



The research results in the field of structure formation and characteristics of castings received by continuous cyclic casting by directional solidification of white high chromium, gray and high-duty cast irons are generalized, as well as examples of their practical application are given.

А. М. БОДЯКО, В. Ф. БЕВЗА, С. В. ГАЛАГАЕВ, В. С. МАЗЬКО,
ИТМ НАН Беларуси

НЕПРЕРЫВНО-ЦИКЛИЧЕСКОЕ ЛИТЬЕ НАМОРАЖИВАНИЕМ: ОТ ИДЕИ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ

УДК 621. 74. 047

Одним из принципиально новых методов, разработанных в ИТМ НАН Беларуси, является метод непрерывно-циклического литья полых цилиндрических заготовок мерной длины без применения стержня. В его основу положен принцип направленного затвердевания, при котором наружная поверхность отливки ограничивается рабочей полостью кристаллизатора, а внутренняя формируется непосредственно из расплава, т. е. без стержня (рис. 1). Сущность заключается в следующем. Жидкий металл через сифонную литниковую систему 1 и соединительный стакан 2 подают в стальной водоохлаждаемый кристаллизатор, состоящий из стационарной 3 и подвижной 4 частей до его заполнения на высоту, равную высоте получаемой отливки 5. Затем подачу металла прекращают и делают выдержку для намораживания стенки заготовки необходимой толщины. После заданной выдержки затвердевшую корку 5, составляющую тело отливки, извлекают захватами 4

вверх из стационарного кристаллизатора 3 и расплава. Одновременно с началом извлечения заготовки расплав, находящийся в осевой ее части, попадает на освобождающиеся участки рабочей втулки кристаллизатора 3 и начинается намораживание следующей отливки. В это время в кристаллизатор через сифонную литниковую систему подают новую порцию расплава, объемом, равным объему извлеченной отливки, возвращают подвижную часть кристаллизатора в исходное положение и вновь заполняют его до заданного уровня. Цикл повторяется. Таким образом, через заданный период из кристаллизатора извлекают отливки, равные его высоте, и с тем же периодом заливают новые порции металла. В результате формирование отливки происходит в течение времени выдержки затвердевающей корки в кристаллизаторе, а литье заготовок осуществляется в непрерывно-циклическом режиме. Как видно из описания схемы литья, главной и принципиально новой отличительной особенностью метода является возможность получения полых отливки мерной длины без применения стержня.

Отсутствие стержня исключает такие трудоемкие и экологически вредные операции, как формовка, выбивка, очистка и обрубка литья, что позволяет по-новому подойти к проблеме переработки отходов, получающихся при механической обработке отливок. Следует особо подчеркнуть, что переработка отходов и создание ресурсосберегающих технологий приобретают все большую актуальность, и в первую очередь для государств, не имеющих собственной сырьевой базы, в том числе и для нашей республики.

В результате теоретических исследований, математической обработки и анализа многочисленных экспериментальных данных на базе метода непрерывно-циклического литья намораживанием разработаны принципиально новые технологические процессы получения отливок диаметром 30—250 мм и длиной 100—300 мм из чугунов различных классов и марок. Долгое время считалось, а на практике порой продолжают считать и сегодня,

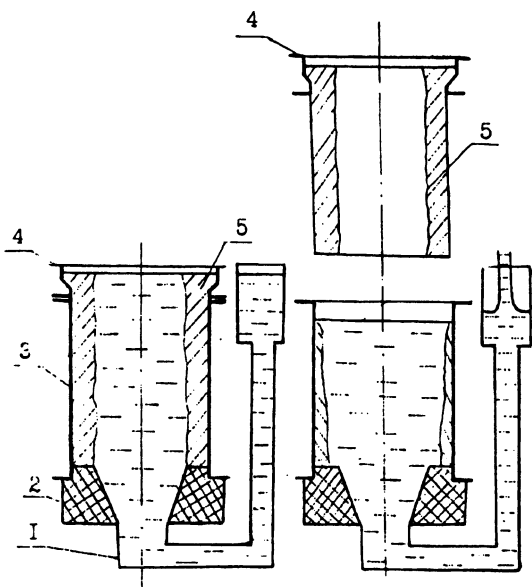


Рис. 1. Принципиальная схема непрерывно-циклического литья намораживанием: 1 — металлопровод; 2 — соединительный стакан; 3 — кристаллизатор стационарный; 4 — кристаллизатор подвижный; 5 — отливка

что белый чугун — это хрупкий и не поддающийся обработке резанием материал. Но успехи, достигнутые в последние годы, главным образом в области легирования, существенно меняют представления об этих перспективных материалах. Однако возможности термообработки, особенно с точки зрения повышения физико-механических свойств и служебных характеристик белых легированных чугунов, в первую очередь ударной вязкости, изучены и используются далеко не полностью.

