

В. С. Дорошенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
e-mail: doro55v@gmail.com

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ ЗАЩИТНЫХ И ИЗНОСОСТОЙКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ИЗОТЕРМИЧЕСКИ ЗАКАЛЕННОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

Обзор технологии литья защитных и износостойких конструкций при проектировании их производства из изотермически закаленного чугуна служит обоснованием применения новых технических решений и материалов, которые обладают механизмом упрочнения и адаптации материала ко внешним деформационным воздействиям. Новые конструкции ячеистых отливок разработаны с упрощенным процессом сборки разовых литейных моделей. Технология литья в сочетании с термообработкой построена на использовании литья по газифицируемым моделям.

Ключевые слова: литье, броневая преграда, ячеистая отливка, высокопрочный чугун, бейнитный чугун, аустенит, аусферритный чугун, литье по газифицируемым моделям.

Ресурсоэффективность процессов литейно-металлургического производства нередко достигается путем совмещения технологий, примерами чего служит непрерывное литье с прокаткой [1] либо деформации с термообработкой [2]. В статье рассмотрена концепция совмещения фасонного литья из высокопрочного чугуна (ВЧ) с термообработкой отливок. Для этого использовали способ литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) в вакуумируемой песчаной форме и реализовали следующие преимущества формовочного песка без связующего, присущие этой технологии. Разупрочнение песка формы до сыпучего состояния при отключении вакуума дает возможность быстрой выбивки горячей отливки из песчаной формы одним из двух путей: либо извлечением отливки краном из формы, либо при высыпании песка из формы. Удаленную из формы горячую отливку в аустенитном состоянии быстро (в течение 5–15 с) подают на изотермическую закалку для получения ВЧ с бейнитной структурой, в частности, согласно способу [3]. В этом направлении под руководством проф. Шинского О. И. проводятся исследования по теме «Научные и технологические основы создания высокопроизводительных литейных процессов получения литых конструкций из железоуглеродистых и цветных сплавов».

В настоящее время достигнуты заметные успехи в области совершенствования способов литья ВЧ, а также термообработки отливок с получением в них бейнитной структуры ВЧ со значительно более высокими показателями механических свойств, чем в литом состоянии, применение которых даст существенные преимущества для корпусного литья. Среди последних отечественных исследований по этой теме отметим работы Найдека В. Л., Гаврилюка В. П., Неижко И. Г. [4], Узлова К. И., Малинова Л. С., Волощенко С. М. [5], Бубликова В. Б. [6] и др.

Образование в металлоизделиях многофазной структуры, в которой присутствует метастабильный остаточный аустенит, испытывающий при нагрузке динамическое деформационное мартенситное превращение, описано в ряде публикаций Малинова Л. С. как механизм упрочнения и адаптации материала ко внешним воздействиям [7–9]. Такое присутствие в железоуглеродистых изделиях метастабильного аустенита с его превращением в мартенсит деформации при абразивном воздействии приводит к существенному повышению износостойкости, по сравнению с ее величиной после ранее выполняемой типичной термообработки,

несмотря на снижение твердости [8]. Эти исследования раскрывают внутренний ресурс сталей и чугунов, суть которого заключается в получении многофазных структур, основной составляющей которых является метастабильный аустенит, играющий важную роль в повышении свойств сталей и чугунов, подверженных изотермической закалке. При этом наряду с бейнитом повышение свойств обеспечивает метастабильный аустенит с его способностью к превращению в мартенсит деформации при испытаниях или эксплуатации [9]. Аналогичные работы выполнены Волощенко С. М. [5] для чугуновых сплавов, названных им сплавами нового поколения. Их получение связано с использованием специальных термических обработок по методу так называемого аустемперинга, которые позволяют получать в чугунах бейнитные структуры и использовать их преимущества при эксплуатации изделий.

Для рассматриваемого эффекта превращения остаточного аустенита в мартенсит деформации в сталях с повышением прочности и пластичности сплава, в том числе согласно работ [7–9, 10, 11], используют аббревиатуру «ТРИП». Аббревиатура TRIP (transformation induced plasticity, или «ПНП») означает пластичность, наведенная превращением, в частности, мартенситным. Однако в упомянутых работах недостаточно описаны операции и характеристики процессов, чтобы их напрямую включить в проектируемую технологию крупносерийного производства корпусных отливок из ВЧ с улучшенными показателями за счет трип-эффекта. Процессу получения изделий из ВЧ с такими свойствами присущ ряд отличий и сложностей по сравнению с литьем ВЧ по традиционным технологиям, и для получения повышенных показателей этой продукции требуется уточнение ряда факторов, влияющих на процесс структурообразования металла [5].

Проведенный обзор показал, что наиболее перспективным вариантом технологии литья, в частности, защитных и износостойких конструкций является ЛГМ-процесс изготовления отливок из бейнитного или аусферитного ВЧ (аусферит – это разновидность бейнита [3, 4, 6], также носит название «безкарбидный бейнит»). Такой способ литейного производства, совмещенный с термообработкой, включает затвердевание расплава ВЧ в песчаной форме из сыпучего песка, предварительное охлаждение отливки (закалку отливки путем быстрого охлаждения), исключаящее перлитное превращение, до температуры начала образования бейнитных структур и выдержку в интервале бейнитного превращения в сыпучем песке.

