



*The results of investigations in the field of structure formation and characteristics of castings, produced by means of continuously-cyclic casting by directional hardening of white high-chromium, grey, high-test cast irons and examples of their practical application are given.*

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

УДК 621.74.047

## НЕПРЕРЫВНО-ЦИКЛИЧЕСКОЕ ЛИТЬЕ НАМОРАЖИВАНИЕМ – ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ЗАГОТОВОК

Метод непрерывно-циклического литья намораживанием (НЦЛН) полых цилиндрических заготовок мерной длины без применения стержня можно отнести к принципиально новым разработкам в области специальных видов литья. В его основу положен принцип направленного затвердевания, при котором наружная поверхность отливки ограничивается рабочей полостью кристаллизатора, а внутренняя получается непосредственно из расплава. Сущность данного метода литья заключается в следующем (рис. 1). 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. 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. Формирова-

ние литой заготовки происходит во время выдержки затвердевающей корки в кристаллизаторе, а сам процесс литья осуществляется в непрерывно-циклическом режиме. Это создает ряд преимуществ по сравнению с другими способами литья полых цилиндрических заготовок. В частности, формирование отливки происходит при наличии одного фронта кристаллизации, продвигающегося в направлении к осевой части отливки, и его свободном питании жидкой фазой в течение всего времени затвердевания при интенсивном радиальном теплоотводе в водоохлаждаемый кристаллизатор. Это устраняет образование усадочной и газовой пористости, попадание в тело отливок

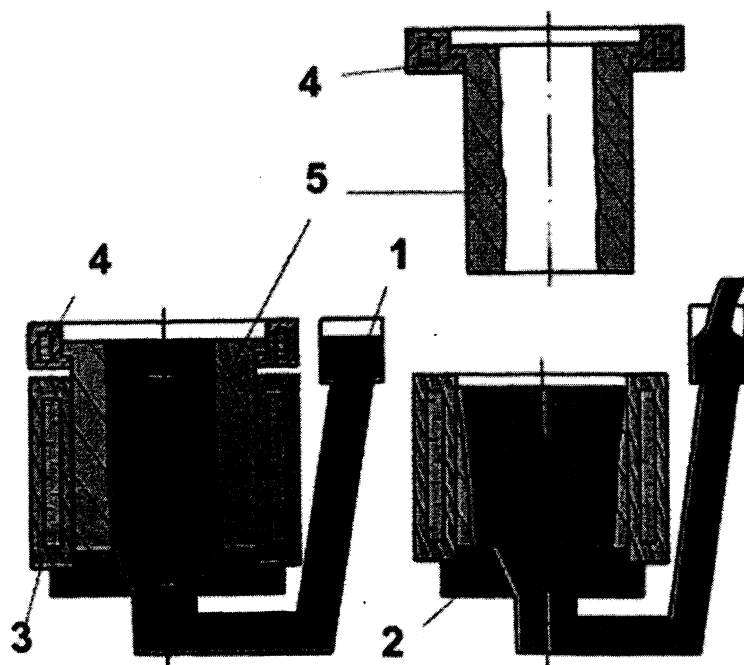


Рис. 1. Принципиальная схема непрерывно-циклического литья полых заготовок без стержня: 1 – металлопровод; 2 – соединительный стакан; 3 – стационарная часть кристаллизатора; 4 – подвижная часть кристаллизатора (захваты); 5 – отливка

неметаллических и шлаковых включений и обеспечивает получение заготовок с высокодисперсной структурой, повышенной плотностью и твердостью. Отсутствие стержня обеспечивает свободную усадку отливок как в процессе затвердевания, так и при последующем охлаждении после извлечения из формы, что предотвращает образование горячих трещин и микротрещин. Возможность извлечения отливок из кристаллизатора с достаточно высокой температурой (всего на 30–50° ниже температуры солидуса) открывает широкие возможности для управления процессом их структурообразования и получения заданных свойств без дополнительной термообработки, т.е. за счет использования теплоты, аккумулированной отливками при затвердевании. Исключаются также такие трудоемкие и экологически вредные операции, как формовка, выбивка, очистка и обрубка литья, что позволяет по-новому подойти к проблеме переработки отходов, образующихся при механической обработке литых заготовок из чугуна.