При исследовании структуры и свойств отливок из белых высокохромистых чугунов (БВХЧ) с карбидами тригонального типа (M_7C_3), обладающими повышенной износостойкостью в условиях ударно-абразивного износа, установлено, что для преобладания в структуре заготовок, полученных методом НЦЛН, тригональных карбидов содержание хрома в чугуне должно составлять 12—14%. Варьируя углеродным эквивалентом, интенсивностью теплоотвода и другими теплофизическими характеристиками, можно получать в структуре отливок от 18 до 70% карбидов с различной направленностью: от полностью разориентированных (рис. 2, а) до расположенных перпендикулярно к поверхности теплоотвода (рис. 2, б). Последние как раз и обеспечивают максимальную износостойкость при абразивном изнашивании в случае, когда изнашиваемая поверхность эквидистантна поверхности теплоотвода при литье.

Анализ микроструктуры отливок из БВХЧ показал, что скорость их охлаждения после извлечения из кристаллизатора существенно влияет на размеры и морфологию карбидов. Так как температура отливок в момент извлечения из кристаллизатора составляет 1140—1190°C, появляются широкие возможности в управляющем воздействии на режим термообработки. Было отмечено, что при достаточно медленном охлаждении в результате диффузионного распада аустенита вогнутый рельеф карбидного скелета заполняется новыми слоями карбида за счет притока к нему атомов углерода и хрома из аустенита. Одновременно происходит растворение в аустените тонких, изолированно расположенных карбидных ответвлений. В результате карбиды меняют форму своих очертаний и укрупняются, т. е. происходит их коагуляция. С целью ускорения процессов коагуляции карбидов отливки в течение 4—7 с после извлечения из кристаллизатора помещали в электрическую печь сопротивления, предварительно нагретую до 950°C. После 2—3 ч выдержки крупные карбидные включения приобретают овальную форму и изолированное расположение в металлической матрице (рис. 3, в, г).

В то же время быстрое охлаждение отливок до температуры ниже фазовых превращений значительно тормозит процесс коагуляции. При последующем нагреве и выдержке литых заготовок при температуре 950—1000°C в течение 2—3 ч коагуля-

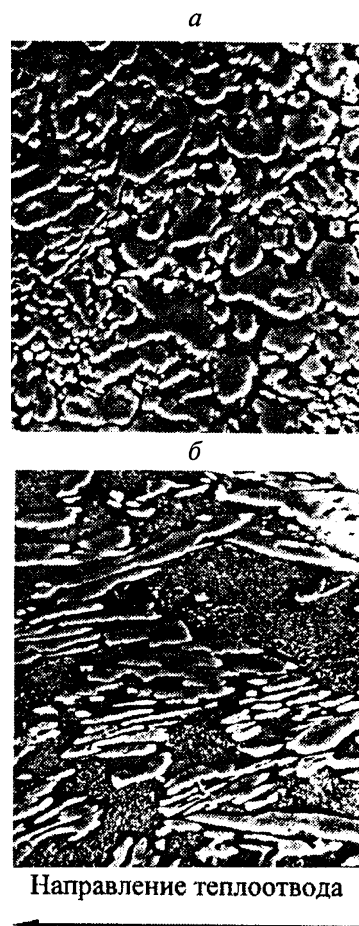


Рис. 2. Микроструктура на расстоянии 3 мм от наружной поверхности отливки из БВХЧ: а — $C_s = 3,87$; б — $C_s = 2,93$. $\times 1500$

ция карбидов и растворение их мелких включений практически не наблюдаются (рис. 3, б). Таким образом, предварительное охлаждение ниже критической температуры A_1 , способствующее значительному ускорению первой стадии графитизации обычных белых чугунов, затормаживает процесс коагуляции тригональных карбидов. Такой неожиданный эффект ускорения фазовых превращений при отжиге отливок из БВХЧ с горячего посада, вероятно, объясняется особенностями получаемой при непрерывно-циклическом литье структуры вследствие высокой скорости затвердевания. Возможно, на данный эффект влияют также многочисленные примеси, присутствующие в чугуне, которые при быстром охлаждении выделяются из твердого раствора и скапливаются на поверхности карбидов, снижая их способность к коагуляции. Более глубокое исследование этого явления продолжается.

