



УДК 621.74.047

Поступила 08.09.2017

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЧУГУНОВ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВКИ

## IMPROVING THE QUALITY OF PARTS FROM CAST IRON BY CREATING OF THE OPTIMAL CONDITIONS FOR THE FORMATION OF CASTINGS

*Е. И. МАРУКОВИЧ, В. Ф. БЕВЗА, В. П. ГРУША, ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси», г. Могилев, Беларусь, ул. Бялыницкого-Бурули, 11. E-mail: info@itm.by*

*Y. I. MARUKOVICH, V. F. BEVZA, V. P. GRUSHA, Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus, 11, Byalynitskogo-Biruli str. E-mail: info@itm.by*

*Приведено описание принципиально нового эффективного высокопроизводительного метода литья полых цилиндрических заготовок без применения стержня. Дан анализ формирования отливок из чугуна и возможности управления процессом структурообразования. Приведены эксплуатационные характеристики деталей.*

*The description of fundamentally new highly productive method of casting of hollow cylindrical billets without the use of the rod is given. The analysis of the formation of the cast iron parts and control of the process of structure formation is provided. The operating characteristics of workpieces are show.*

**Ключевые слова.** Чугун, кристаллизатор, направленная кристаллизация (намораживание), литье, термическая обработка, структура, твердость.

**Keywords.** Cast iron, crystallizer, directional solidification (freezing-up), casting, heat treatment, structure, hardness.

Повышение ресурса работы деталей обычно достигается за счет разработки новых материалов и покрытий. Эффективным также является создание принципиально новых методов получения деталей, обеспечивающих повышение физико-механических и придание качественно новых характеристик уже известным недорогим материалам.

Чугун является наиболее распространенным среди конструкционных материалов. Существенно повысить качество деталей из чугуна и их эксплуатационные свойства можно не только легированием, модифицированием, внешним воздействием на кристаллизующийся расплав, но также за счет создания оптимальных условий затвердевания металла и управления процессом структурообразования.

Структура и свойства чугуна в значительной степени зависят от интенсивности теплоотвода в период первичной кристаллизации и условий последующего охлаждения. В связи с этим режим охлаждения с регулируемой скоростью в определенном интервале температур является эффективным средством управления процессом структурообразования чугуна.

Один из наиболее перспективных и эффективных способов решения такой задачи – это создание технологий, основанных на организации направленного затвердевания металла за счет одностороннего теплоотвода и исключения дефицита жидкой фазы в течение всего времени формирования отливки [1]. Традиционные методы литья зачастую не могут в полной мере обеспечить такие условия. Этим объясняется недостаточный уровень качества отливок.

В связи с вышесказанным актуальным является развитие нового, не имеющего аналогов в мировой практике эффективного способа получения полых мерных заготовок, типа втулок, без применения стержня методом направленного затвердевания в непрерывно-циклическом режиме литья (НЦЛН). Сущность метода 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. За-

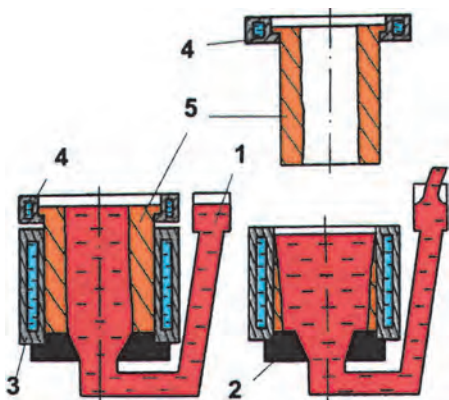


Рис. 1. Принципиальная схема литья: 1 – сифонная литниковая система; 2 – соединительный стакан; 3 – стационарный кристаллизатор; 4 – подвижные кристаллизаторы (захваты); 5 – отливка

тем подачу металла прекращают и делают выдержку для намораживания стенки заготовки необходимой толщины.

При этом реализуется принцип направленного затвердевания металла, при котором наружная поверхность отливки ограничивается рабочей поверхностью кристаллизатора, а внутренняя получается непосредственно из расплава, т. е. без стержня.

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, затвердевание металла в кристаллизаторе происходит непрерывно в течение всего времени литья, а извлечение заготовок осуществляют циклически с заданным периодом. Причем в каждом цикле затвердевает только периферийная часть объема жидкого чугуна, участвующего в формировании данной отливки, т. е. время выдержки всегда меньше времени, необходимого для затвердевания всего залитого в кристаллизатор металла.