Метод НЦЛН по своей технической сути является процессом, созданным на стыке между традиционными способами литья индивидуальных заготовок и непрерывными литейными технологиями. При непрерывно-циклическом литье отливкой является мерная цилиндрическая заготовка длиной, равной высоте рабочей втулки кристаллизатора. Фактически это непрерывное литье, прерываемое на каждом первом шаге вытяжки, т.е. как бы постоянно ведущееся в режиме начала процесса непрерывной разливки. Однако известно, что для непрерывных методов литья самым сложным и проблематичным этапом является именно начало процесса. Эта особенность метода НЦЛН, присущая ему по определению, требует дополнительных специальных исследований в случае использования его в массовом производстве. В условиях же мелкосерийного производства описанная выше особенность не является существенным недостатком, поскольку в случае остановки процесса литья время на переналадку установки, технологической оснастки и подготовку к следующей разливке не превышает 40 мин. Скорее даже наоборот, возможность не только быстрого возобновления прервавшегося процесса, но и переналадки на получение заготовки другого типоразмера делает метод НЦЛН незаменимым именно в условиях мелкосерийного производства. Другая специфическая особенность метода — формирование отливки в кристаллизаторе непосредственно из расплава без применения стержня, что влечет неравномерность припуска по внутренней поверхности литой заготовки. Это опять-таки является существенным преимуществом в условиях мелкосерийного производства, поскольку отпадает необходимость изготовления стержней различных типоразмеров, а с неравномерностью припуска в данном случае можно

смириться, так как это не ведет к значительным материальным затратам при механической обработке. Несмотря на преимущества новой технологии, внедрить ее в промышленное производство по ряду организационных и технических причин не удалось. Анализ показал, что основная причина этого — принципиальная новизна метода и несовместимость его технологических особенностей с устоявшейся технологической практикой и культурой производства в действующих литейных цехах. Поэтому в последнее время была проведена работа по адаптации технологического процесса и оборудования для их высокоэффективного использования в ИТМ НАН Беларуси. На базе метода непрерывно-циклического литья намораживанием в Институте технологии металлов НАН Беларуси разработаны принципиально новые технологические процессы получения отливок диаметром 30–250 мм и длиной 100–300 мм из чугунов различных классов и марок. Наиболее уникальные результаты получены при литье белых хромистых чугунов. Долгое время считалось, а на практике порой продолжают считать и сегодня, 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. Белые высокохромистые чугуны (БВХЧ) с карбидами тригонального типа ( $M_7C_3$ ) отличаются повышенной износостойкостью в условиях ударно-абразивного износа. Проведенные исследования показали, что для преобладания в структуре заготовок, полученных методом НЦЛН, тригональных карбидов, содержание хрома в чугуне должно составлять 12–14%, что на 4–5% ниже, чем при литье другими методами. Варьируя величиной углеродного эквивалента, интенсивностью теплоотвода и другими параметрами процесса литья, 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 их главные оси расположены перпендикулярно рабочей поверхности.

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 1130–1160 °С, появляются широкие возможности в управляющем воздействии на режим термообработки. Известно, что при достаточно медленном охлаждении или выдержке в области высоких температур карбиды меняют форму своих очертаний и укрупняются,