Твердость отливок после отжига в течение 2 ч с использованием первичного тепла составляет 30—32 HRC. С увеличением времени отжига до 5 ч твердость уменьшается до 26 HRC. Снижение твердости до указанных значений и изолированное расположение карбидов в матрице позволяют проводить токарную обработку отливок из БВХЧ инструментом с пластинами типа ВК-8 на достаточно высоких режимах резания с образованием

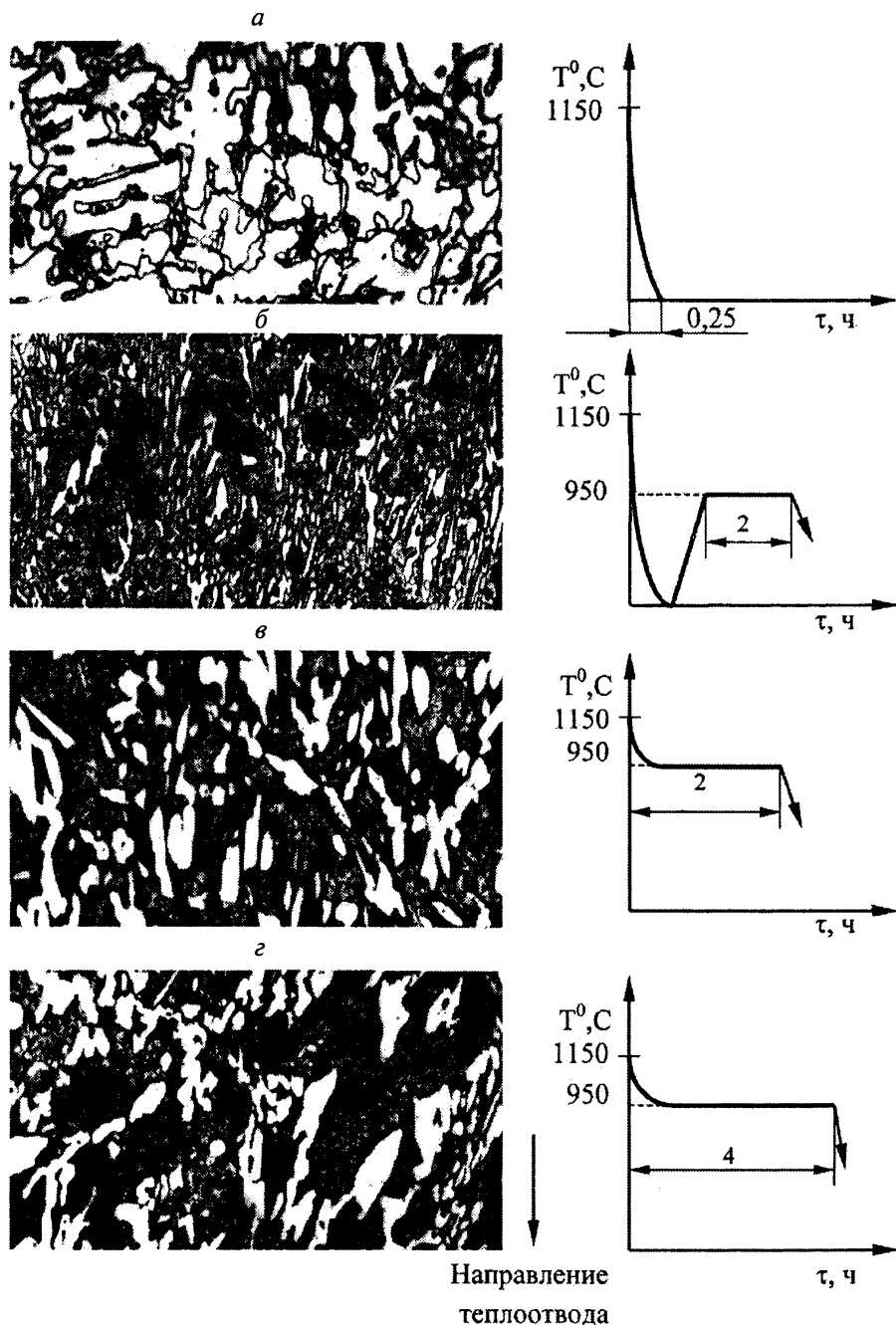


Рис. 3. Влияние режима термообработки на структуру заготовок из БВХЧ. $\times 500$

