети составляла 1180 °С, минимальная температура на 20-й клети – 1100 °С, что значительно выше температуры полиморфных превращений.

В табл. 2 представлены режимы прокатки и механические свойства изделий, изготовленных из проката различных плавок и партий.

Микроструктуру материала определяли на металлографическом микроскопе МИКРО-200, прочностные и деформационные характеристики исследовали на универсальной испытательной машине INSTRON-3382. Размер зерна и количественные параметры микроструктуры определялись с помощью программы для ЭВМ Микро-Тест и Image.Pro.Plus.5.1.

Результаты исследования и их анализ. При прокатке обрабатываемый материал испытывает сложную пластическую деформацию в зависимости от профиля и

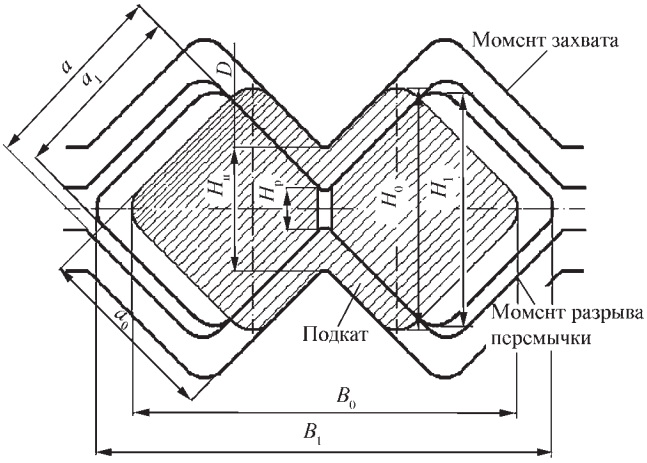


Рис. 2. Схема разделения двухниточного раската

2. Режимы прокатки и механические свойства изделия

Номер профиля, плавка, партия/проба	Режимы прокатки			Механические свойства		
	Скорость, м/с	Температура на 2-й клети, °С	Температура на 20-й клети, °С	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Двухручьевая прокатка						
№ 16, 24198, 2184/1	12,0	1160	1150	435	650	22,0
№ 16, 24198, 2184/2	12,0	1160	1150	430	660	20,5
№ 16, 24198, 2184/3	12,0	1160	1150	435	660	22,5
№ 14, 24196, 2193/1	13,5	1160	1150	435	670	21,5
№ 14, 24196, 2193/2	13,5	1160	1150	440	680	22,5
№ 14, 24196, 2193/3	13,5	1160	1150	445	670	25,0
№ 12, 24276, 2203/1	14,0	1170	1160	450	710	23,5
№ 12, 24276, 2203/2	14,0	1170	1160	450	690	24,5
Прокатка в одну нитку						
№ 14, 21542, 330/1	14,0	1180	1130	400	650	21,5
№ 14, 21542, 330/2	14,0	1180	1130	400	650	18,5
№ 16, 21542, 321/1	14,5	1160	1140	410	660	17,0
№ 16, 21542, 321/2	14,5	1160	1140	410	660	18,5
№ 14, 21542, 329/1	15,0	1180	1130	395	650	20,0
№ 14, 21542, 329/2	15,0	1180	1130	400	650	19,0
№ 16, 21542, 320/1	15,5	1170	1130	400	650	18,5
№ 16, 21542, 320/2	15,5	1170	1130	400	650	18,5
№ 12*, 23694, 54/1	16,0	1160	–	455	610	26,0
№ 12*, 23694, 54/2	16,0	1160	–	460	610	27,0
№ 12*, 23694, 54/3	16,0	1160	–	455	610	26,0
№ 14, 21542, 328/1	16,0	1180	1130	390	650	17,0
№ 14, 21542, 328/2	16,0	1180	1130	405	650	17,0
№ 12*, 23697, 55/1	16,0	1140	–	450	600	27,0
№ 12*, 23697, 55/2	16,0	1140	–	440	610	30,0
№ 12*, 23697, 55/3	16,0	1140	–	445	600	28,0
№ 12*, 23699, 56/1	16,0	1140	–	450	620	26,0
№ 12*, 23699, 56/2	16,0	1140	–	445	620	25,0
№ 12*, 23699, 56/3	16,0	1140	–	445	620	26,0
№ 16, 21542, 319/1	17,5	1180	1120	395	660	16,0
№ 16, 21542, 319/2	17,5	1180	1120	400	650	17,0

* Прокатка с термоупрочнением.

неоднородную по сечению. Пластическая деформация сопровождается активным тепловыделением, поэтому степень деформационного упрочнения будет зависеть от соотношения активностей деформационного и теплового процессов и образующейся микроструктуры.

Процесс прокатки характеризуется режимом обжатий, скоростью, температурой в зоне деформации и перепадом температур между 2-й и 20-й клетями. Скорость прокатки определяет скорость пластической деформации, между которыми имеет место прямая пропорциональная зависимость. Величина абсолютной деформации в разных сечениях профиля принимает свои значения в зависимости от схемы распределения обрабатываемого материала при процессе формообразования.

Перепад температур между начальной и конечной клетями характеризует стабильность тепловых условий, которые прямым образом проявляются на свойствах формирующейся микроструктуры. Чем меньше пе-

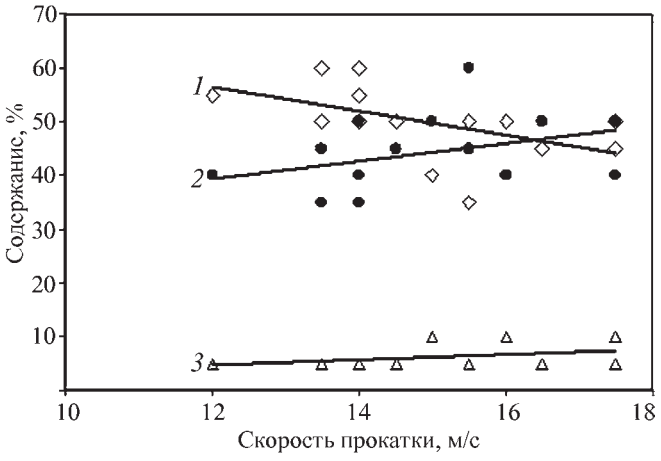


Рис. 3. Влияние скорости прокатки на соотношение микроструктур:
1 – феррит; *2* – перлит; *3* – бейнит

репад температур, тем стабильнее тепловые условия формирования структуры, тем меньше разница в состоянии микроструктур в различных зонах профиля готового изделия. Высокая температура процесса реализует пластическую деформацию стали в аустенитном состоянии, а формирование микроструктуры осуществляется при остывании изделия после завершения деформационного цикла, в режиме нормализации.