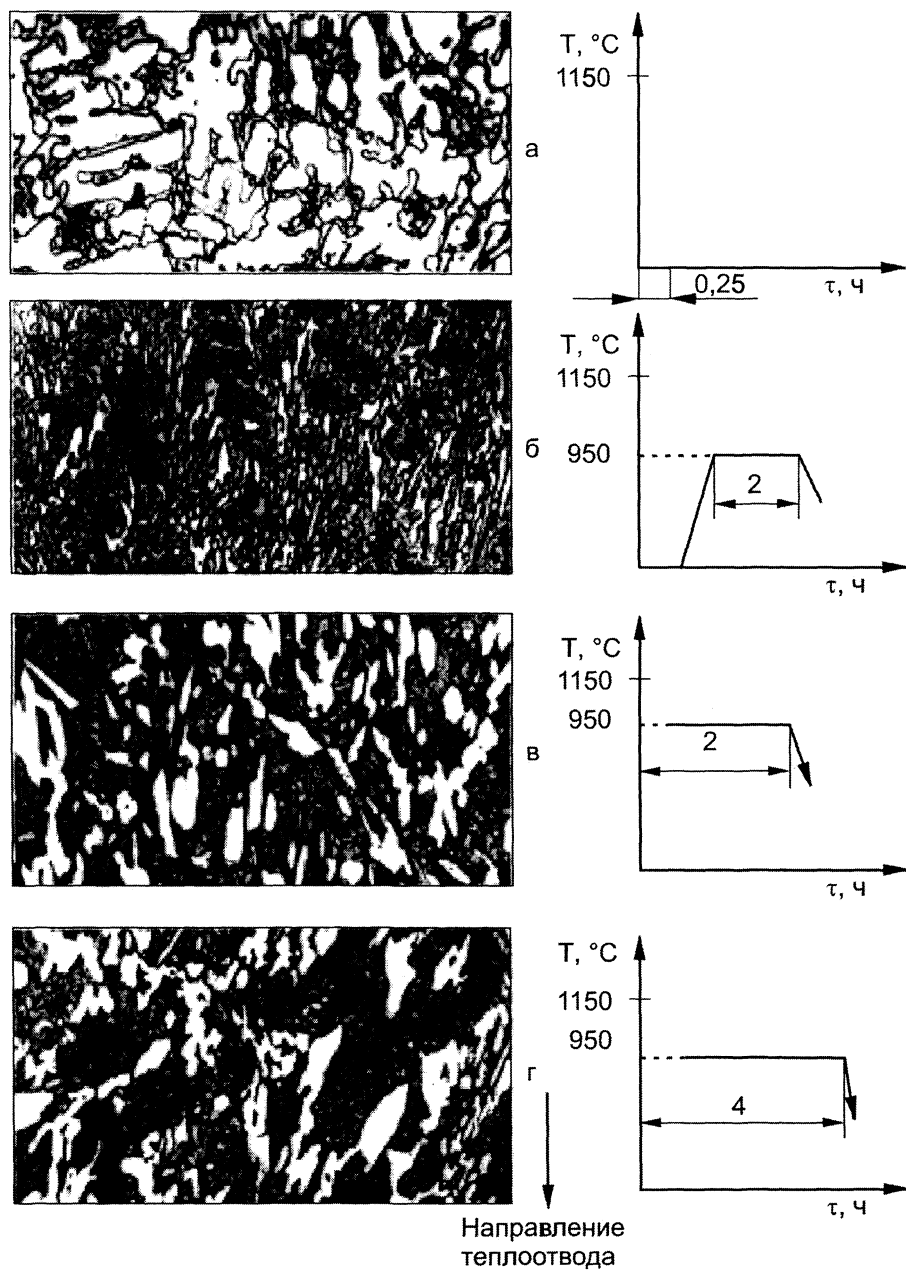


Рис. 2. Структура и режимы термообработки отливок из БВХЧ. х500

т.е. происходит их коагуляция. Было установлено, что на скорость и завершенность процесса коагуляции карбидов существенное влияние оказывает режим термообработки. Если отливки в течение 4–7 с после извлечения из кристаллизатора поместить в электрическую печь, предварительно нагретую до 950 °С, то после 2–3 ч выдержки крупные карбидные включения приобретают овальную форму и изолированное расположение в металлической матрице (рис. 2, в, г). В то же время относительно быстрое охлаждение отливок до температуры ниже фазовых превращений значительно тормозит процесс коагуляции. При последующем нагреве и выдержке литых заготовок при температуре 950–1000 °С в течение 2–3 ч коагуляция карбидов и растворение их мелких включений практически не наблюдаются (рис. 2,

б). Таким образом, предварительное охлаждение ниже критической температуры  $A_1$ , способствующее значительному ускорению первой стадии графитизации обычных белых чугунов, тормозит процесс коагуляции тригональных карбидов. 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 сливной стружки, подобно получаемой при обработке сталей. После механообработки заготовки подвергали закалке с температуры 950–1050 °С. Максимальная твердость (65–66 HRC) достигнута при закалке в масле с температуры 1050 °С. При этом трещин и микротрещин в теле отливок не обнаружено. Ударная вязкость закаленных образцов составляет 50–70 кДж/м<sup>2</sup>. В результате растворения мелких эвтектических карбидов и образования вторичных точечных металлическая основа

упрочняется и ее микротвердость после закалки достигает  $H_{50}$  8500–9000 МПа, что выше твердости цемента. Рентгеноструктурный анализ закаленных образцов показал, что она представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе, при этом характерного для мартенситных структур игольчатого строения металлической основы в непрерывнолитых заготовках не обнаружено.