сливной стружки, подобно получаемой при обработке сталей. После обработки заготовки подвергали закалке при температуре $950\text{--}1050^\circ\text{C}$. Максимальная твердость (65—66 HRC) достигнута при закалке в масле при температуре 1050°C . При этом трещин и микротрещин в теле отливок не обнаружено. Ударная вязкость закаленных образцов составляет $50\text{--}70\text{ кДж/м}^2$. В результате растворения мелких эвтектических карбидов и образования вторичных точечных металлическая основа упрочняется и ее микротвердость после закалки достигает $H_{30}\ 8500\text{--}9000\text{ МПа}$, что выше твердости цемента. Однако параметры кристаллической решетки металлической основы, полученные при рентгеноструктурном анализе закаленных образцов, по-

казывают, что она представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе, при этом характерного для мартенситных структур игольчатого строения металлической основы в непрерывно-литых заготовках не обнаружено (рис. 3). Поэтому классифицировали ее как безыгольчатый мартенсит.

Для изготовления износостойких вставок пуансонов прессы силикатного кирпича ранее использовали термообработанные (закаленные) втулки из сталей различных классов, в том числе цементированные и борированные, а также литые в кокиль из хромо-молибденового чугуна. Главным недостатком пуансонов из сталей является низкий ресурс работы (1,5—2 недели при

трехсменном режиме работы оборудования), а из высоколегированного чугуна — хрупкие разрушения. При изготовлении первых опытных партий втулок пуансонов мы исходили из традиционных представлений о том, что измельчение структурных составляющих за счет легирования, модифицирования и других технологических приемов приводит к повышению износостойкости. Было установлено, что при НЦЛН высокодисперсную структуру в наружной зоне отливки проще всего получать за счет высокой скорости кристаллизации. Однако первые промышленные испытания показали, что втулки с литой рабочей поверхностью имеют катастрофически низкую износостойкость, сопоставимую с закаленными углеродистыми сталями (рис. 4, а), что было неожиданным. Для выяснения причин этого явления провели комплекс специальных исследований, включая изучение особенностей распределения легирующих элементов между составляющими структуры чугуна. Оказалось, что металлическая основа вокруг высокодисперсных карбидных включений обеднена углеродом и легирующими элементами, что снижает ее прочность и твердость. В результате мелкие карбидные включения (а именно карбиды создают основное сопротивление износу) под воздействием абразивных частиц легко вырываются из разупрочненной матрицы и уносятся не износившись. После проточки литой рабочей поверхности изношенных втулок на глубину 2—3 мм и повторной установки на прессы ресурс их работы увеличился до 2000—2500 ч (3—4 месяца против 1,5—2 недель), т. е. более чем в 8 раз! Анализ микроструктуры втулок в процессе работы показал, что износостойкость повышается, по мере того как коагулированные карбиды при удалении от наружной поверхности укрупняются, приобретают разветвленную форму и направлены тригональной осью нормально к поверхности износа. Таким образом, впервые было показано, что повышение дисперсности структуры белых высокохромистых чугунов сверх некоторого предела ведет к снижению их абразивной износостойкости. При

литье методом НЦЛН это сразу же позволило отказаться от дорогостоящих ванадия и титана, которые обычно вводят в сплав с целью измельчения фазовых составляющих. На основе полученных данных были разработаны сплавы со структурой, обеспечивающей работу втулок пуансонов в течение 10—12 мес. Однако на такую длительную эксплуатацию оказались не рассчитаны другие узлы оборудования, и как это не парадоксально, по просьбе производителей для серийного производства освоен чугун с ресурсом работы 34 мес. Хрупких разрушений наших втулок не установлено. Их производство организовано на экспериментальной базе института. Втулки поставляем Могилевскому, Минскому и другим комбинатам силикатных изделий республики.