Таким образом, способ [3] представляет собой комбинацию литья с аустемперингом [5], который дополняет литейный процесс, являясь изотермической закалкой из аустенитного состояния отливок из ВЧ. Изотермическая закалка встраивается в процесс литья на стадии охлаждения отливок в форме из сыпучего песка, которое традиционно занимает наиболее длительное время на формовочно-заливочных участках и конвейерных линиях, нередко составляя порядка 80 % в цикле операций формовка – заливка – охлаждение отливок. Такая модернизация охлаждения путем перехода на «ступенчатое» охлаждение по режиму аустемперинга реализует внутренний ресурс форм из сыпучего песка, который позволяет быстрое удаление отливки (в аустенитном состоянии) из формы, быстрое охлаждение отливки в контейнере (закалка до температуры бейнитного превращения с использованием воды или псевдоожиженного песка) и изотермическую выдержку в интервале бейнитного превращения, опять же, в нагретом песке формы до заданной температуры. Кстати, водяное и водовоздушное охлаждение металлоизделий хорошо отработано и давно применяется в непрерывных способах их литья-прокатки [1, 12]

В нашем случае, регулируемую текучесть сухого песка удалось использовать как в литейных процессах (для формовки и преждевременной выбивки отливки в отличие от традиционной операции охлаждения в форме), так и в процессе термообработки в качестве технологического нагретого материала для поддержки изотермы бейнитного превращения металла отливки. Это позволяет изготавливать отливки из бейнитного ВЧ процессом литья-термообработки, что, в целом, во многих случаях (особенно для отливок с толщиной стенок до 20–25 мм) сокращает продолжительность литейного процесса.

При этом отпадает необходимость традиционной энергозатратной термо-обработки в термических цехах при передаче охлажденных отливок из литейных цехов, нагревания и выдержке отливок продолжительностью порядка 0,5–1 часа и более для аустенизации металла [4, 5]. Примечательно, что при изотермической закалке извлеченной из формы горячей отливки температура отливки при этом падает сверху вниз, не как в традиционных процессах нагревания и выдержки для аустенизации с достижением равномерного нагрева и насыщения углеродом аустенита в традиционной термообработке [4, 5], а как в процессах [1, 12] или следующей за деформацией в нагретом состоянии термообработке [2]. То есть, во втором процессе используется остаточное тепло отливки, неизбежно полученное в первом процессе из двух совмещенных.

Однако, обработка комбинированного литейно-термического процесса получения бейнитного ВЧ с литого аустенитного состояния для оболочковой отливки конкретного вида требует экспериментального уточнения режимов так называемого «технологического окна» для достижения оптимальных условий противодействия последующему разрушению при эксплуатации с проявлением внутреннего ресурса сплава благодаря оптимизации режимов получения заданной структуры металла.

Положительную роль трип-эффекта можно схематически проиллюстрировать на примере испытания стандартного металлического образца во время растяжения и определения относительного удлинения трип-сталей или ВЧ с остаточным аустенитом, способным при деформации к мартенситному превращению. При испытании образца во время растяжения в нем наблюдается сужение – зарождение шейки, где локализуется пластическая деформация, и в ней образуется мартенсит деформации (рис. 1, а). Он сразу упрочняет материал в области шейки, и развитие этой шейки прекращается, но она зарождается в другом месте образца, и все повторяется: образуется мартенсит деформации, упрочняется материал шейки, и она не развивается. В трип-сталях равномерная деформация – результат торможения развития шейки за счет фазового превращения с выделением в материале шейки высокопрочной фазы – мартенсита. То же происходит в вершине трещины – образуется мартенсит деформации (преимущественно пластинчатого или игольчатого вида [11]), упрочняется объем материала перед вершиной трещины, и происходит релаксация напряжений, останавливающая движение трещины в этом объеме. Схема зарождения микротрещин в трещине при замедленном разрушении метастабильных аустенитных сталей с образованием мартенситной зоны показана на рис. 1, б из монографии [13].

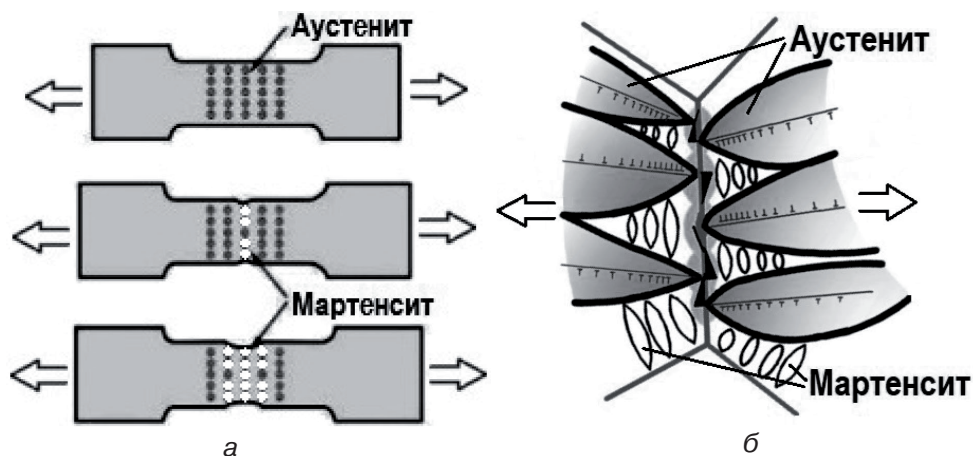


Рис. 1. Схема трип-эффекта при растяжении стандартного образца с образованием мартенсита деформации: а – при растяжении образца; б – при зарождении и последующем слиянии микротрещин на границе исходных аустенитных зерен в местах выхода кристаллов мартенсита (показаны белым цветом) [13]

В широко известных трип-сталях изменение содержания остаточного аустенита от 10 до 8 % ведет к практически трехкратному упрочнению в диапазоне деформации 0–10 % [5]. При мартенситном превращении, происходящим по сдвиговому механизму со скоростью, приближающейся к скорости звука, в процессе нагружения происходит изменение механического «поведения» вещества, возникают необычные механические эффекты – сверхупругость, пластичность, обусловленная фазовыми превращениями, трип-эффект. В частности, становится возможным одновременное повышение прочностных и пластичностных характеристик материала [11]. По этой причине необходимым условием трип-эффекта является оптимальная устойчивость аустенита и интенсивность его превращения при деформации, методика и практика достижения которых показаны в работе [5] при установлении предельных условий появления трип-эффекта в бейнитном ВЧ в зависимости от силовых нагрузок и температуры закалки.