Практическое воплощение указанные выше результаты нашли при изготовлении износостойких вставок для пуансонов, применяемых при производстве пустотного силикатного кирпича, работающих в чрезвычайно жестких условиях ударно-абразивного изнашивания: усилие прессования составляет 120 т. Ранее для этих целей применяли термообработанные (закаленные) втул-

ки из сталей различных классов, в том числе цементированные и борированные, а также литые в кокиль из хромомолибденового чугуна. Главным недостатком пуансонов из сталей является низкий ресурс работы (1,5–2,0 недели при трехсменном режиме работы оборудования), а из высоколегированного чугуна – хрупкие разрушения. Была разработана технология литья и термообработки, обеспечивающая работу втулок пуансонов в течение 10–12 мес. Однако на такую длительную эксплуатацию оказались не рассчитаны другие узлы оборудования по производству кирпича, и для серийного производства был освоен чугун с ресурсом работы 3–4 мес. Интересным моментом является также то, что введение в сплав 0,8–1,5% Мо повышает пластические свойства белого чугуна, в результате зона деформации увеличивается и даже проявляется пластическая деформация карбидов, при этом трещин в зоне деформации обнаружено не было. Производство втулок пуансонов, которые поставляются Могилевскому, Любаньскому и другим комбинатам силикатных изделий республики, организовано на экспериментальной базе института. Хрупких разрушений наших втулок не установлено.

В случае, описанном выше, мы показали как, используя особенности метода, в частности высокую интенсивность направленного теплоотвода при затвердевании 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 основной задачей литейщика является борьба с отбелом. На первый взгляд кажется, что высокие скорости затвердевания, неминуемо вызывающие отбел в отливках из чугунов с пластинчатым и шаровидным графитом, существенно ограничивают применимость метода НЦЛН. Но, несмотря на высокие скорости затвердевания и даже благодаря им, особенности метода литья позволяют успешно бороться с отбелом и в этом случае. При исследовании структуры отливок из ВЧШГ, получаемых НЦЛН, установлено, что высокая скорость затвердевания способствует, при прочих равных условиях литья, повышению степени сфероидизации графита (рис. 3, а, б). Это значительно улучшает физико-механические свойства отливок. Так, например, относительное удлинение образцов, изготовленных из ВЧШГ ферритного класса (рис. 3, б), 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 °С). Они нашли широкое 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 этот 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, по типу поршневого, 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 совместно с НПП «Технолит» (г. Могилев), освоили их производство (рис. 4, 5) и полностью обеспечиваем потребности сборочного конвейера Борисовского завода агрегатов (БЗА) и всех мотороремонтных заводов республики. БЗА полностью отказался от закупок колец диаметром 29,6 мм на Ставропольском ЗПК и колец диаметром 23 мм на Ярославском моторном заводе, так как наши дешевле и имеют стабильно высокое качество. При этом мы первыми на территории бывшего СССР освоили производство колец диаметрами 13 и 18 мм для современных малогабаритных высокопроизводительных ТК. Как ни странно, на первый взгляд может показаться, но чем меньше размер кольца, тем больше проблем, как с получением отливки, так и с изготовлением самого изделия. Достаточно сказать, что диаметральной сила сжатия кольца диаметром 13 мм регламентируется на уровне аналогичной характеристики для верхнего компрессионного кольца диаметром 85 мм двигателя «Мерседес Бенц», которое имеет в 4,5 раза большую площадь поперечного сечения и тоже изготавливается из ВЧШГ. Но мы решили и эту задачу. Сегодня только для потребностей БЗА производим и поставляем ежемесячно около 15 тыс. уплотнительных колец различных типоразмеров, в том числе по 5–6 тыс. колец диаметрами 13 и 18 мм. С 2001 г. наши кольца используют Дергачевский завод турбокомпрессоров в Украине и целый ряд российских предприятий.