Не менее интересные результаты получены при использовании заготовок из БВХЧ в качестве фильер для правильно-отрезных станков, на которых производят правку арматурной проволоки (диаметром 6—14 мм), используемой при производстве железобетонных конструкций. Фильеры работают в условиях высоких динамических нагрузок и сухого трения (скорость протяжки — до 90 м/мин, частота вращения правильной рамки — до 2000 об/мин). С использованием комплекта стальных фильер (5 шт.) выправляют лишь одну-две тонны проволоки и производят их замену, так как при эксплуатации на указанных режимах фильеры разогреваются до 400—450°C, что вызывает отпуск закалочной структуры и резкий износ (рис. 5, кривая — сталь). При установке фильер нашего производства на станках начали выправлять до вагона проволоки (50—60 т), т. е. износостойкость увеличена более чем в 40 раз при повышении цены лишь в 3 раза. В данном случае в фильерах на истирание работает внутренняя структура отливки с разветвленными карбидными включениями размером до 150 мкм. При этом было установлено, что в процессе эксплуатации интенсивность изнашивания уменьшается, что вызвано наклепом матрицы чугуна, упрочненной к тому же разрушаемой карбидной фазой (рис. 5), т. е. налицо имеем пластическую

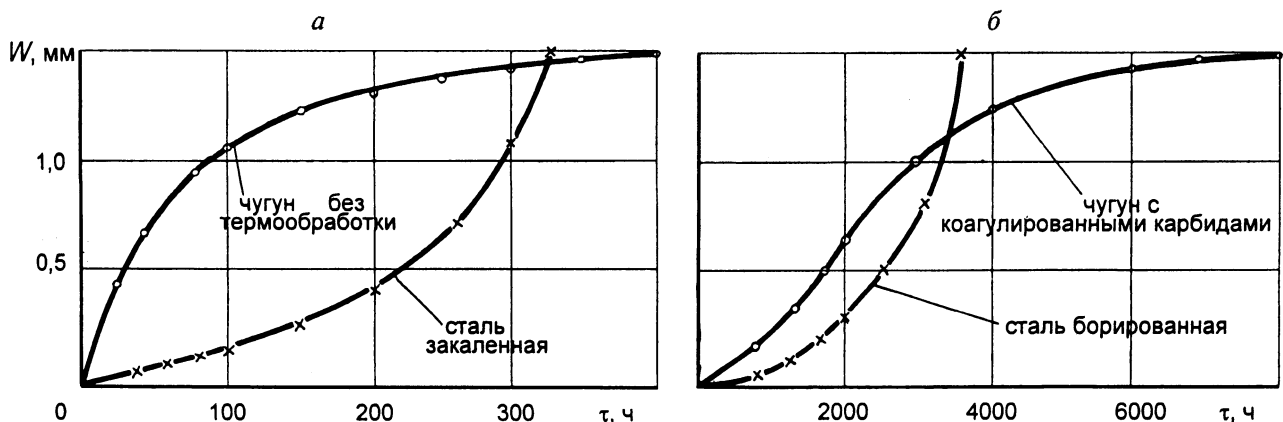


Рис. 4. Кинетика абразивного износа втулок пуансонов

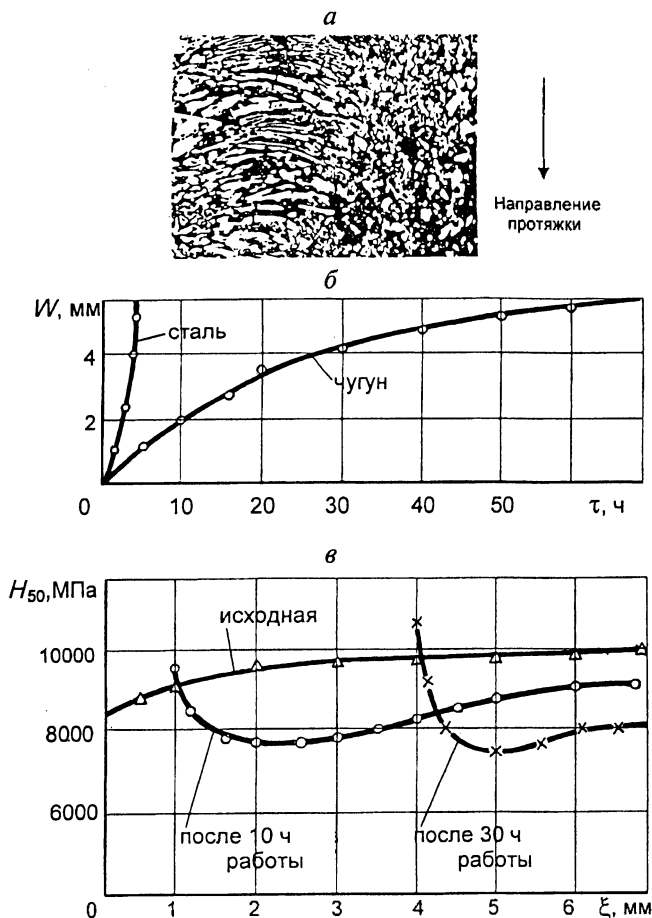


Рис. 5. Микроструктура (а), кинетика износа (б) и микротвердость (в) Ме-основы фильера из БВХЧ

деформацию чугуна, при этом трещин в зоне деформации не обнаружено. Более того, введение в сплав 0,8–1,5% Мо повышает пластические свойства чугуна, в результате зона деформации увеличивается до 1,5 мм и даже проявляется пластическая деформация карбидов. Вот какие возможности открывает метод НЦЛН.

В случае, описанном выше, мы показали как, используя особенности метода, в частности высокую интенсивность теплообмена при затверждении отливки, можно обеспечить свойства, не достигаемые другими способами получения отливок из белых чугунов. Однако основную массу используемых в промышленности отливок изготавливают из чугунов, в которых углерод присутствует не в виде карбидов, а в свободном состоянии в виде графита. И здесь главной задачей литейщика является борьба с отбелом. На первый взгляд кажется, что высокие скорости затверждения, неминуемо вызывающие отбел в отливках из чугунов с пластинчатым или шаровидным графитом, существенно ограничивают применимость метода НЦЛН. Но, несмотря на высокие скорости затверждения и даже благодаря им, близкая к солидусу температура извлекаемых из кристаллизатора отливок, позволяет успешно бороться с отбелом и в этом случае. При исследовании