Количество остающегося в кристаллизаторе расплава после извлечения отливки зависит от соотношения массы затвердевшего металла и массы расплава, находящегося в кристаллизаторе в момент начала формирования каждой последующей отливки. Для оценки этого параметра принят коэффициент избыточного питания ( $K_{изб}$ ), который определяет относительную величину избыточной массы расплава, участвующего в формировании отливки:

$$K_{изб} = \frac{M - m}{M},$$

где  $M = \frac{\pi D^2}{4} H \rho$  – масса расплава в кристаллизаторе после его заполнения до заданного уровня;

$m = \frac{\pi [D^2 - d^2]}{4} H \rho$  – масса затвердевающей корки;  $D$  – наружный диаметр отливки;  $H$  – высота отливки;

$d$  – внутренний диаметр затвердевающей корки;  $\rho$  – плотность.

После соответствующих подстановок получаем:

$$K_{изб} = \frac{d^2}{D^2} = \frac{r^2}{R^2}.$$

Таким образом, коэффициент  $K_{изб}$  определяется геометрическими параметрами отливки и изменяется от  $K_{изб} = 1$  в начале формирования, т. е. в период снятия перегрева расплава в зоне затвердевания, до  $K_{изб} = 0$  в случае получения сплошного слитка. При литье полых заготовок  $K_{изб}$  имеет промежуточные значения и определяет избыточную долю расплава, остающуюся в кристаллизаторе после извлечения отливки.

При НЦЛН основным элементом, выполняющим роль формообразователя и теплообменника для затвердевающей отливки, является кристаллизатор. Качество получаемых заготовок и стабильность процесса литья зависит от температурных условий работы рабочей втулки кристаллизатора, которые во многом определяют ее работоспособность. Знание температурного поля кристаллизатора дает возможность судить о величине тепловых потоков, отводимых с поверхности отливки, анализировать условия ее затвердевания [2].

При литье намораживанием кристаллизатор работает в условиях циклического теплового воздействия одновременно на всю внутреннюю поверхность со стороны расплава и интенсивного охлаждения наружной поверхности его рабочей втулки. Термоциклирование стальной рабочей втулки кристаллизатора при периодических контактах с расплавом чугуна приводит к усталостному разрушению (разгару рабочей поверхности) и выходу ее из строя. Ресурс работы кристаллизатора зависит от величины дефор-

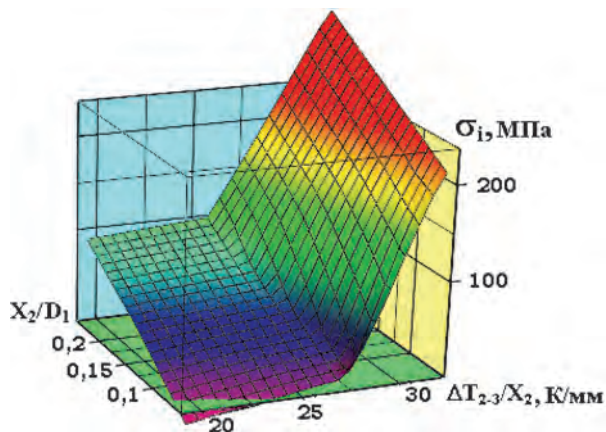


Рис. 2. Зависимость интенсивности максимальных остаточных напряжений  $\sigma_i$  от жесткости втулки  $X_2/D_1$  и градиента температур по толщине стенки кристаллизатора  $\Delta T_{2-3}/X_2$

хорошо коррелирует с жесткостью рабочей втулки и максимальным градиентом температуры по толщине стенки (рис. 2).

В процессе затвердевания и охлаждения металла между отливкой и кристаллизатором образуется газовый зазор, существенно влияющий на их теплообмен и условия затвердевания отливки. Основной вклад в образование зазора и кинетику его изменения при литье намораживанием вносят усадка затвердевающей отливки и деформация кристаллизатора в течение цикла формирования отливки.

Зазор является величиной, переменной во времени, и определяется изменением температурного поля кристаллизатора и отливки в течение цикла затвердевания последней. Его размер складывается из суммы абсолютных величин усадки отливки и деформации кристаллизатора. При этом если наружный диаметр затвердевающей отливки за счет усадки в течение всего времени формирования уменьшается монотонно, то изменение внутреннего диаметра рабочей втулки кристаллизатора в течение цикла происходит по кривой с максимумом.