Совместно с НПП «Технолит» мы также наладили производство нажимных колец из ВЧШГ вместо применявшихся ранее из стали 40Х для торцовых уплотнений ведущего вала КПП трактора К-700. Они имеют перлитную матрицу с 10–15% феррита в виде оторочки вокруг включений шаровидного графита (см. рис. 3, в, г). Прочностные и эксплуатационные испытания показали, что нагрузочная способность таких колец существенно

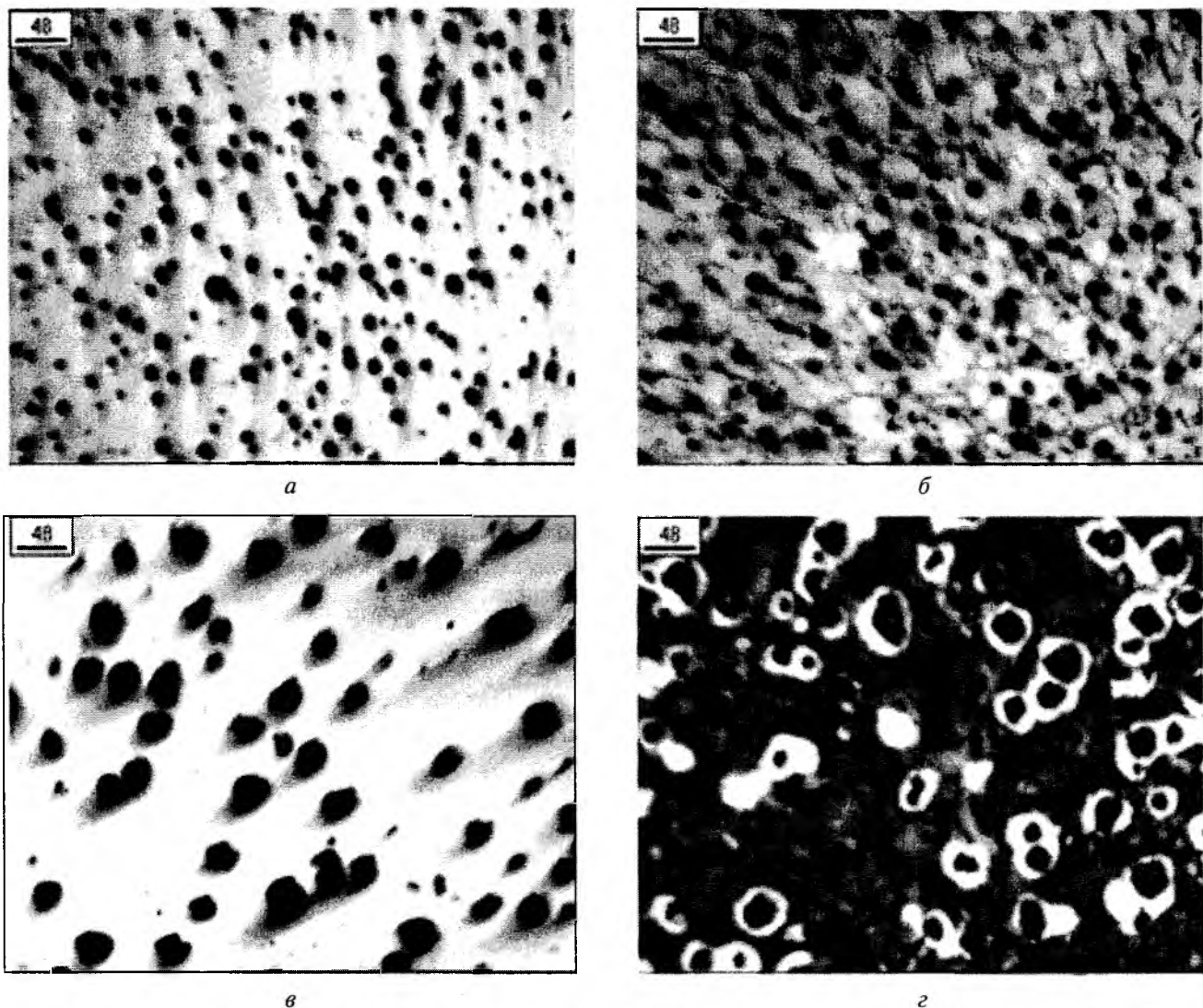


Рис. 3. Структура заготовок из чугуна с шаровидным графитом: а, б — заготовки диаметром 13—32 мм; в, г — заготовки диаметром 100—150 мм. х100

не отличается от серийных, а их износостойкость в паре с уплотнительным кольцом из серого чугуна, также изготавливаемом из отливки, полученной методом НЦЛН, в 1,4-1,7 раза выше.