Анализ микроструктур, зафиксированных в различных зонах профиля, показывает, что основными структурными составляющими являются феррит, перлит и бейнит, соотношение которых зависит от скорости прокатки и скорости охлаждения. Видманштетт образуется в плавках, где наблюдается более грубое зерно. Охлаждение в этой области осуществляется с более значительным перепадом, образуя феррит игольчатого типа (видманштетт). Рост зерна вызван более высоким содержанием кислорода. Косвенным подтверждением является высокое содержание серы, так как удаление серы замедляется при повышенной окисленности металла. Неметаллические включения носят локальный характер ввиду применения при разливке радиальной МНЛЗ.

С повышением скорости охлаждения содержание феррита снижается, а перлита и бейнита – возрастает (рис. 3). Наличие бейнита и видманштетта является следствием повышенных скоростей охлаждения при относительно высокой температуре. При этом скорость охлаждения недостаточна для развития закалочных процессов [2]. Видманштетт имеет локальное расположение в районе продольных и поперечных ребер. При получении требуемого профиля в момент контакта металла с рабочими органами оборудования происходит локальное повышение температуры, вызывающее рост зерна и видманштетта.

Механические свойства изделия зависят от режимов прокатки. С увеличением скорости деформации и перепада температур увеличивается количество структур игольчатого типа, что вызывает увеличение предела текучести $\sigma_т$ и снижение относительного удлинения δ.

Анализ результатов механических свойств, представленный в таблице, показывает, что:

– при прокатке в две нитки с увеличением скорости прокатки и степени обжатия увеличиваются прочностные и пластические характеристики;

– при прокатке в одну нитку увеличение скорости прокатки приводит к снижению $\sigma_т$;

– при прокатке в одну нитку с термоупрочнением применение секций термоупрочнения позволяет увеличить скорость прокатки, при этом наблюдается увеличение $\sigma_т$ и δ.

Выводы

1. Структура и механические свойства готового изделия определяются исходной структурой материала и режимами прокатки.

2. При многоручьевой прокатке арматуры из стали 25Г2С основными микроструктурами являются феррит, перлит, бейнит и видманштетт, соотношение которых определяется режимами прокатки. С повышением скорости прокатки содержание феррита снижается, а перлита и бейнита возрастает, а видманштетт наблюдается только на высоких скоростях.

3. Перепад температур между 2-й и 20-й клетями определяет тепловую стабильность процесса, чем меньше перепад, тем однороднее микроструктура в разных зонах профиля проката.

4. С увеличением скорости деформации и перепада температур увеличивается количество структур игольчатого типа, что вызывает увеличение предела текучести $\sigma_т$ и снижение относительного удлинения δ.

5. При двухручьевой прокатке процессы релаксации проходят значительно быстрее.

6. Увеличение скорости прокатки улучшает равномерность свойств по длине раската.

7. В результате проведенных исследований структуры и механических свойств полученных изделий определены оптимальные скорости прокатки арматуры А 400 на стане 320/150.

При одноручьевой прокатке арматуры № 12 – 16 м/с, № 14 – 14...16 м/с, № 16 – 14,5...17,5 м/с.

При двухручьевой прокатке арматуры № 12 – 14 м/с, № 14 – 13,5 м/с, № 16 – 12 м/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Основы** технологических процессов ОМД: учеб. пособие / С.Б. Марьин, А.И. Евстигнеев, К.В. Волков и др. Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО "КнАГТУ", 2009. 214 с.

2. **Термическая** обработка в машиностроении: справочник / под ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. М.: Машиностроение, 1980. 783 с.

Константин Владимирович Волков, генеральный директор;
Борис Николаевич Марьин, д-р техн. наук;
Владимир Алексеевич Ким, д-р техн. нак;
Алексей Иванович Евстигнеев, д-р техн. наук;
Татьяна Викторовна Новикова, начальник лаборатории;
Сергей Борисович Марьин, канд. техн. наук,
ser-bor-mar@yandex.ru;
Виктор Иванович Шпорт, д-р техн. наук

УДК 620.22

А.И. Беляков, А.А. Беляков *(ООО "МеталЛитМаш", г. Коломна)*

Структура, физико-механические, технологические свойства и области применения хромосодержащих чугунов

Исследовано влияние типа карбидов, микроструктуры на физико-механические свойства хромистых чугунов. Приведены их эксплуатационные свойства и области применения.

The influence of type of carbides, the microstructure on the physical and mechanical properties of chromium cast irons is investigated. Their service properties and applications are considered.

Ключевые слова: цементит; тригональный карбид; мартенсит; остаточный аустенит; твердость; износостойкость.

Keywords: cementite; trigonal carbide; martensite; residual austenite; hardness; wear resistance.

Сплавы системы Fe–Cr–C применяют как износостойкие и жаростойкие материалы. Кроме Cr такие сплавы могут содержать Mo, Ni, Cu, V и другие легирующие элементы. Хром – сильный карбидообразующий элемент, который влияет на такие свойства чугуна, как сопротивление воздействию высоких температур, сопротивление изнашиванию и стойкость против коррозии.

Износостойкие белые чугуны условно подразделяют на низкохромистые (белые, перлитные), среднехромистые (мартенситные, мартенситно-аустенитные) и высокохромистые (мартенситные, аустенитные, ферритные).

Заэвтектические чугуны не нашли применения в качестве износостойкого материала, так как крупные выделения первичного цементита в процессе изнашивания легко выкрашиваются.

Увеличение содержания в чугуне хрома приводит к последовательному изменению состава, строения и свойств карбидной фазы.

В зависимости от содержания хрома в сплавах железа формируется четыре типа карбидов: $M_3C(Fe, Cr)_3C$ – до 10 % Cr в чугунах; $M_7C_3(Fe, Cr)_7C_3$ – от 10 до 30 % Cr в чугунах; $M_{23}C_6(Fe, Cr)_{23}C_6$ – с высоким содержанием хрома; $M_3C_2(Fe, Cr)_3C_2$ – с высоким содержанием хрома и углерода (рис. 1).

Границы отдельных областей диаграммы могут перемещаться в зависимости от присутствия в чугуне других легирующих элементов.

В табл. 1 представлены четыре типа карбидов, встречающихся в сплавах системы Fe–C–Cr. При легировании хромом атомы железа замещаются атомами хрома. Твердость этих карбидов увеличивается с повышением содержания хрома из-за более прочной связи атомов углерода с атомами хрома.