При изотермической закалке с выдержкой образцов бейнитного ВЧ при 350 °С в течение 1, 2 и 3 часов обнаружено в структуре отливок, соответственно, 35, 31 и 27 % остаточного аустенита, а пластическая деформация приводила к распаду примерно пятой части от начального количества остаточного аустенита с формированием мартенсита [5]. Такие условия возникновения трип-эффекта в экспериментах Волощенко С. М. установлены как оптимальные с точки зрения устойчивости остаточного аустенита и интенсивности его превращения при деформации. При этом аналогично известному эффекту в трип-сталях, фазовое превращение при пластической деформации бейнитного чугуна способствует резкому увеличению скорости упрочнения при сжатии, что улучшает служебные характеристики отливки. Характерно, что графики количества (%) остаточного аустенита в зависимости от времени и температуры выдержки [4, 14] наибольшее содержание остаточного аустенита показывают как раз для аусферритной структуры с относительным удлинением δ до 12 %.

Сравнительные исследования процессов разрушения оболочек, отлитых из стали 110Г13Л со значительным содержанием в структуре аустенитной составляющей и высокоуглеродистой стали С-60, показали, что наиболее оптимальные фрагменты импульсного разрушения массой 1–2 г и выше для аустенитосодержащего сплава составляют 59,3–50,3 %, а для сплава без аустенита – 47,8–39,3 % [15]. Также мы можем ожидать аналогичные результаты при сравнении изделий из изотермически закаленного ВЧ и из ВЧ в отливках без термообработки. Мелкие фрагменты и пыль при испытательном разрушении практически не несут желаемого уровня эксплуатации, а их снижение и желаемое увеличение скорости разлета фрагментов обеспечивается за счет таких свойств аустенитосодержащих сплавов, как высокая вязкость и способность к упрочнению при пластической деформации [15].

Для проектирования изготовления корпусных отливок по способу [3] ориентировались на химический состав ВЧ, режимы его изотермической закалки на бейнитную структуру металла с заданным количеством остаточного аустенита из научно-технологической работы [5]. Проектируемые свойства образцов бейнитного чугуна при удалении отливок из сухого песка формы при температуре 880–920 °С, последующей изотермической закалки и охлаждения на воздухе до комнатной температуры составляли $\sigma_{\text{в}} = 1100\text{--}1150$ МПа и $\delta = 8,5\text{--}9,0$ %.

Таким образом, указанные перспективные способы изготовления литых корпусных заготовок, обзор аналогичных технических решений и уже отработанных процессов послужили основанием для проектирования и отработки выпуска такой металлопродукции с повышенными служебными характеристиками путем применения комбинированного процесса литья-термообработки при ориентации, в первую очередь, на последние основательные научно-технологические исследования [4, 5, 11].

Улучшенные свойства защитных конструкций с использованием в структуре металла метастабильного остаточного аустенита для повышения их износостойкости и сопротивления пулепробиванию отмечены в работе [8]. Это, в частности, касается броневых конструкций, а именно, броневых преград (БП), препятствий

или защитных панелей для защиты закрытых объемов, например, на транспортных средствах или в домах, банках, убежищах и т. п., для обеспечения пулестойкости, огнестойкости и устойчивости к взлому таких объектов. Также БП может применяться как противоккумулятивный экран для повышения защищенности танков или бронемашин от кумулятивных боеприпасов при установлении таких препятствий на некотором расстоянии от основной брони.

Известно изготовление БП, содержащих в своем составе решетчатые конструкции [16, 17]. Недостатком этих БП является большая масса и сложность их изготовления из различных материалов, включая анизотропные вещества, металлические комплекующие, валы, которые должны крепиться неподвижно или вращаться, пройдя сложную механообработку для изготовления фасонного профиля. Применение новейших марок железоуглеродистых сплавов, способных изменять свои свойства (увеличивать прочность и пластичность) под влиянием внешних факторов, реализуя внутренний ресурс упрочнения материала, в сумме с последними технологиями в области литых легковесных конструкций, которые могут плавно охватывать объемы, предназначенные для защиты, в этих конструкциях таких БП не предусмотрено.

Для изготовления рассматриваемых ограждающих конструкций имеются аналогичные производству корпусов импульсного разрушения основания использования многофазной структуры с метастабильным остаточным аустенитом, который испытывает при нагрузке динамическое деформационное мартенситное превращение, как механизм упрочнения и адаптации материала к внешним воздействиям. Тонкостенные решетчатые препятствия, как и корпуса импульсного разрушения, наиболее выгодно изготавливать литьем из ВЧ, и достигать их высокой эффективности изготовлением отливок из бейнитного ВЧ с показателями прочности, соразмерными таким показателям для легированной стали. Отливки из чугуна примерно на 10 % легче стальных, жидкотекучесть ВЧ значительно выше стали при литье в формы из кварцевого песка, что позволяет существенно улучшить заполняемость металлом литейной формы и отливать сложнофасонные изделия, которые для стального литья могут считаться нетехнологичными.

Обзор патентной литературы в области литья легковесных решетчатых конструкций показал ряд преимуществ ЛГМ-процесса с литейными формами из сыпучего песка, в частности, по пенопластовым моделям. Так, модель [18] обладает теми особенностями и преимуществами, что ее поверхность полностью или частично состоит из минимальных поверхностей (МП) или периодических МП и, в частности, имеет поверхность гироида, как одной из периодических МП.

Теория МП – одна из классических и в то же время развивающихся областей математики (на стыке геометрии, топологии и вариационного исчисления). Простейшей наглядной реализацией МП служит мыльная пленка, она затягивает контуры различной конфигурации и принимает форму, соответствующую минимуму потенциальной энергии (энергии поверхностного натяжения), которая прямо пропорциональна ее площади.

Особенность разовой литейной модели с поверхностью гироида заключается в том, что для изготовления этой модели достаточно серийно изготавливать одну деталь (шестиугольную пластинку фигурной или неплоской формы), и присоединением таких одинаковых пластинок между собой можно собирать (монтировать) такую пенопластовую модель с поверхностью гироида практически неограниченных размеров. То есть, модель при изготовлении можно наращивать присоединением каждый раз одной элементарной повторяющейся детали практически бесконечно в трех измерениях. Фактически размеры ее ограничиваются размером песчаной формы, в которой формуют такую пенопластовую модель.