В последние годы в мире резко упали объемы производства отливок из СЧ, поскольку пластинчатая форма графита наряду с известными положительными моментами выполняет в структуре чугуна роль надрезов, что снижает его прочностные характеристики и, как следствие, ограничивает область применения. Но качество отливок из серого чугуна и эксплуатационные характери-

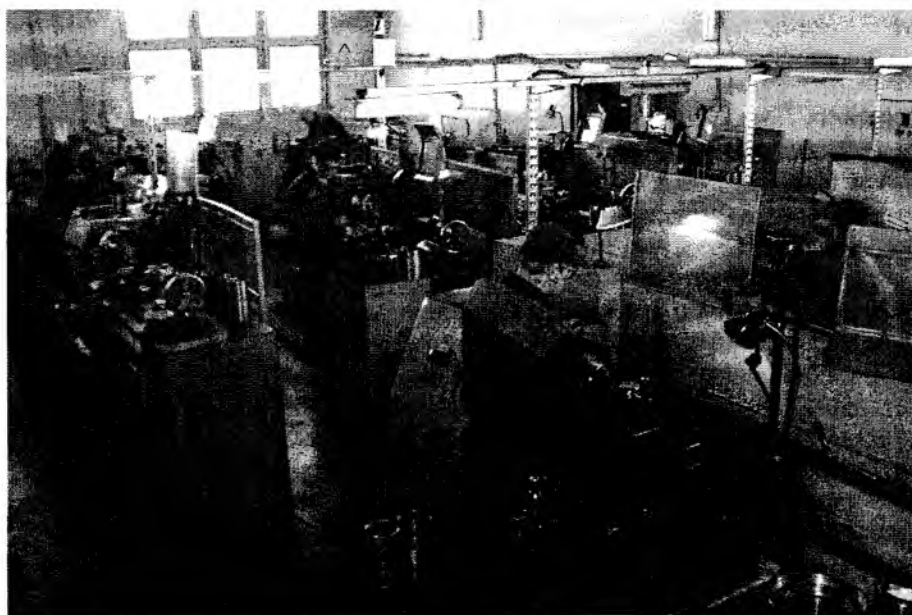


Рис. 4. Участок изготовления колец





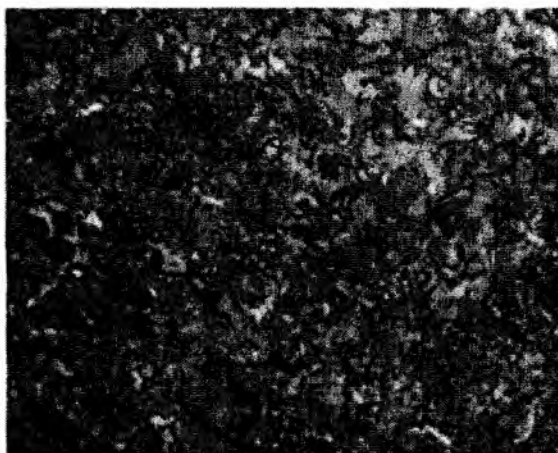
Рис. 5. Литые заготовки и готовая продукция

стики изготавливаемых из них деталей во многом определяются способом получения литых заготовок. Так, 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. Твердость колец из СЧ составляет 98—102 HRB, а из ВЧШГ - 102-106 HRB. Разность значений твердости в пределах одного кольца не превышает 2—3 ед. HRB. Металлическая основа чугуна состоит из высокодисперсного перлита с небольшим количеством феррита в виде изолированных мелких включений (рис. 6, а). Эти кольца используются на сборочном конвейере Борисовского завода агрегатов при сборке пневмокомпрессоров, применяемых для комплектации двигателей МТЗ, МАЗа, БелАЗа, МоАЗа, КрАЗа, ЗиЛа 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 коробок передач тракторов Т150 и К-700. Кольца такого типа из СЧ диаметрами 50, 70, 80, 125 и 175 мм, изготовленные из заготовок, полученных литьем намораживанием, НПП «Технолит» уже более пяти лет эксклюзивно поставляет Минскому тракторному заводу для комплектации гидроджимных муфт привода передних мостов

энергонасыщенных пропашных тракторов «Беларус» нового поколения. По данным ГСКБ МТЗ, установка на муфты гидропривода переднего ведущего моста тракторов «Беларус-1025», «Беларус-1221», «Беларус-1522» этих уплотнительных колец вместо колец из ВЧШГ, получаемых ранее из Украины и Казахстана, позволила снизить утечку масла через фрикцион с 2,0-2,5 до 0,4-0,7 л/мин, устранить внутрицеховой брак и полностью исключить рекламации по муфте привода ПВМ. На указанные кольца получены технические условия, зарегистрированные в Госстандарте Республики Беларусь (ТУ РБ 100316761.456-2000).