Карбиды типа M_3C имеют состав $(Fe, Cr)_3C$ и соответствуют по своей природе цементиту. Химический состав карбидов типа M_3C оказывает существенное влияние на сопротивление материала абразивному изнашиванию особенно при повышенных температурах. Структура ле-

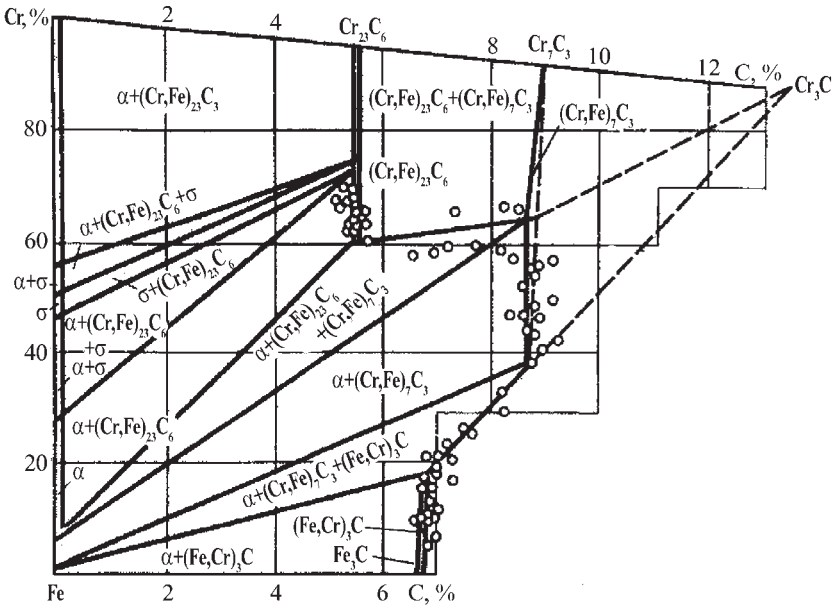


Рис. 1. Разрез пространственной диаграммы системы Fe–Cr–C при комнатной температуре

1. Типы карбидов

Тип карбидов	Кристаллическая решетка	Параметры решетки	Плотность, кг/м^3	Примечание
$(Fe_2Cr)_3C$	Ромбическая	$a = 4,52$ $b = 5,09$ $c = 6,74$	7670	Может содержать до 18 % Cr
$(Fe_2Cr)_7C_3$	Гексагональная	$a = 6,88$ $b = 4,54$	6920	Может содержать до 50 % Cr
	Ромбическая	$a = 4,54$ $b = 6,88$ $c = 11,94$		
	Ромбоэдрическая	$a = 13,98$ $b = 4,52$		
$(Fe_2Cr)_{23}C_6$	Кубическая гранецентрированная	$a = 10,64$	6970	Может содержать до 35 % Fe
$(Cr, Fe)_3C_2$	Ромбическая	$a = 2,82$ $b = 5,52$ $c = 11,46$	6680	Небольшое количество железа

дебурита с карбидами типа M_3C обычно состоит из цементитной матрицы с более или менее регулярными выделениями аустенита (рис. 2).

Первичные карбиды типа M_3C в сплаве, легированном 10 % Cr, растут в виде пластин с правильным полосчатым рисунком на поверхности плит. В сечении поперек направления роста этот рисунок представляют бороздки или чашеобразные выступы.

Тригональный или гексагональный карбид M_7C_3 формируется в сплавах при Cr/C = 3...10.

При отношении хрома к углероду, равном трем, карбиду соответствует формула $(Cr_2Fe_5)C_3$, при дальнейшем увеличении отношения хрома к углероду состав карбида преобразуется в $(Cr_3Fe_4)C_3$ и $(Cr_4Fe_3)C_3$, и при отношении, равном 8 – в $(Cr_5Fe_2)C_3$.

Структура эвтектики M_7C_3–Fe имеет аустенитную матрицу с четко выраженными почти однонаправленными стержнями карбидов, пронизывающих матрицу (рис. 3).

У структур (см. рис. 3) вязкость и прочность определяются составом основной металлической массы более сильно, чем карбидами, что позволяет достичь у чугунов и сталей с высоким содержанием хрома более высоких прочности и ударной вязкости по сравнению с ледебуритной структурой; карбиды M_7C_3 имеют более высокую твердость 1200...1800 HV, чем карбиды типа M_3C – 850...1100 HV.

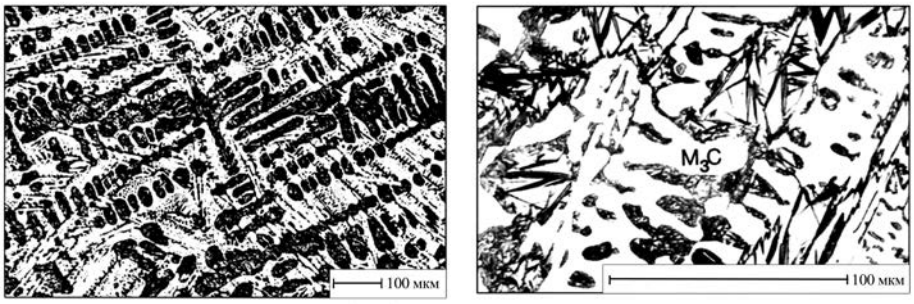
Гексагональные карбиды типа M_7C_3 обычно вырастают многогранниками. Количество, размеры и форма этих первичных карбидов являются определяющими для вязкости и износостойкости среднехромистых легированных чугунов.

Дальнейшее легирование хромом или снижение концентрации углерода приводит к появлению эвтектики с кубическим карбидом $M_{23}C_6$ (рис. 4).

Выбор марки чугуна зависит от характера изнашивания, свойственного конкретным деталям. В связи с этим существуют различные виды абразивного износа, которые классифицируются следующим образом:

1. Эрозионный износ, при котором частицы абразива перемешиваются вдоль или под небольшим углом к изнашиваемой поверхности, оставляя на ней риски.

2. Эрозионный износ под нагрузкой, в этом случае зерна абразива перемещаются вдоль изнашиваемой поверхности при движении контртела, прижимаемого некоторой силой к этой поверхности.



а) *б)*

Рис. 2. Микроструктура низкохромистого чугуна в литом состоянии [1]:
а – дендритная структура; *б* – темные участки, тонкие иглы мартенсита; в темных участках видны светлые участки остаточного аустенита