Мало того, эта пластинка в виде правильного шестиугольника фигурной или неплоской формы (которую называют фундаментальным элементом) также может быть изготовлена составлением ее из двух, трех или шести частей, как повторяющихся – одинаковых элементов [18]. Иными словами, в крайнем случае, на автомате для

производства пенопластовых моделей можно изготавливать большое количество одинаковых элементов модели в виде 1/6 пенопластового шестиугольника (тогда уже 1/6 часть шестиугольника становится фундаментальным элементом) и многократным присоединением таких одинаковых элементов наращивать и собирать всю конструкцию литейной модели. В этом заключается технологическая уникальность пенопластовых моделей, изготовленных с поверхностью периодической МП, а именно, возможность их сборки (периодическое повторение) из копий одного или нескольких фундаментальных элементов, а эти фундаментальные элементы могут быть собраны из повторяющихся частей. Причем, все МП аналитические и могут быть заданы уравнением типа $z = f(x, y)$, а для построения различных классов МП литейных моделей разработаны и имеются в открытом доступе для применения компьютерные программы, например, свободно распространяемая программа Surface Evolver [18–20].

Однако, учитывая относительную новизну конструкции такой модели [18], она еще не нашла своего применения для производства БП. Только лишь известны примеры использования гироидной конструкции прежде всего для декоративных целей (бижутерия, скульптура, спортивные строения на детских площадках). Очевидно, что сочетание новых сплавов, упрочняющихся в момент деформирования, с новыми способами литья ВЧ, как второго (после серого чугуна) по объему литья в мире сплава, даст технико-экономические преимущества при изготовлении и применении БП по модели с МП [18–21].

Упомянутый способ [3] с использованием текучести сухого формовочного песка, изменяющего свойства под воздействием внешних факторов (вакуумирование, условия гравитационного течения, псевдооживления и т. п.), положен в основу проектировании получения изотермически закаленной отливки БП из ВЧ. Песок также использован в качестве технологического нагретого материала для поддержки изотермы бейнитного превращения металла БП.

Задача проектирования состояла в упрощении процесса изготовления БП, повышении технологичности производства способом литья, улучшении стойкости к разрушению и декоративного уровня по сравнению с известными БП. Эту задачу предложено решать за счет получения в отливке бейнитной структуры с остаточным аустенитом, который при нагрузке подвергается деформационному мартенситному превращению и приводит к трип-эффекту. Поверхность модели с МП предложено проектировать по компьютерной программе как поверхности с минимальной суммарной энергией поверхностного натяжения или с наименьшей суммарной энергией поверхностного натяжения в сочетании с гравитационной энергией и (или) энергией изгибной, ударной деформации, или деформации другого вида [18–20].

Кроме того, литье БП с МП дает ей ряд следующих преимуществ за счет такой конструкции. Литейная модель с МП [18, 19] при формовке в сыпучем песке взаимодействует с песком с минимальной энергией трения, которая пропорциональна площади поверхности модели. Это облегчает обтекание песком всей поверхности модели и дает четкий отпечаток модели на хорошо уплотненном вокруг нее песке или песчаной смеси. Также МП модели упрощает удаление песка с поверхности отливки при выбивке, что немаловажно для быстрого переноса горячей отливки в закалочную среду. А кривизна МП отливки из ВЧ броневой преграды способствует изменению ориентации поражающего бронебойного боеприпаса в пространстве и отклонению траектории его полета. При этом обеспечивается эффективное поглощение энергии летящего боеприпаса не только упрочнением материала при его деформации, но и минимальной вероятностью расположения (ориентации) мест поверхности БП перпендикулярно полету этого боеприпаса благодаря кривизне поверхности.

Технологически для пенопластовых моделей (в том числе для отливок, покрывающих сложные изгибы защищаемых объектов) наличие МП увеличивает количество вариантов их расположения в песке литейной формы без опасности получения не-

заполненных песком объемов, каналов или недостаточно уплотненных зон песка у поверхности модели. А для сложнофасонных моделей увеличивается их технологичность и уменьшается вероятность дефектов отливок БП вследствие слабого уплотнения песка у их поверхности.

Также учитывали, что с уменьшением поверхности литейной полости формы (соответственно, МП модели) уменьшается площадь контакта заливаемого металла с этой поверхностью, в сочетании с отсутствием или минимизацией количеством углов в пространственной конструкции модели это улучшает заполняемость формы металлом, дает возможность заливать длинномерные тонкостенные изделия. Характерная плавная кривизна МП способствует течению металла без резких поворотов, гидравлических ударов и его разбрызгивания в сочетании с уменьшением отвода тепла через МП стенки формы. По этим же причинам преимущества МП эффективны для изготовления моделей литниковой системы, применяемых для литья БП. Повышенная заполняемость формы с МП позволяет снижать температуру заливаемого металла, уменьшая вероятность пригара на поверхности отливок, способствует уменьшению газовой и усадочной их пористости.

Заоваленные очертания отливки с МП уменьшают работу трения ее о стенки формы, чем снижают возможность ее затрудненной усадки с сопутствующими трещинами, как характерного недостатка для отливок с разветвленными полостями. Формы для ЛГМ, как правило, упрочняют вакуумированием песка, дополнительно увеличивая показатели заполняемости формы расплавом металла из-за высокой вероятности вакуумного всасывания со стороны песчаной формы, а для отливки ячеистой конструкции с МП, сокращая пути отвода газов в толще формы.

С помощью компьютерных программ возможно построение поверхности моделей БП для защиты объектов с произвольной топологией, подчиненной разнообразным объемным и предельным связям [18–20]. Например, можно зафиксировать объем, охватываемый поверхностью (изопериметрические задачи), или контактные углы на линиях пересечения искомой поверхности с некоторой заданной поверхностью объемов защищаемых БП, в том числе для защиты закрытых объемов, например, на транспортных средствах, в домах, хранилищах или банках, или для покрытия противоккумулятивным экраном бронемашин или танков и защиты от кумулятивных боеприпасов при установлении такого препятствия на некотором расстоянии от основной брони.