структуры отливок из ЧШГ, получаемых НЦЛН, установлено, что высокая скорость затверждения способствует, при прочих равных условиях литья, повышению степени сфероидизации графита. Это значительно улучшает физико-механические свойства отливок по сравнению с другими видами литья. Так, например, относительное удлинение образцов, изготовленных из ЧШГ ферритного класса, составляет 12–15%, что сопоставимо с аналогичными показателями для сталей. Получаемые отливки отличаются также высокими показателями упругих свойств и их сохранением при повышенных температурах (до 300–400°C). Они нашли высокоэффективное применение при изготовлении поршневых и уплотнительных колец различного назначения. Наиболее эффективным оказалось их использование для уплотнительных колец турбокомпрессоров (ТК). Дело в том, что совершенствование существующих и создание новых форсированных дизельных двигателей тесно связано с использованием наддува, что позволяет увеличивать мощность при одновременном сокращении расхода топлива, улучшении условий его сгорания и уменьшении за счет экологически вредных выбросов в атмосферу. Работоспособность и долговечность ТК напрямую зависят от уплотнения ротора с корпусом и подшипником. В качестве уплотнительного элемента используется упругое разрезное кольцо. Оно должно устанавливаться беспросветно с тепловым зазором в замке 0,01–0,05 мм и за счет сил упругости оставаться неподвижным при вращении ротора со скоростями до 160 000 об/мин. Мы достигли заданных свойств колец, освоили в институте их производство и полностью обеспечиваем потребности сборочного конвейера Борисовского завода агрегатов (БЗА) и всех мотороремонтных заводов республики. С конца 1997 г. БЗА отказался от закупок колец диаметром 29,6 мм на Ставропольском моторном заводе, так как наши дешевле и имеют стабильно высокое качество. В ИТМ НАН Беларуси впервые на территории бывшего СССР освоено производство колец диаметром 13 и 18 мм для современных малогабаритных высокопроизводительных ТК. Как ни странно, но чем меньше размер кольца, тем больше проблем как с получением отливки, так и с изготовлением самого изделия. Достаточно сказать, что диаметральная сила сжатия Q кольца диаметром 13 мм регламентируется на уровне аналогичной характеристики для верхнего компрессионного кольца диаметром 79 мм двигателя ВАЗ, которое имеет в 4,5 раза большую площадь поперечного сечения и тоже изготавливается из ВЧ. Но мы решили и эту задачу. Сегодня только для потребностей БЗА производим и поставляем ежемесячно 15–18 тыс. шт. уплотнительных колец различных типоразме-

ров, в том числе по 4—5 тыс. шт. колец диаметром 13 и 18 мм.