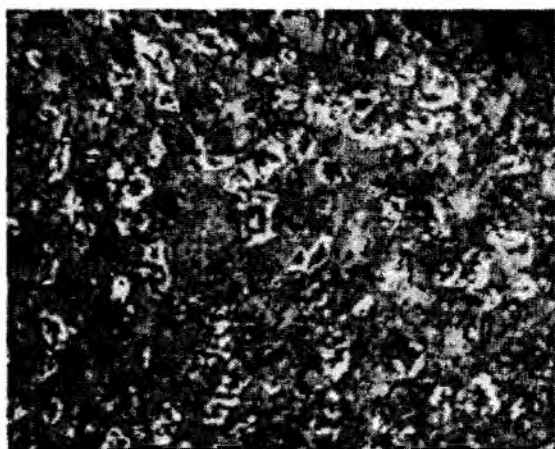
Отметим еще одно интересное направление применения отливок, получаемых с помощью созданного в институте метода литья. Это гильзы цилиндров. Литую заготовку гильзы цилиндра две с полным правом можно считать «королевой» отливок, так как при недопустимости каких-либо литейных дефектов (раковин, засоров, газовой и усадочной пористости и т.п.) требуется обеспечить высокие прочностные и трибологические свойства. Известные мировые производители две («Мерседес», «Рено», «Ивеко», «Манн» и др.) для массового получения заготовок гильз используют высокопроизводительный метод центробежного литья. Для этого метода разработано и создано эффективное литейное оборудование и соответствующие технологии. Однако проблема получения качественных заготовок для гильз остается острой в литейном производстве и сегодня. Удовлетворение главным требованиям, 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. Метод НЦЛН позволяет объединить эти противоречивые свойства в одном изделии и получить феррито-перлитную матрицу с компактными включениями графита в наружном слое гильз, обеспечивая высокую стойкость против кавитации рубашки охлаждения (рис. 6, в, г) и чисто перлитную металлическую основу с равномерно распределен-



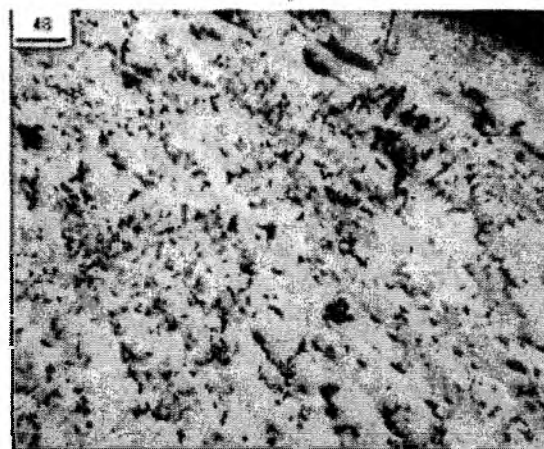
*a*



*б*



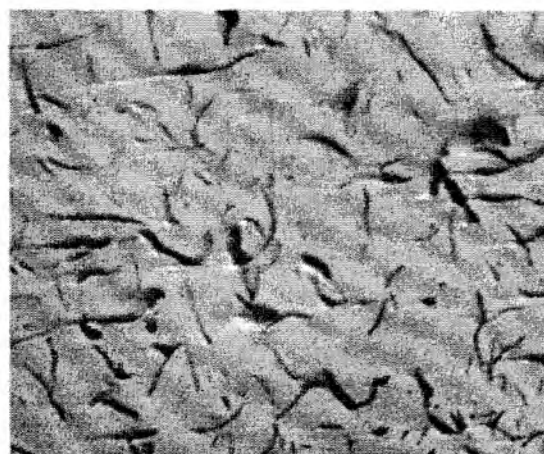
*в*



*г*



*д*



*е*

Рис. 6. Структура изделий из серого чугуна; а, б — на рабочей поверхности поршневого кольца; в, г — на наружной поверхности гильзы цилиндров; д, е — на рабочей поверхности гильзы цилиндров. х100