Для поиска конфигурации с минимальной энергией программа Surface Evolver использует метод градиентного спуска и служит одним из примеров программ, пригодных для построения МП и для их сочетания с другими поверхностями при конструировании литейных моделей [18–20], в том числе для БП. Это позволяет за короткое время не только получить чертежи (оцифрованный объем данных) литой конструкции или модели с МП, но и МП в сочетании с заданными служебными характеристиками отливки БП. Такие возможности программных средств сокращают продолжительность, автоматизирует и компьютеризирует подготовку производства и повышает служебные свойства отливки БП с возможным уменьшением ее массы. Полученные с помощью компьютерных программ чертежи удобно сразу подавать на управляемый компьютером 3D-фрезер, который в автоматическом режиме изготовит из плиты или блока пенопласта литейную модель или модель ее пресс-формы для серийного изготовления литейной модели или ее частей с помощью автоклава или полуавтомата.

В работах [18–21] показан ряд изображений модели с гироидной поверхностью. Доступность литья таких конструкций также подтверждает пример литейной разовой модели с поверхностью гироида и отливки из бронзы по ней (рис. 2). Их изготовил И. В. Хоутен в 2006 г. [21], ее модель (на рис. 2 слева) иллюстрирует способ сбора с шестигранников, которые видны на модели, но они сливаются в одно целое в отливке.

На рис. 3 показаны примеры поверхностей двух шестигранных элементов

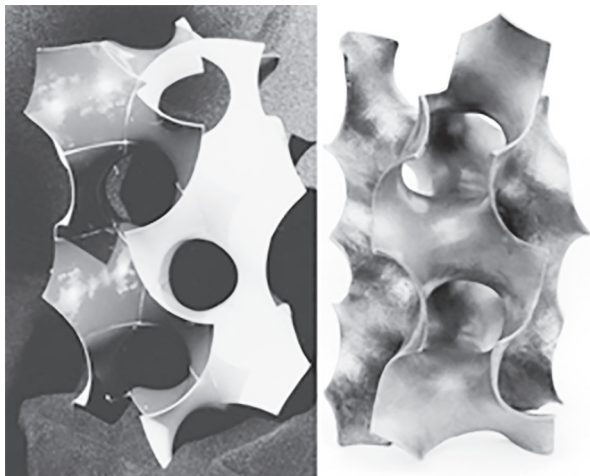


Рис. 2. Модель с поверхностью гироида и отливка по этой модели

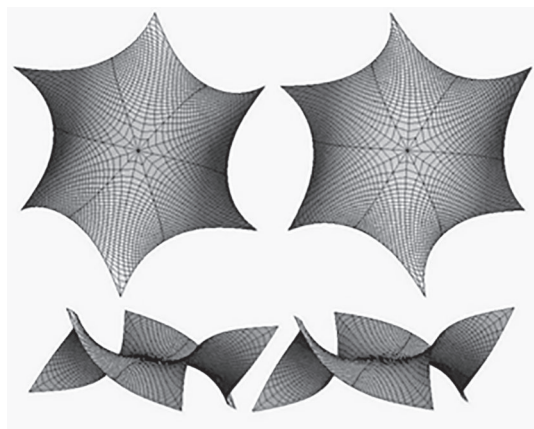


Рис. 3. Поверхности двух шестиугольных элементов при виде в плане и при виде сбоку

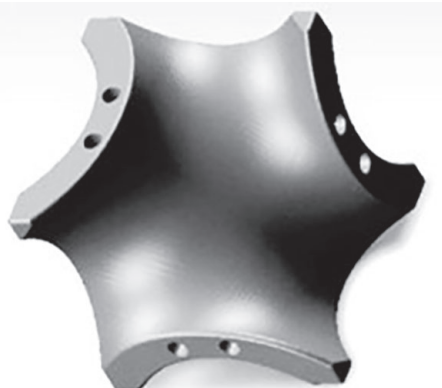
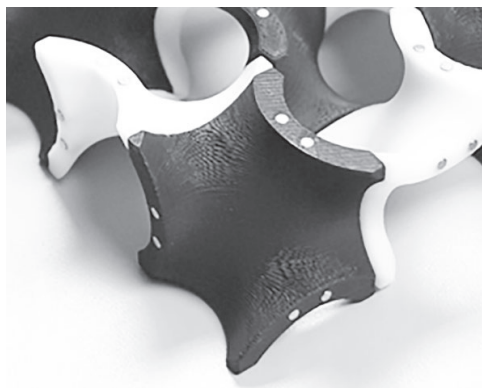


Рис. 4. Сборка пенопластовой модели с гироидной поверхностью методом соединения элементов светлого и темного цвета и отдельный фундаментальный элемент темного цвета

при виде в плане и при виде сбоку [21]. Технология изготовления модели состоит в сборке из повторяющихся пластин в форме правильных шестиугольников с фасонной поверхностью, с выпуклыми и вогнутыми частями (рис. 3, 4). К этим собранным моделям монтировали модели литниковых систем, затем красили противогригной краской с последующей сушкой.

На рис. 4 показан фрагмент сборки пенопластовой модели БП с гироидной поверхностью методом соединения элементов светлого и темного цвета для демонстрации размеров и границ стыка. На торцах элементов обозначены места для монтажных средств соединения элементов. На рис. 5 показано модель плоской броневой преграды с гироидной поверхностью.

Изготовленные по разработанной технологии отливки БП могут использоваться в качестве декоративных элементов металлических литых конструкций. Они имеют весьма привлекательный вид и аналоги среди природных конструкций [19, 20], а также ряд изображений в Интернете в качестве примеров изделий ювелирии, плафонов светильников или скульптур, как металлических, так и пластиковых, деревянных или бетонных [21]. Плавный

охват защищаемого объекта благодаря конструированию по компьютерным программам также способствует этому. Поскольку гироидная БП имеет конструкцию

с каналами сложной конфигурации, то в зависимости от толщины может изготавливаться или совсем непрозрачной для прямого взгляда, или частично прозрачной для обзора пространства за ней сквозь отдельные отверстия или для облегчения конструкции. Но в обоих случаях ее каналы могут пропускать свет, что позволяет с помощью БП защищать окна, особенно, когда она покрыта светлой или светоотражающей краской. А также гироидная конструкция БП пропускает воздух, позволяя ею защищать отверстия для вентиляции.