В последние годы в мире резко упали объемы производства отливок из СЧ. Пластинчатая форма графита наряду с известными положительными моментами выполняет в структуре чугуна как бы роль надрезов, что снижает его прочностные характеристики и, как следствие, ограничивает область применения. Но качество отливок из серого чугуна и эксплуатационные характеристики изготавливаемых из них деталей во многом определяются способом получения литых заготовок. Так, маслотно-циклочные заготовки, получаемые методом НЦЛН, успешно применяются для изготовления тех же поршневых и уплотнительных колец различных типоразмеров диаметром от 38 до 250 мм. Взяв за основу кольца, которые по ТУ не хромируются, мы за счет повышения физико-механических свойств материала отливок, получаемых непрерывно-циклическим литьем без стержня, смогли наладить производство конкурентоспособных колец с ресурсом работы, сопоставимым с кольцами хромированными. Эти кольца используются на сборочном конвейере Борисовского завода агрегатов при сборке пневмокомпрессоров, применяемых для комплектации двигателей МТЗ, МАЗ, БелАЗ, МоАЗ, КраЗ, ЗиЛ и др., Гомельском заводе пусковых двигателей, всех мотороремонтных заводах Беларуси.

В то время, как в мире наметилась тенденция вытеснения серого чугуна высокопрочным, мы, наоборот, начали заменять высокопрочный чугун серым там, где прочностные свойства последнего вполне достаточны, а эксплуатационные характеристики по крайней мере не ниже при существенно меньшей стоимости. Этот подход успешно продемонстрирован на примере изготовления уплотнительных колец с крючковым замком для коробки передач тракторов Т150 и К-700. Особенность колец этого типа состоит в том, что они сначала надеваются на вал и должны быть на нем зафиксированы в сжатом состоянии, чтобы обеспечить установку вала в коробку. Для того чтобы кольца не разрушались при сборке и сохраняли заданную эпюру давлений в процессе эксплуатации, материал, из которого они изготовлены, должен иметь высокие значения модуля упругости и предела прочности на изгиб. Кольца такого типа диаметром 50, 70, 80, 125 и 175 мм со второй половины 1999 г. мы начали также поставлять Минскому тракторному заводу для комплектации гидроджимных муфт привода передних мостов энергонасыщенных пропашных тракторов "Беларус" нового поколения. По данным ГСКБ ПО "МТЗ", утечка масла через фрикцион при использовании наших колец вместо макинских (Казахстан) уменьшилась в 2,0—2,5 раза. При этом значительно снизилась трудоемкость сборки этих узлов и внутризаводской брак. Кстати, сто-

имость наших колец почти в 3 раза меньше, чем макинских.

Следует отметить, что на высокопрочный и даже на серый чугун мы успешно заменили ряд стальных втулок диаметром 55—110 мм, применяемых при сборке редукторов пусковых двигателей на Гомельском ЗПД. Это еще раз свидетельствует о высоких прочностных характеристиках заготовок, получаемых методом НЦЛН.