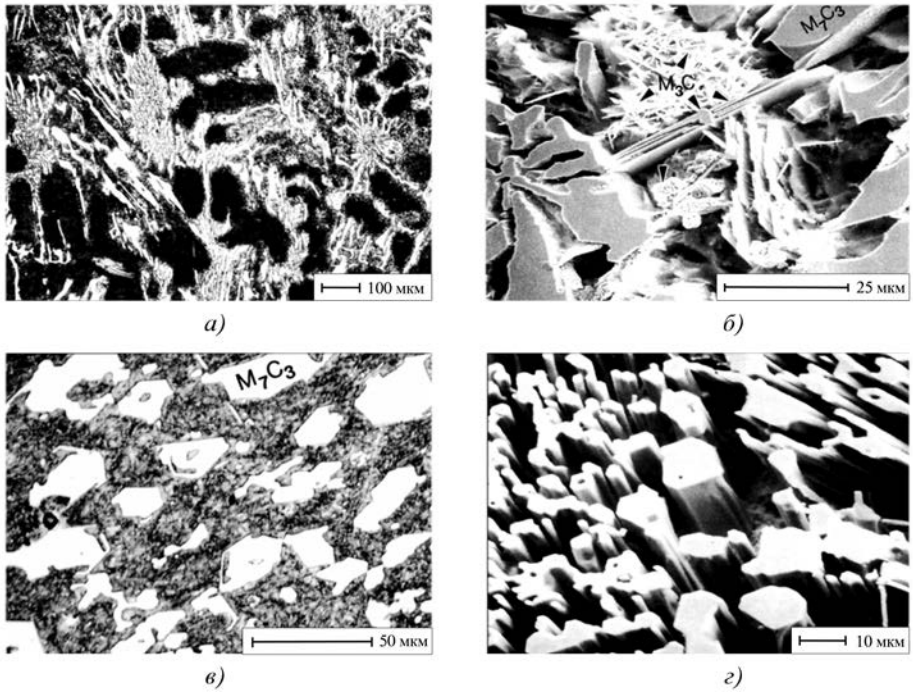


Рис. 3. Микроструктура термообработанного среднехромистого чугуна марки Нихард 4 [1]:
а, *б* – матрица из мартенсита, аустенита, бейнита с карбидами хрома M_7C_3 и цементита M_3C; *в* – структура тригональных карбидов (светлые) в мартенситной основе (темная); *г* – стержни тригональных карбидов M_7C_3, вытравленных из мартенситной основы

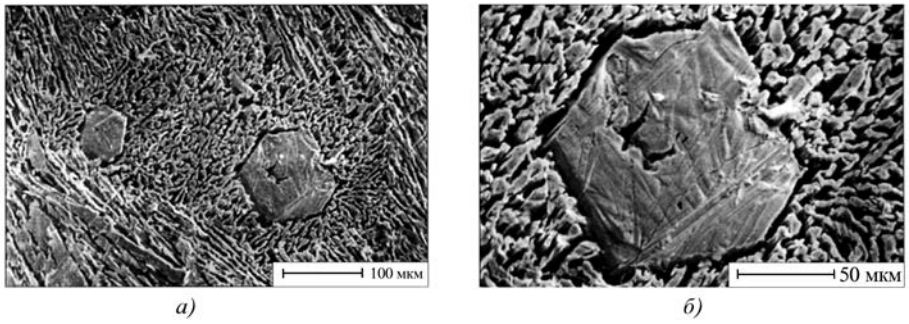


Рис. 4. Первичный карбид $M_{23}C_6$ в заэвтектическом хромистом чугуне с 28,5 % Cr и 4,2 % C в литом состоянии [1]

3. Ударно-абразивный износ, при котором частицы абразива "бомбардируют" изнашиваемую поверхность под прямым или близким к прямому углом атаки. При этом частицы абразива внедряются в поверхность отливки или отскакивают от нее; в этом случае в местах ударов частиц абразива на поверхности отливки возникают упругие или пластические деформации, в результате возникают микротрещины и происходит выкрашивание частиц металла.

Эрозионный износ может быть уподоблен процессу резания и если твердость абразивных частиц выше твердости металла, то происходит "износ микрорезанием". Если же твердость абразивных частиц меньше твердости металла, то вследствие трения и давления, оказываемого абразивным материалом на изнашиваемую поверхность, на этой поверхности развиваются химические реакции с образованием приграничного слоя, который уносится вместе с абразивом. Этот вид изнашивания можно назвать "послойным износом".

Чтобы абразив не разрушал износостойкий материал, твердость должна быть не менее 0,8 твердости абразива.

В табл. 2 приведена твердость некоторых абразивных материалов и структурных составляющих сплавов железа.

Для кварца SiO_2 твердость износостойкого материала должна составлять 10 000·0,8 = 8000 МПа.

Исследования и практика показали, что зависимость износостойкости металла от его твердости существует только внутри одной группы сплавов.

Присадка легирующих элементов измельчает строение перлита и повышает его твердость до 460 HV. Если при этом частично выделяется мартенсит, то твердость отбеленного чугуна с перлитно-мартенситной структурой достигает 700 HV. Термическая обработка такого чугуна проводится только для снятия напряжений.

При легировании чугуна достаточным количеством никеля и хрома матрица состоит преимущественно из мартенсита и частично из остаточного аустенита. Твердость мартенсита (500...1000 HV) зависит от температуры мартенситного превращения, температуры отпуска и от его химического состава. Твердость мартенситного белого чугуна зависит от химического состава, толщины стенки отливки и размера зерна в пределах 500...800 и далее 900 HV. Мартенситный чугун подвергается термообработке – отпуск при 300 °С для снятия напряжений, отпуск от 250 до 300 °С или отпуск при 450 °С с последующим охлаждением на воздухе для устранения остаточного аустенита для повышения твердости и вязкости.

Структура мартенситного ***низкохромистого белого чугуна*** состоит из первичного цементита и мартенситной матрицы. Химический состав мартенситных ледебуритных чугунов приведен в табл. 3. Мартенситные чугуны, как правило, применяются в литом состоянии, и их термическая обработка проводится для устранения возможных внутренних напряжений и отпуска мартенсита.

2. Твердость абразивных материалов и структурных составляющих сплавов железа

Абразивный материал	Твердость HV	Структурная составляющая сплавов железа	Твердость HV
Гипс	36	Феррит	70...200
Апатит	540	Нелегированный перлит	250...320
Полевой шпат	600...750	Низколегированный аустенит	250...350
Кварцит	950	Аустенит, хромовый чугун	300...600
Кварц	900...1200	Мартенсит	500...1000
Корунд	1800	Цементит	840...1100
Карборунд	2600	Карбид хрома M_7C_3	1200...1600

К таким чугунам относятся никельхромистые чугуны, называемые нихардами. Данные чугуны получили широкое распространение для отливок, подвергающихся абразивному износу. Состав нихарда сбалансирован так, что углерод находится в связанном виде, а металлическая основа после литья представляет мартенсит и остаточный аустенит. Практически в нихарде весь хром находится в карбидах цементитного типа $(Fe, Cr)_3C$, а весь никель растворен в металлической основе.

Содержание хрома и никеля в мартенситных чугунах должно быть достаточным, чтобы предупредить появление в структуре графита. Содержание хрома и никеля (см. табл. 3) должно быть максимальным для отливок из мартенситного чугуна толщиной более 100 мм, однако в матрице чугуна толстостенных отливок часто наряду с мартенситом присутствует остаточный аустенит. Для предупреждения появления остаточного аустенита рекомендуется вводить в чугун 0,5...1,0 % Mo.

Повышенное содержание остаточного аустенита в структуре мартенситного чугуна снижает его износостойкость и предел ударной усталости. Под действием напряжений от износа остаточный аустенит может упрочняться, при этом износостойкость чугуна восстанавливается. Под воздействием механических напряжений остаточный аустенит может превращаться в мартенсит, что сопровождается увеличением объема и напряжениями, вызывающими откалывание поверхностных слоев отливок. Для предупреждения отрицательного влияния остаточного аустенита отливки рекомендуется отпуск при 275 °С в течение 12...24 ч с последующим охлаждением на воздухе.