Рис. 5. Модель ячеистой плоской БП из цветного пенопласта

В работах [4, 5] описаны примеры применения изотермически закаленного ВЧ в отливках. Поскольку мы проектируем ЛГМ как базовый технологический процесс для использования имеющихся научно-технологических разработок [3, 4, 6] при получении таких отливок, то целесообразно показать примеры ранее изготовленных отливок по ЛГМ-процессу, которые рационально перевести на получение их из бейнитного ВЧ (рис. 6). В ряде случаев для этих отливок следует обеспечить возможность трип-эффекта в процессе их эксплуатации, а также для многих отливок, очевидно, произойдет уменьшение веса в связи с существенным повышением их прочности. Все эти отливки и модели или им подобные выполнены в отделе физико-химии литейных процессов под руководством проф. Шинского О. И.

В мировой практике номенклатура литья из изотермически закаленного ВЧ постоянно расширяется, наиболее массовыми деталями следует назвать шестерни и зубчатые колеса [4]. В конце 50-х годов прошлого века в Украине впервые в мире начали изготавливать из такого чугуна коленчатые валы [4, 6]. Из такого металла изготавливают элементы трансмиссии грузовых автомобилей и электровозов, его рекомендуют для тяжело нагруженных деталей экскаваторов, крышек подшипников, цапф, звездочек, зубчатых венцов, шкивов и др. Приемлем он для корпусных деталей гидротурбин, роликов, обойм, рычагов, фланцев, ходовых колес, корпусных и других литых деталей вагонов и горнодобывающего оборудования. Также он найдет применение для износостойких литых деталей для тракторов и металлургического оборудования, кронштейнов, балансиров, катков, других ответственных деталей повышенной прочности, а также работающих на износ, подвергающихся ударным нагрузкам, и изделий, подвергающихся действию относительно слабых агрессивных сред (атмосферные осадки, влажный пар, водные растворы солей органических кислот при комнатной температуре). Кроме того, такого вида ВЧ перспективен для деталей, работающих в морской воде, и деталей повышенной прочности для авиационной, химической и других отраслей промышленности, для арматуры нефтеперерабатывающих установок, корпусов насосов и других деталей, работающих в нефтяных средах. Он имеет потенциал применения для литых деталей энергоустановок, корпусов вихревых и шаровых мельниц, щек дробилок, гусеничных траков, зубьев ковшей экскаваторов и других деталей, работающих в условиях абразивного износа.

Описанный обзор обоснования технологии литья защитных и износостойких конструкций при проектировании их литейного производства из изотермически закаленного чугуна может служить аргументацией для применения новых технических решений и материалов, которые обладают механизмом упрочнения и адаптации материала ко внешним деформационным воздействиям. В качестве примера проанализировано проектирование защитной конструкции ячеистой отливки со

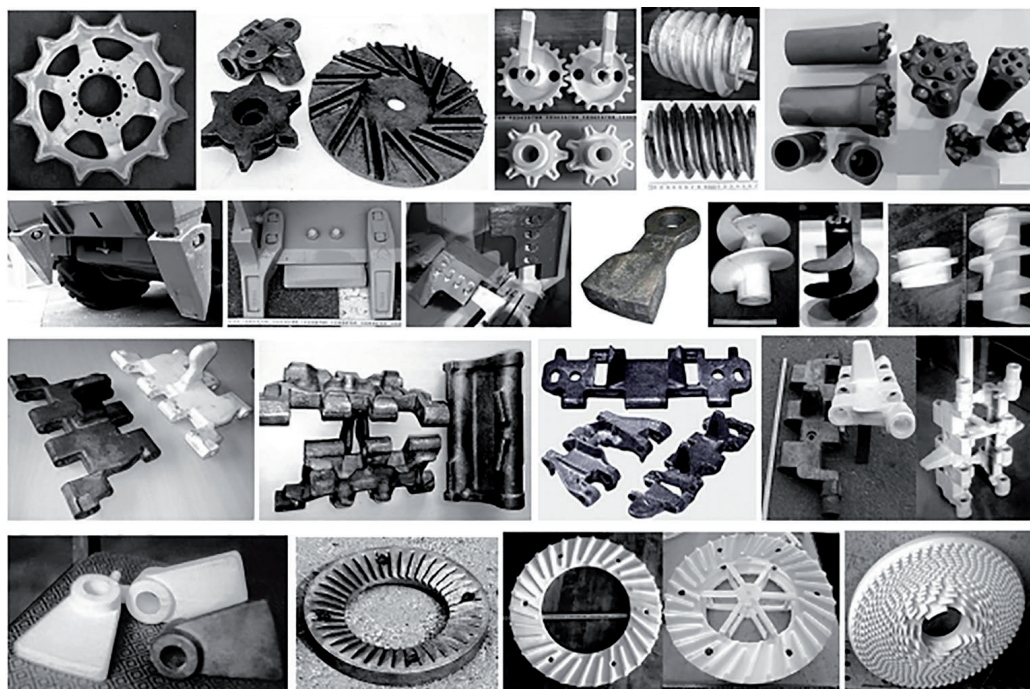


Рис. 6. Примеры моделей и отливок, рекомендованных для перевода на изготовление из изотермически закаленного чугуна

свойственным ей несложным процессом сборки литейных моделей, а технология ее литья в сочетании с термообработкой построена на использовании литья по газифицируемым моделям.