ным пластинчатым графитом оптимальной длины на их рабочей поверхности (рис. 6, д, е). Мы использовали метод НЦЛН как основу для первого в республике (на базе нашего института) безотходного производства износостойких вставок из серого специального чугуна для биметаллических гильз цилиндров пневмокомпрессоров тракторов «Беларус». Сейчас поставка заготовок гильз на Борисовский завод агрегатов составляет 2,0—

2,5 тыс. шт. в месяц. Брак с учетом всех технологических операций не превышает 4%, в то время как на альтернативных производствах он достигает 40—70% при существенно более низких эксплуатационных характеристиках гильз. В настоящее время в институте ведутся работы по решению значительно более сложной задачи - созданию на базе метода НЦЛН технологии получения гильз для форсированного дизельного двигателя, уста-

навливаемого на энергонасыщенные пропашные тракторы «Беларус», комбайны и автомобили (рис. 7). Поставка Минскому моторному заводу заготовок гильз позволит провести их полномасштабные стендовые и эксплуатационные испытания и, кроме того, существенно ускорить разработку и изготовление новых образцов двигателей. Скептическое отношение специалистов-производственников к заготовкам гильз двигателя Д-260, полученным методом намораживания, сразу рассеялось после проведения на Минском моторном заводе 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 40—42 МПа, а отдельные образцы выдерживали давление до 43—45 МПа. Так же для форсированных двигателей ММЗ методом намораживания получены опытные 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 НЦЛН — ресурсо- и энергосберегающие, разработаны с учетом комплексного подхода к переработке отходов, получающихся как в процессе литья, так и при механической обработке отливок. Исходя из опыта нашего института, технология литья намораживанием позволяет получать высококачественные заготовки гильз цилиндров с физико-механическими свойствами на уровне мировых стандартов из шихтовых материалов на основе чугуна при 100%-ном использовании собственных возвратных отходов, причем без их специальной

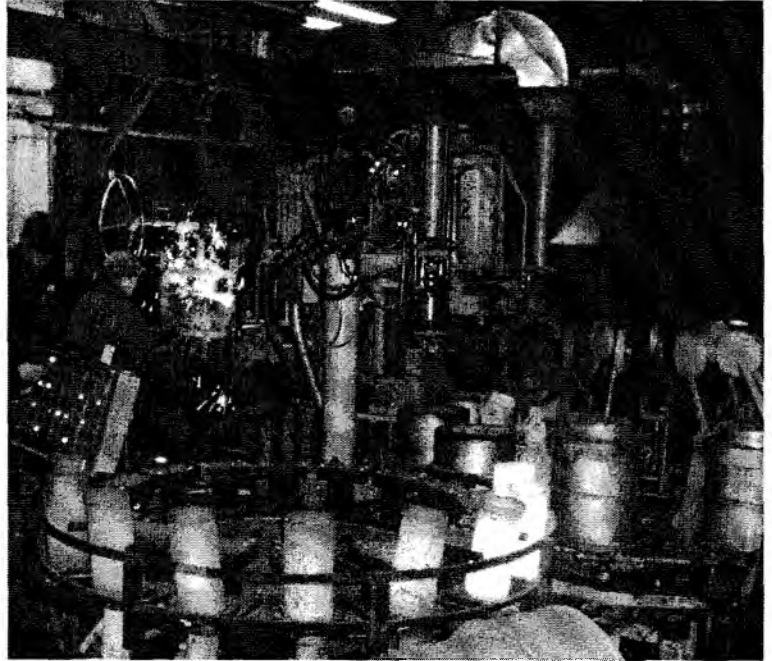


Рис. 7. Линия литья намораживанием заготовок гильз цилиндров двигателя Д-260

подготовки, в результате в 1,5-2,0 раза снижается потребность в первичных шихтовых материалах, в 3-5 раз уменьшается расход дефицитных легирующих элементов — меди и никеля. В настоящее время при активном организационном и техническом участии ММЗ ведем подготовку к реконструкции и переоснащению нашего экспериментального корпуса с целью организации опытно-промышленного участка по отработке технологий производства заготовок гильз цилиндров двигателя Д-260, седел клапанов и других деталей для форсированных дизельных двигателей ММЗ. Для изготовления малых серий высококачественных заготовок для гильз цилиндров, поршневых и уплотнительных колец и ряда других деталей типа втулок именно эта технология является наиболее эффективной из всех известных нам методов получения отливок подобного типа.