Проблема получения качественных заготовок для гильз цилиндров остается острой в литейном производстве и сегодня. Удовлетворение главным требованием, предъявляемым к гильзе, — высокие прочность и износостойкость — ставит действительно сложную задачу перед литейщиком, так как эти характеристики в достаточной степени противоречивы. Наличие феррита в металлической основе обеспечивает высокие демпфирующие характеристики, но такая структура очень плохо работает на износ. И наоборот, гильзы из высокоизносостойких в условиях трения—скольжения перлитных чугунов чаще выходят из строя вследствие усталостных разрушений и кавитационного износа. Мы использовали метод НЦЛН как основу для первого в республике (на базе нашего института) безотходного производства износостойких вставок из специального серого чугуна для биметаллических гильз цилиндров пневмокомпрессоров тракторов "Беларус". Сейчас поставка заготовок гильз на БЗА составляет 4—5 тыс. шт. в месяц. Брак с учетом всех технологических операций не превышает 4%, в то время как на альтернативных производствах он достигает 40—70%. В настоящее время в институте начаты работы по решению значительно более сложной задачи — создание на базе метода НЦЛН технологии получения гильз для форсированного дизельного двигателя, устанавливаемого на энергонасыщенные пропашные тракторы "Беларус", комбайны и автомобили. Скептическое отношение специалистов-производственников к заготовкам гильз двигателя Д-245, полученным методом намораживания, мгновенно рассеялось после проведения на ПО "ММЗ" стендовых испытаний экспериментальных образцов. При гидравлических испытаниях на разрыв лучшие образцы, когда-либо испытывавшиеся на заводе, выдерживали максимум 32 МПа, а серийные и того меньше — 23—28 МПа. Испытания наших гильз показали, что среднее усилие на разрыв составило 43—45 МПа, а отдельные образцы выдерживали давление до 47—48 МПа. Это соответствует прочностным свойствам чугуна марок Сч28, Сч30, в то время как материал гильз даже с более высоким содержанием Си и Ni, но полученных центробежным литьем или в песчано-глинистую форму не превышает показатели Сч24. Также для форсированных двигателей ПО "ММЗ" методом намораживания получены опыт-

ные партии заготовок седел клапанов из БВХЧ и нирезистовых вставок в поршень. Причем технологии литья обеспечивают заданную твердость и другие требуемые свойства этих высоколегированных чугунов без дополнительной термообработки. Следует подчеркнуть, что все технологические процессы ИЦЛН – ресурсо- и энергосберегающие и разработаны с учетом комплексного подхода к переработке отходов, получающихся как в процессе литья, так и при механической

обработке отливок. В настоящее время по просьбе и при активном организационном, техническом и финансовом участии ПО "ММЗ" ведем подготовку к реконструкции и переоснащению нашего экспериментального корпуса с целью организации опытно-промышленного участка по отработке технологий для серийного производства заготовок гильз цилиндров, седел клапанов, нирезистовых вставок в поршень и других деталей для форсированных дизельных двигателей ПО "ММЗ".

Внимание!

**Для государственных предприятий и частных фирм
ИНСТИТУТ ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛОВ НАН БЕЛАРУСИ
может изготовить и поставить под ключ установки для производства
высококачественных непрерывнолитых заготовок с заданными свойствами
из цветных сплавов и чугуна.
Шихтой могут служить как кондиционные материалы,
так и отходы производства**

Установка для получения непрерывных отливок из бронзы

состоит из неподогреваемого металлоприемника, кристаллизаторов, тянущей клетки, пульта управления; резка отливок до диаметра 80 мм – ручная.

Габариты установки, мм:

длина	5000
ширина	2000
высота	1500
Потребляемая мощность, кВт	5,5
Расход воды для охлаждения отливки, м ³ /ч ..	380
Масса установки, т	1,5

**Установка для получения
непрерывных отливок из меди и латуни**
состоит из подогреваемого металлоприемника, кристаллизаторов, тянущей клетки, пульта управления, резка отливок до диаметра 80 мм – ручная.

Габариты установки, мм:

длина	6000
ширина	2000
высота	1500
Мощность электродвигателей, кВт	11
Потребляемая мощность подогреваемого металлоприемника, кВт	60
(зависит от используемой индукционной печи)	
Расход воды для охлаждения отливки, м ³ /ч ..	380
Масса установки, т	4,5

Дополнительно

Для резки слитков диаметром свыше 80 мм (можно резать отливки и менее 80 мм) применяется механическая резка (длина, потребляемая мощность и масса установки увеличиваются на величину этих параметров для резки).

Габариты, мм:

длина	4400
ширина	2200
высота	2000
Привод резки	Гидравлический
Потребляемая мощность, кВт	26
Масса, т	1,9

**Установка для получения
непрерывных отливок из чугуна**
состоит из неподогреваемого металлоприемника, кристаллизаторов, тянущей клетки, пульта управления, механизма ломки заготовок.

Габариты установки, мм

длина	20300
ширина	4500
высота	3000
Потребляемая мощность, кВт	20
Расход воды для охлаждения отливки, м ³ /ч ..	380
Масса установки, т	19

Контактный телефон: (0222) 264643
Факс (0222) 326593