При указанной обработке остаточный аустенит в значительной мере превращается в бейнит, снимаются структурные напряжения в мартенсите, образовавшемся в литом состоянии, частично снимаются внутренние на-

3. Химический состав, % мас., мартенситных низколегированных белых чугунов [2]

Номер (марка) чугуна	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Другие элементы
Низкохромистые чугуны								
1 (Нихард 1)	3,0...3,6	0,3...0,5	0,3...0,7	1,5...2,6	3,3...4,8	–	До 0,5	–
2 (Нихард 2)	До 2,9	0,3...0,5	0,3...0,7	1,4...2,4	3,3...5,0	–	До 0,5	–
3 (Нихард 3)	3,3...3,6	0,3...0,5	0,3...0,7	2,4...2,7	3,3...4,8	–	До 0,5	0,25...1,0 B
4	3,3...3,6	0,3...0,6	0,5...0,8	1,5...2,0	2,7...3,3	До 2	0,7...1,1	–
5	3,0...3,5	0,3...0,7	0,7...1,2	1,5...3,0	До 2	1,5...2,5	2,0...4,0	–
6	3,0...3,3	0,2...0,4	0,7...0,9	2,4...2,6	2,4...2,6	1,9...2,1	–	–
7	3,7	0,4	1,2	1,9	1,4...1,8	3,0	–	–
8	1,8...3,0	До 1	2,0...6,0	До 2	До 4	До 3	–	–
9	3,2	0,5	2,5...4,0	–	–	0,5...1,0	0,2	–
10	3,3	0,5	1,5	1,5	0,7	2,5	0,3	–
Среднехромистые чугуны								
1 (Нихард 4)	2,6...3,2	1,8...2,0	0,4...0,6	8...9	5,0...6,5	–	До 0,5	–
2	2,0...3,5	До 0,8	0,5...1,0	11...14	До 2,0	До 1,2	До 1,2	–
3 (12CrMo)	3,0...3,5	0,5...0,8	0,5...0,8	11...14	–	До 1,0	0,5...1,0	–
4	2,7...3,2	0,8...1,2	0,3...0,5	12...16	0,9...1,3	–	0,3...0,6	0,2...0,5 V
5 (15-3ZC)	2,4...2,8	0,5...0,8	0,5...0,8	14...16	–	–	2,4...2,8	–
6 (15-3MC)	2,8...3,2	0,3...0,8	0,6...0,9	14...16	–	–	2,5...3,0	–

Номер (марка) чугуна	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Другие элементы
7 (15-3НС)	3,2...3,6	0,3...0,8	0,7...1,0	14...16	–	–	2,5...3,0	–
8 (15-2-1)	2,8...3,5	0,4...0,8	0,6...0,9	14...16	–	0,8...1,2	1,9...2,2	–
9	2,5...3,2	0,2...1,2	0,4...1,7	17...21	0,3...0,9	–	1,0...1,7	–
10 (20-2-1)	2,3...2,9	До 0,8	0,5...0,9	18...21	До 1,2	До 1,2	1,4...2,0	–
11	2,5	0,9	0,6	23	–	–	–	–
12	2,3...2,9	До 1,8	0,5...1,5	24...28	До 1,2	–	До 0,6	–
13	2,2...2,9	0,3...1,0	0,5...1,3	24...30	–	–	До 6,5	0,3...2,0 V
14	2,4	0,8	1,2	26	0,15	–	1,2	0,5 V
15	3,0	0,4	0,65	27...28	–	–	–	–
16	1,7...2,3	0,7...1,3	0,5...1,0	30...34	2,6...3,2	–	–	–
17	1,0...2,0	1,1...2,0	0,4	31...34	–	–	–	–
18	2,8	2,3	0,5	33	–	–	–	–
19	2,8...3,1	0,6...1,0	0,2...0,3	34...37	–	–	–	0,10...0,15 Ti

пряжения и повышаются твердость и предел ударной усталости. Еще более высокий предел ударной усталости достигается, если применяется двойная термическая обработка: отпуск при 450 °С, 4 ч, охлаждение на воздухе или в печи до комнатной температуры и выдержка при 275 °С, 16 ч.

Сопротивление ударной усталости прежде всего важно при определении качества размалывающих тел и брони шаровых мельниц. Предел ударной усталости определяется с помощью копра и шара, падающего на плиту с определенной высоты, и вычисляется числом падений шара до разрушения плиты.

Температура заливки чугунов Нихард 1 и Нихард 2 не должна превышать 1350 °С, в противном случае возможно выпадение сетки первичных карбидов. Во избежание появления трещин необходимо обеспечить медленное охлаждение отливок, особенно от температуры 150 °С до комнатной.

Чугун Нихард 2 (см. табл. 3) отличается от чугуна Нихард 1 более низким содержанием углерода и хрома и, следовательно, меньшей твердостью, но большими прочностью и вязкостью. Поэтому чугун Нихард 2 применяется в тех случаях, когда требуется высокая износостойкость.

Подавление графитизации осуществляется благодаря легированию хромом, а образование мартенсита – за счет легирования никелем.

С уменьшением скорости охлаждения отливки из нихарда увеличивается вероятность графитизации, которая недопустима из-за резкого падения износостойкости, а также затрудняется получение мартенсита при литье. Поэтому количество хрома, никеля и кремния зависит от толщины стенки отливки и способа литья табл. 4.

Физико-механические свойства чугунов Нихард 1 и Нихард 2 приведены в табл. 5. Благодаря легированию никелем данные чугуны превосходят соответствующие свойства нелегированного чугуна.

Чугун Нихард 1В по сравнению с чугуном Нихард 1 содержит дополнительно бор, который улучшает отбеливаемость и повышает твердость мартенсита до 1000 HV при литье в кокиль. Этот чугун не пригоден при работе в условиях ударных нагрузок.

Преимущество низкохромистого чугуна № 4 (см. табл. 3) заключается в уменьшении содержания остаточного аустенита (по сравнению с чугунами Нихард 1, Нихард 2, Нихард 1В) вследствие более низкого содержания никеля и повышения твердости, износостойкости и вязкости. Благодаря этому уменьшается скалывание поверхности размалывающих шаров и брони шаровых мельниц. Для снятия внутренних напряжений рекомендуется отпуск при 200...230 °С. Для получения оптимальной износостойкости отливки простой конфигурации ее можно охлаждать на воздухе от 930 °С.

В низкохромистом чугуне № 5 никель частично заменяется медью и молибденом. Химический состав такого чугуна рекомендуется подбирать по следующей формуле: % Mo + % Ni + 0,5 % Cu = 5. При этом содержание меди не должно превышать 2 % во избежание выделения в структуре свободной меди. Твердость чугуна № 5 составляет 500...650 HV. Содержание легирующих элементов зависит от толщины стенок отливок, для тонкостенных отливок их содержание может быть понижено. Для отливок с толщиной стенок около 30 мм сумма % Mo + % Ni + 0,5 % Cu может быть уменьшена до 3, а для отливок с толщиной стенок 50...100 мм – до 4.