Список литературы

1. Ноговицин О. В., Дядюра А. С., Баранов І. Р. Реологічні властивості сталі при валковому розливанні-прокатуванні // *Металознавство та обробка металів*. – 2014. – № 2. – С. 39–46.
2. Перспективы совмещения деформации и термической обработки в сортопрокатном производстве сталей и сплавов / А. В. Ноговицин, Я. И. Спектор, Ю. В. Яценко и др. // *Науковий вісник. Пластична деформація металів. Праці ІЧМ. Сучасні проблеми металургії*. – 2002. – Том 5. – С. 369 – 373.
3. Патент 123731 Україна, МПК В22 D7/00, В22 D23/00, С21D5/02, С21D1/20, В22 D27/04. Спосіб виготовлення виливків з бейнітного або аусферитного чавуну з кулястим графітом / В. С. Дорошенко, В. О. Шинський. – Опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5.
4. *Найдек В. Л., Гаврилюк В. П., Неижко І. Г.* Бейнітний високопрочний чугун. – К., 2008. – 140 с.
5. *Волощенко С. М.* Створення наукових засад структуроутворення в високоміцному чавуні для підвищення зносостійкості змінних деталей сільгосптехніки та транспорту: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.01. – Київ, 2018. – 40 с.
6. *Бубликов В. Б., Бачинский Ю. Д., Медведь С. Н.* Аусферитний високопрочний чугун // *Литво. Металургія*. 2018: Матеріали XIV Міжнарод. науково-практич. конференції (22–24. 05.2018, м. Запоріжжя) / Під заг. ред. Пономаренко О. І. – Запоріжжя: АА Тандем. – С. 39–41.
7. *Малинов Л. С., Бурова Д. В., Гоманюк В. Д.* Новые способы ступенчатой и изотермической закалки для получения многофазной структуры с метастабильным аустенитом // *Университетская наука–2018: в 3 т.: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 23–24 мая 2018 г.) / ГВУЗ «ПГТУ»*. – Мариуполь, 2018. – Т. 1. – С. 152–154.
8. *Малинов Л. С., Малышева И. Е., Гоманюк В. Д.* Получение в структуре поверхностного слоя малоуглеродистых низколегированных сталей метастабильного остаточного аустенита для повышения их износостойкости и сопотривления пулепробиванию // *Университетская*

- наука – 2018: в 3 т.: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 23–24 мая 2018 г.) / ГВУЗ «ПГТУ». – Мариуполь, 2018. – Т. 1. – С. 154–155.
9. *Малинов Л. С.* Повышение свойств стали и чугунов за счет обработок, создающих в структуре наряду с другими составляющими метастабильный аустенит // Университетская наука – 2017: в 3 т.: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 18–19.05.2017) / ГВУЗ «ПГТУ». – Мариуполь, 2017. – Т. 1. – С. 17–19.
 10. Патент 93688 Україна, МПК В22D11/06, С21D8/02, В21В 1/46, С21D9/46, С22С 38/06. Лита сталева стрічка (варіанти) / Р. Б. Махапатра, У. Блейд, Л. Стрезов. – Оpubл. 10.03.2011, Бюл. № 5.
 11. *Лободюк В. А., Эстрин Е. И.* Мартенситные превращения. – М.: Физматлит, 2009. – 352 с.
 12. *Мазур В. Л., Ноговицын А. В.* Теория и технология тонколистовой прокатки. – Днепропетровск: Дніпро-VAL, 2010. – 493 с.
 13. Актуальные проблемы прочности: монография. В 2-х т. Т. 1. / Алифанов А. В. и др.; под ред. В. В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2018. – 423 с.
 14. *Марукович Е. И., Карпенко М. И.* Литейные сплавы и технологии. — Минск: Беларуская наука, 2012. – 442 с.
 15. *Балаганский И. А., Мержиевский Л. А.* Действие средств поражения и боеприпасов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 408 с.
 16. Патент 90006 Україна, МПК F41H 5/00, F41H 5/04. Броньова перешкода / В. В. Яблоков, М. В. Грибачов, О. О. Челобітченко та ін. – Оpubл. 12.05.2014, Бюл. № 9.
 17. Патент 82294 Україна, МПК F41H 5/00, F41H 5/04. Багатошарова броньова перешкода / В. А. Бублій, В. А. Курбан, В. П. Сахно. – Оpubл. 25.07.2013, Бюл. № 14.
 18. Патент 82028 Україна. МПК В22С 7/02. Ливарна модель / О. Й. Шинський, В. С. Дорошенко. – Оpubл. 25.07.2013, Бюл. 14.
 19. *Дорошенко В. С.* Математическое проектирование каркасно-ячеистых отливок // Литейное производство. – 2013. – № 2. – С. 9–12.
 20. *Мешков В.* Минимальные поверхности и Surface Evolver Кеннета Брэкке // Вестник молодых ученых. – 2004. – № 1. – С. 84.
 21. Triply-periodic minimal surfaces. URL: schoengeometry.com/e-tpms.html