Химический состав низкохромистых чугунов № 6 и 7, как и чугуна № 5, предлагается для снижения расхода никеля при получении мартенситного чугуна в литом состоянии. Твердость чугуна № 7 при содержании 3,6 % С относительно низкая, что свидетельствует о присутствии в структуре остаточного аустенита. Этому соответствует также более высокая ударная вязкость, чем у чугуна Ни-

4. Зависимость химического состава, % мас., чугунов Нихард 1 и Нихард 2 от толщины стенки отливки [4]

Элемент	Толщина стенки отливки, мм					
	До 12	12...25	25...50	50...75	75...100	Св. 100
Чугун Нихард 1						
C	3,2...3,6					
Si	0,7* / 0,8	0,6 / 0,7	0,5 / 0,6	0,4 / 0,5	0 4 / 0,4	0 4 / 0,4
Mn	0,4...0,6					
Ni	3,8 / 3,3	4,0 / 3,6	4,2 / 3,9	4,4 / 4,2	4,6 / 4,5	4,8 / 4,8
Cr	1,6 / 1,5	1,8 / 1,7	2,0 / 1,9	2,2 / 2,1	2,4 / 2,3	2,6 / 2,5
Чугун Нихард 2						
C	2,7...3,2					
Si	0,9 / 1,0	0,7 / 0,8	0,6 / 0,7	0,5 / 0,6	0,4 / 0,5	0,4 / 0,4
Mn	0,4...0,6					
Ni	4,0 / 3,5	4,2 / 3,8	4,4 / 4,1	4,6 / 4,4	4,8 / 4,7	5,0 / 5,0
Cr	1,5 / 1,4	1,7 / 1,5	1,8 / 1,6	2,0 / 1,8	2,2 / 2,0	2,4 / 2,2

* В числителе приведены значения для способа литья в землю, а в знаменателе – для литья в кокиль.

5. Физико-механические свойства чугунов Нихард 1 и Нихард 2 [3]

Марка чугуна	Способ литья	HB	$\sigma_в$	$\sigma_и$	Стрела прогиба f, мм	E, МПа	Коэффициент линейного расширения α, 10^{-6} 1/°C, при температуре, °C			Теплопроводность λ, Вт/(м·К), при температуре, °C		Плотность γ, кг/м^3
			МПа				10...95	10...260	10...425	100	450	
Нихард 1	В землю	550...650	280...350	500...620	2,0...2,8	165...180	8,1...9,0	11,3...11,9	12,2...12,8	14,0	18,8	7700
	В кокиль	600...725	350...420	560...850	2,0...3,0							
Нихард 2	В землю	525...625	320...390	560...680	2,5...3,0	165...180						
	В кокиль	575...675	420...530	575...675	2,5...3,0							

хард 1. Отпуск при 400 °C с выдержкой 24 ч повышает твердость на 130 HB.

Марганец (2,0...6,0 %), как медь или молибден, способствует образованию в структуре белого чугуна мартенсита и остаточного аустенита. Исследовано влияние скорости охлаждения от 980 °C до комнатной температуры на твердость размалывающих шаров из низкохромистого чугуна № 8, залитых в песчаную форму.

Наибольшая твердость с увеличением скорости охлаждения достигается при содержании марганца ближе к нижнему пределу. При данной скорости охлаждения и превышении оптимального содержания марганца в структуре чугуна выделяется остаточный аустенит и твердость резко падает. Отсюда следует, что содержание марганца должно быть точно определено для каждой отливки как при охлаждении ее на воздухе, так и в форме, причем допускаются лишь незначительные колебания в содержании марганца и других аустенизирующих элементов.

Если из чугуна одной плавки изготовляются отливки с различной толщиной стенок, то в некоторых случаях следует считаться с возможностью образования остаточного аустенита. Поэтому высокомарганцовистый чугун пригоден только для массового изготовления простых отливок, например размалывающих шаров.

Из-за высокого содержания марганца в низкохромистом чугуне № 9 в структуре всегда присутствует остаточный аустенит. Отпуск при температуре 425 °C способствует распаду большей части остаточного аустенита в мартенсит. Низкохромистый чугун № 10 при охлаждении в песчаных формах частично содержит в структуре перлит и бейнит. Поэтому отливки (например, размалывающие шары) рекомендуется выбивать из формы при температуре 900...1000 °C и охлаждать на воздухе, что обеспечивает получение аустенитно-мартенситной структуры. При обработке холодом при температуре –70 °C аустенитно-мартенситная структура превращается в мартенситную.

Эвтектика в ***среднехромистых чугунах*** не имеет ледебуритного строения и характеризуется разрозненным расположением карбидов.

Благодаря такой структуре эвтектики вязкость и прочность среднехромистых чугунов выше, чем у ледебуритных чугунов, что объясняется большим влиянием матри-

цы, чем карбидов. Твердость карбидов хрома 1200...1600 HV значительно выше твердости цементита (840...1100 HV), и поэтому среднехромистые чугуны при одинаковой матрице характеризуются большей износостойкостью, чем ледебуритные чугуны.

Чугун № 1 марки Нихард 4 (см. табл. 3) содержит относительно низкое содержание хрома (8...9 %) и образование карбидов хрома в этом чугуне связано с высоким содержанием никеля (5,0...6,5 %) и кремния (1,8...2,0 %). Содержание легирующих элементов в чугуне № 1 приблизительно эвтектическое. Вследствие высокого содержания никеля образуется мартенситно-аустенитная структура. Даже при медленном охлаждении в отливке не выделяется перлит или промежуточные структуры.

Для окончательного превращения остаточного аустенита чугун № 1 подвергают термической обработке: нагрев с печью, выдержка 4...8 ч при 750...800 °С с последующим охлаждением на воздухе или с печью, при этом происходит превращение аустенита в мартенсит. Охлаждение с печью обеспечивает получение чугуна с более высокими значениями ударной вязкости, чем при охлаждении на воздухе.

Если указанная термическая обработка не может быть осуществлена из-за опасности образования трещин в отливках или их коробления, то можно применить другой режим: отпуск при 550 °С, 4 ч, охлаждение на воздухе и вторичный отпуск при 450 °С, 16 ч, охлаждение на воздухе. Однако при этом получаются более низкие значения твердости и предела ударной усталости, чем при указанном нагреве до 750...800 °С.

При уменьшении содержания углерода в чугуне Нихард 4 предел ударной усталости повышается. Ударная вязкость чугуна Нихард 4 выше, чем ударная вязкость ледебуритного чугуна Нихард 2, но износостойкость часто ниже, вероятно, вследствие присутствия остаточного аустенита [1].

Рис. 5. Зависимость твердости и износостойкости мартенситного хромистого чугуна (12...14 % Cr; 1,4...1,8 % Mo; 0,5...0,8 % Mn; 0,3...0,8 % Si) от содержания карбидов и углерода [1]:
1 – относительная износостойкость; *2* – твердость

Среднехромистые чугуны № 2–4 применяются преимущественно в закаленном состоянии (с мартенситной структурой) и реже в литом состоянии (с перлитной или аустенитной структурой, в зависимости от содержания легирующих элементов). Вследствие низкого содержания хрома эти чугуны даже при низком содержании углерода (около 2 %) характеризуются умеренной прокаливаемостью, вследствие чего их часто дополнительно легируют другими элементами.

Чугуны с содержанием 12...14 % Cr не отличаются наибольшей износостойкостью. Но, как и в других среднехромистых чугунах, здесь можно путем повышения содержания углерода увеличивать количество карбидов и износостойкость (рис. 5).

Из рис. 6 видно, что при отношении Cr/C < 3 (в случае содержания более 3 % C) существует область, где кроме карбидов хрома выделяется также цементит (M_3C), отличающийся более низкой твердостью и хрупкостью.

Другой недостаток повышенного содержания углерода заключается в том, что при уменьшении отношения Cr/C ухудшается прокаливаемость. Даже при изготовлении относительно тонкостенных отливок для обеспечения прокаливаемости чугун необходимо легировать другими элементами и прежде всего молибденом. На рис. 7 приведена диаграмма зависимости максимальной прокаливаемости цилиндрических образцов различного диаметра из хромистого чугуна при охлаждении на воздухе от соотношения Cr/C и содержания молибдена.

Среднехромистые чугуны № 5–7 (см. табл. 3) с содержанием 14...16 % Cr, легированные молибденом для обеспечения прокаливаемости и отличающиеся друг от друга содержанием углерода, имеют наибольшее применение по сравнению с другими среднехромистыми износостойкими чугунами.

Различное содержание углерода влияет на прокаливаемость, обрабатываемость, максимальную твердость и износостойкость после закалки. Соответственно отно-

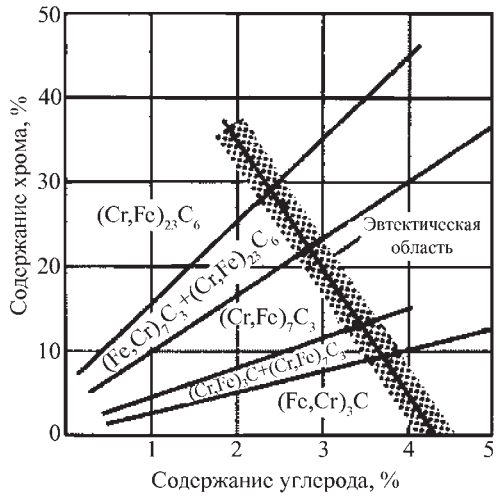


Рис. 6. Диаграмма образования смешанных карбидов в Fe–C–Cr-сплавах [1]

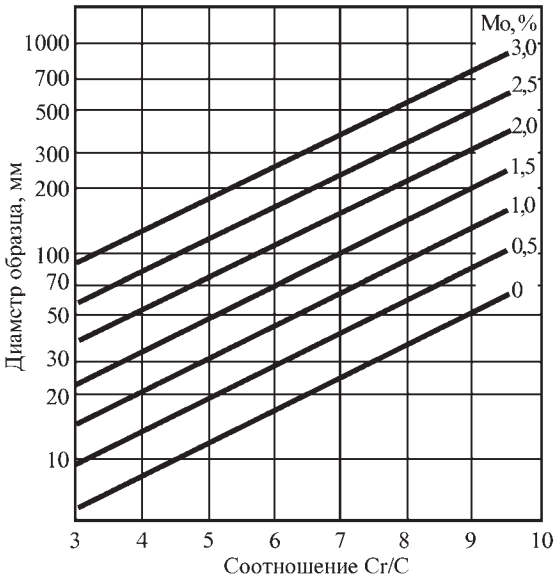


Рис. 7. Диаграмма зависимости цилиндрических образцов различного диаметра из хромистого чугуна с 0,7 % Mn и 0,9 % Si при охлаждении на воздухе от соотношения Cr/C и содержания Mo [1]

шению Cr/C чугун № 7 марки 15-3НС характеризуется прокаливаемостью, достаточной для сквозной закалки на воздухе стенки толщиной 70 мм. Аналогично обеспечивается сквозная закалка стенки толщиной 90 и 120 мм соответственно из чугунов № 6 марки 15-3МС и № 5 марки 15-3ZC.

После неполного отжига твердость чугуна марки 15-3ZC снижается до 35...40 HRC, а твердость чугуна марки 15-3НС остается не ниже 40...44 HRC. После закалки на мартенсит твердость чугуна марки 15-3НС составляет 62...67 HRC, т.е. выше, чем у чугунов с меньшим содержанием углерода марки 15-3ZC. Более высокая твердость чугуна марки 15-3НС с повышенным содержанием углерода объясняется значительным содержанием карбидов хрома в структуре и высоким содержанием углерода в мартенсите, повышающим его твердость.

Структура чугунов марки 15-3 в литом состоянии после охлаждения в сырой форме обычно перлитная. Только быстро охлажденные тонкостенные отливки могут частично иметь в структуре чугуна мартенсит или остаточный аустенит. Склонность к образованию остаточного аустенита увеличивается с улучшением прокаливаемости и поэтому с уменьшением содержания углерода. Закалка осуществляется по следующему режиму: нагрев до 950 °С, выдержка 1...2 ч, охлаждение в спокойном или движущемся воздухе. Закаленный чугун подвергается отпуску при 210...270 °С; при этом твердость не изменяется.

Прокаливаемость рассматриваемых чугунов может быть недостаточна, если отливки толстостенные или очень сложной конфигурации, вследствие чего в последнем случае требуется медленное охлаждение для предупреждения образования трещин. Для дальнейшего повышения прокаливаемости в эти чугуны вводится добавка 0,8...1,0 % Cu. При этом, несмотря на понижение содержания молибдена до 2,0 %, достигается сквозная закалка стенок толщиной 120 мм. Предполагается, что медь изменяет распределение молибдена между матрицей и карбидами и поэтому в матрице растворяется больше молибдена, что улучшает прокаливаемость.

Медь и никель взаимозаменяемы. Однако следует помнить, что действие никеля на образование остаточного аустенита сильнее, чем меди, и поэтому рекомендуется, чтобы содержание никеля было меньше, чем меди.

Чугун № 8 марки 15-2-1 (см. табл. 3) вследствие содержания меди или никеля отличается большей склонностью к образованию остаточного аустенита, чем чугуны марки 15-3, не содержащие медь и никель. Эта склонность усиливается с уменьшением содержания углерода.

Для предупреждения образования остаточного аустенита необходимо при закалке чугуна марки 15-3 применять более продолжительную выдержку и более высокую температуру. Требуется выдержка при 950 °С в течение 2...4 ч, а иногда более продолжительная. Кроме того, высокая температура нагрева способствует большему содержанию остаточного аустенита в чугуне № 13, что затрудняет получение достаточно высокой твердости. Отпуск при 400...500 °С, как правило, позволяет осуществить превращение остаточного аустенита в мартенсит. Затем требуется второй отпуск при 270 °С.