Поступила 09.10.2018

References

1. *Nogovitsin, O. V., Dyadyura, A. S., Baranov, I. R.* (2014) Rheological properties of steel at roll casting-rolling. *Metaloznavstvo ta obrobka metallv*, no. 2, pp. 39–46 [in Ukrainian].
2. Prospects for combining deformation and heat treatment in section rolling production of steel and alloys / A.V. Nogovitsin, Ya.I. Spektor, Yu.V. Yatsenko i dr. *Naukovl vstl. Plastichna deformatsiya metallv. Pratsl IChM. Suchasnl problemi metalurgiyi*, 2002, Tom 5. pp. 369–373. [in Russian].
3. Patent 123731 Ukrayina, МПК В22 D7/00, В22 D23/00, S21D5/02, S21D1/20, В22 D27/04. Method for making castings from bainitic or ausferritic ductile cast iron with spheroidal graphite. V. S. Doroshenko, V. O. Shy`ns`ky`j. Opubl. 12.03.2018, Byul. no. 5.
4. *Najdek, V.L., Gavrilyuk, V.P., Neizhko, I.G.* (2008) Bainitic ductile cast iron. K., 140 s. [in Russian].
5. *Voloshhenko, S. M.* (2018) Creation of scientific principles of structure formation in high-strength cast iron to improve wear resistance of variable parts of agricultural machinery and transport: avtoref. dy`s. ... dokt. texn. nauk: 05.02.01. Kyiv, 40 s. [in Ukrainian].
6. *Bublikov, V. B., Bachinskij, Yu. D., Medved', S. N.* Ausferritic ductile iron. Litvo. *Metalurgiya*. 2018: Materialy XIV Mizhnarod. naukovo-praktich. konferencii (22–24. 05.2018, m. Zaporizhzhya) / Pid zag. red. Ponomarenko O. I. Zaporizhzhya. AA Tandem, pp. 39–41. [in Ukrainian].
7. *Malinov, L. S., Burova, D. V., Gomanyuk, V. D.* New methods of stepwise and isothermal quenching for obtaining a multiphase structure with a metastable austenite. *Universitetskaya nauka*. 2018: v 3 t.: тез. dokl. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Mariupol', 23–24 maya 2018 g.), GVUZ «PGTU». Mariupol', 2018, T. 1, pp. 152–154. [in Russian].
8. *Malinov, L. S., Malysheva, I. E., Gomanyuk, V. D.* Obtaining in the structure of the surface layer low-carbon low-alloy steels of metastable residual austenite for increasing their wear resistance and bullet resistance. *Universitetskaya nauka* – 2018: v 3 t.: тез. dokl. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Mariupol', 23–24 maya 2018 g.), GVUZ «PGTU». Mariupol', 2018, T. 1, pp. 154–155. [in Russian].
9. *Malinov, L. S.* Increase in the properties of steels and cast irons due to treatments that create metastable austenite along with other constituents. *Universitetskaya nauka* – 2017: v 3 t.: тез. dokl. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Mariupol', 18–19 maya 2017 g.), GVUZ «PGTU». Mariupol', 2017, T. 1, pp. 17–19.

10. Patent 93688 Ukrayina, MPK B22D11/06, S21D8/02, B21V 1/46, S21D9/46, S22S 38/06. Cast steel strip (options): R. B. Maxapatra, U. Blejd, L. Strezov. Opubl. 10.03.2011, Byul. no. 5.
11. *Lobodyuk, V. A., Estrin, Ye. I.* (2009) Martensitnye transformations. M.: Fizmatlit, 352 s. [in Russian].
12. *Mazur, V. L., Nogovitsyin, A. V.* (2010) Theory and technology of sheet rolling. Dnepropetrovsk: Dnipro-VAL, 493 s. [in Russian].
13. *Alifanov A. V. et al.* (2018) Actual problems of strength: monograph. V 2-h t, T. 1, pod red. V. V. Rubanika. – Vitebsk: UO «VGTU», 423 s. [in Russian].
14. *Marukovich, E.I., Karpenko, M.I.* (2012) Foundry alloys and technologies. Minsk: Belaruskaya navuka, 442 s. [in Russian].
15. *Balaganskij, I. A., Merzhievskij, L. A.* (2012) The operation of weapons and ammunition. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 408 s. [in Russian].
16. Patent 90006 Ukrayina, MPK F41H 5/00, F41H 5/04. Armor Interference V. V. Yablokov, M. V. Gry'bachov, O. O. Chelobitchenko ta in. Opubl. 12.05.2014, Byul. no 9.
17. Patent 82294 Ukrayina, MPK F41H 5/00, F41H 5/04. Multilayer Armor Barrier. V. A. Bublik, V. A. Kurban, V. P. Saxno. Opubl. 25.07.2013, Byul. no. 14.
18. Patent 82028 Ukrayina. MPK V22S 7/02. Casting pattern. O. J. Shy`ns`ky`j, V.S. Doroshenko. Opubl. 25.07.2013, Byul. no.14.
19. *Doroshenko, V. S.* (2013) Mathematical Design of Frame-Cell Castings. Litejnoe proizvodstvo, no. 2, S. 9–12 [in Russian].
20. *Meshkov, V.* (2004) Minimal surfaces and Surface Evolver by Kenneth Bracke. Vestnik molodyh uchenyh, no.1, pp. 84 [in Russian].
21. Triply-periodic minimal surfaces. URL: <https://schoengeometry.com/e-tpms.html>.

Received 09.10.2018

В. С. Дорошенко, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: doro55v@gmail.com
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЛИТТЯ ЗАХИСНИХ ТА ЗНОСОСТІЙКИХ КОНСТРУКЦІЙ З ІЗОТЕРМІЧНО ЗАГАРТОВАНОГО ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

Огляд технології виготовлення захисних та зносостійких конструкцій при проектуванні їх ливарного виробництва з ізотермічно загартованого чавуну служить обґрунтуванням застосування нових технічних рішень та матеріалів, які володіють механізмом зміцнення та адаптації матеріалу до зовнішніх деформаційних впливів. Нові конструкції комірчастих виливків розроблені зі спрощеним процесом збирання разових ливарних моделей. Технологія лиття в комбінації з термообробкою побудована при використанні лиття за моделями, що газифікуються.

Ключові слова: лиття, броньова перешкода, комірчастий виливок, високоміцний чавун, бейнітний чавун, аустеніт, аусферитний чавун, лиття за моделями, що газифікуються.

V.S. Doroshenko, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher,
e-mail: doro55v@gmail.com

Physico-technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

DESIGNING TECHNOLOGY FOR CASTING PROTECTIVE AND WEAR-RESISTANT STRUCTURES MADE OF ISOTHERMAL HARDENED HIGH-STRENGTH CAST IRON

An overview of the technology of casting protective and wear-resistant structures during the design of their foundry from isothermally tempered cast iron serves as a justification for the application of new technical solutions and materials that have a mechanism of hardening and adaptation of the material to external deformation. New cell castings are designed with a simplified assembly process for single casting models. Casting technology in combination with heat treatment is based on the use of Lost Foam casting.

Keywords: casting, ammunition, armament, cellular casting, ductile iron, bainitic cast iron, austenite, ausferritic cast iron, Lost Foam casting, evaporated patterns.