Чугуны с содержанием хрома выше 17 % условно называются ***высокохромистыми*** (см. табл. 3).

Матрица высокохромистого чугуна в зависимости от химического состава и термической обработки отливок может быть различной.

Затвердевание чугуна при содержании в нем до 30 % Cr начинается (в зависимости от химического состава) с выделения первичного аустенита или первичных карбидов. Эвтектический состав смещается с увеличением содержания хрома к более низкому содержанию углерода (см. рис. 6). Аналогично влияют кремний и никель. При содержании хрома более 18...20 % эвтектические карбиды выделяются преимущественно в форме длинных игл или пластинок, а при более низком содержании хрома в компактной форме. Первичный и эвтектический аустенит насыщены углеродом и легирующими элементами.

Высокохромистый чугун № 9 (см. табл. 3) похож на среднехромистые чугуны № 5–8 по структуре, термической обработке и износостойкости. Он успешно применяется для изготовления износостойких, толстостенных отливок, например облицовочных плит для шаровых мельниц при размоле руды.

Чугун № 10 марки 20-2-1 также применяется для толстостенных отливок. Но в противоположность чугуну № 9 температура его закалки обычно ниже и составляет 950...1000 °С для предупреждения большого образования остаточного аустенита из-за относительно высокого содержания никеля и меди. В литом состоянии структура чугуна марки 20-2-1 (при толщине стенки около 100 мм) аустенитная. Но этот аустенит неустойчив и при изнашивающих нагрузках может упрочняться вследствие наклепа.

В чугунах № 11–15 содержание хрома повышается до 23...30 % для улучшения прокаливаемости. Соответственно высокому отношению Cr/C содержание углерода в матрице меньше и образуется мартенсит, более бедный углеродом и с меньшей твердостью. Этим объясняется пониженная износостойкость чугунов с высоким содержанием хрома.

Чугуны № 11–15 относительно недорогие, имеют высокие прокаливаемость, коррозионную стойкость. Поэтому они широко применяются прежде всего в насосостроении. Молибден и никель повышают прокаливаемость и износостойкость этих чугунов. Из-за высокого содержания хрома нижняя граница образования аустенита повышается, что влечет за собой более высокие температуры закалки. Так, например, для чугуна № 11 температура закалки рекомендуется 1100 °С. При последующем охлаждении на воздухе твердость чугуна должна быть 600 НВ. Для улучшения обрабатываемости (снижения твердости до 350...450 НВ) необходим неполный отжиг при 750...790 °С с выдержкой в течение 12...24 ч и с последующим охлаждением с печью или на воздухе. Аналогичная термическая обработка применяется и для других высокохромистых чугунов этого типа [1].

Часто чугуны с 23...28 % Cr применяются в литом состоянии. При этом чугун имеет полностью или преимущественно аустенитную структуру с мартенситом или перлитом в зависимости от толщины стенки, скорости охлаждения и содержания легирующих элементов. Относительно неустойчивый аустенит под действием изнашивающих нагрузок упрочняется, и поэтому в большинстве случаев получается достаточно хорошая износостойкость чугуна. Другое преимущество – хорошая коррозионная стойкость чугуна при его применении в насосах или мельницах для мокрого измельчения.

Увеличение содержания молибдена в этих чугунах улучшает их износостойкость. Например, в чугуне № 13 содержание молибдена повышено до 6,5 %. После закалки при 1100 °С износостойкость этого чугуна значительно возрастает [1]. Другое преимущество молибдена заключается в повышении коррозионной стойкости, в особенности во влажной хлорсодержащей среде. Содержание никеля, увеличивающего устойчивость аустенита, должно быть минимальным, если предполагается его упрочнение под действием нагрузки при износе. В этих условиях содержание марганца не должно превышать 1,3 %.

Содержание 0,25...0,5 % V в чугуне с 26 % Cr значительно повышает предел прочности при изгибе. Увеличение содержания ванадия до 1...2 % значительно повышает механические свойства такого чугуна. Легирование высокохромистого чугуна ванадием способствует также увеличению его износостойкости.

Чугун № 14 применяется, в частности, при изготовлении центробежно-литых двухслойных труб. Максимальная твердость чугуна № 14 достигается при температуре 1000...1100 °С [1].

Дальнейшее повышение хрома и отношения Cr/C позволяет дополнительно увеличить прокаливаемость. Если же одновременно повышается содержание хрома и углерода (чугун № 15), то увеличивается количество карбидов и повышается износостойкость. Однако при повышенных механических нагрузках износостойкость снижается, потому что крупные и хрупкие карбиды разрушаются и выкрашиваются. Следует также учитывать понижение запаса прочности при высоком содержании углерода.

Чугуны № 15–18 находятся на границе между износостойкими и коррозионно-стойкими высокохромистыми чугунами. Чугун № 16 с пониженным содержанием углерода (1,7...2,3 %) и одновременно с высоким содержанием хрома (30...34 %) отличается лучшей коррозионной стойкостью и худшей износостойкостью по сравнению с чугунами с более низким содержанием хрома (№ 11–15). Обычно ферритная структура чугуна с таким содержанием хрома и углерода при высоком содержании никеля (2,6...3,2 %) частично превращается в аустенитную (чугун № 16). Твердость этого чугуна в литом состоянии 40...45 HRC. Отливки из чугуна № 16 в литом состоянии применяются для насосов.

При дальнейшем увеличении содержания хрома и исключения никеля (чугуны № 17–19) образуется ферритная структура. Чугуны № 17, 18 коррозионно- и жаростойкие. Ферритный чугун № 19 с твердостью 360...410 НВ применяется для насосов. Небольшое содержание титана в этом чугуне способствует образованию мелкозернистой структуры и улучшению прочности и повышению твердости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Laird II G.L.** Gefuge der carbidisschen Gusseisensorten Ni-Hard 1, Ni-Hard 4 und Chromgusseisen // Giesserei-Praxis. 1992. 13/14. P. 204–220.

2. **Henke F.** Verschleissbestanndige weisse Gusseisen // Teil. Gisser.– Prax. 1973. № 1–4.

3. **Die** verschleissfesten Ni-Hard-Werkstoffe // International Nickel. London, 1967.

4. **Материалы** в машиностроении. Выбор и применение. Т. 4. Чугун / под ред. А.А. Жукова, А.Д. Шермана. М.: Машиностроение, 1969. 248 с.

Алексей Иванович Беляков, канд. техн. наук, первый зам. генерального директора,
bai49@mail.ru;
Алексей Алексеевич Беляков, инженер

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 268-36-54, 268-69-19. **http://www.mashin.ru**
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 13.07.2010 г. Подписано в печать 20.09.2010 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,79. Заказ 641. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.