Анализ показал, что в течение времени затвердевания отливки происходит постоянный рост газового зазора и в конце цикла он приобретает наибольшее значение. Причем максимальная интенсивность роста зазора имеет место в начальный период цикла. С момента времени, соответствующего максимальному значению температуры рабочей поверхности кристаллизатора, происходит снижение интенсивности роста газового зазора в 5–7 раз по сравнению с начальным периодом формирования отливки. Это происходит за счет уменьшения доли деформации кристаллизатора в общей величине зазора.

Установлено, что величина зазора в средней зоне по высоте кристаллизатора значительно больше, чем в зоне верхнего и нижнего торца. Это связано с особенностями принципиальной схемы литья и конструкции кристаллизатора. Образование бочкообразности может приводить к заклиниванию отливки при ее извлечении из кристаллизатора и прекращению процесса литья.

На основе анализа термодформационного взаимодействия отливки и рабочей втулки кристаллизатора получено выражение для расчета толщины стенки стального кристаллизатора в зависимости от диаметра отливки и определен профиль (величина прямой конусности) рабочей поверхности кристаллизатора. Так, например, при литье заготовок из серого чугуна диаметром 105 мм и высотой 240 мм разность диаметров верхнего и нижнего торца рабочей втулки составляет 0,8 мм. В этом случае бочкообразность компенсируется величиной конусности, что исключает заклинивание и обрыв затравочной части отливки при ее извлечении из кристаллизатора. Кроме того, минимизация конусности рабочей втулки кристаллизатора определяет относительно небольшую величину газового зазора в течение всего времени формирования отливки в кристаллизаторе. В результате в продолжение всего цикла сохраняются условия для большой интенсивности теплоотвода от поверхности отливки и высокой скорости затвердевания металла.

Создание оптимальных условий формирования отливок при литье намораживанием обеспечивает существенное повышение прочностных и эксплуатационных характеристик деталей.

Так, применительно к производству поршневых колец использование нового способа литья позволило повысить эксплуатационные характеристики изделий из чугуна на 15–20 % по сравнению с маслот-

маций, вызываемых знакопеременными тепловыми напряжениями, и продолжительности выдержки при максимальной температуре [3].

В результате исследований было установлено, что во всех случаях на рабочей (внутренней) поверхности кристаллизатора имеют место напряжения сжатия, а на водоохлаждаемой – растяжения. Причем на рабочей поверхности интенсивность напряжений имеет максимальное значение и в течение цикла изменяется в значительных пределах. На водоохлаждаемой поверхности и в средней зоне по толщине стенки эти напряжения значительно меньше и не превышают предела текучести стали в течение всей кампании разливки.

Основным критерием, который принимался во внимание при проведении анализа, были остаточные напряжения, фиксируемые в стенке втулки к концу цикла. Было установлено, что величина этих напряжений



Рис. 3. Номенклатура заготовок и деталей, получаемых методом намораживания

ными заготовками, полученными традиционными способами в серийном производстве. При этом усталостная прочность поршневых колец возросла на 35–45%, значительно увеличилась теплоустойчивость колец. Износостойкость нажимных колец из чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ), работающих в коробках передач, в 1,4–1,7 раз выше, чем серийных, изготовленных из стали 40Х. Что касается гильз цилиндров, изготовленных непрерывно-циклическим литьем намораживанием, то они в полной мере удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, а по некоторым показателям превосходят лучшие мировые аналоги. Следует отметить, что средний износ гильзы снизился на 30%, а их прочностные показатели, такие, как предел прочности и среднее давление разрушения, превышают на 14–16% аналогичные характеристики серийных гильз фирмы «Ичин» (Чехия).

Разработаны технологические основы получения отливок методом направленного затвердевания из белого высокохромистого чугуна для деталей, работающих в условиях абразивного износа и наличии ударных нагрузок. Исследована кинетика износа и установлено, что ресурс работы пуансонов из белого высокохромистого чугуна (БВХЧ), работающих в условиях абразивного износа, в 8–10 раз, а фильер для правильно-отрезных станков в десятки раз выше по сравнению с серийными из специальной стали [4].

Таким образом, технология литья намораживанием полых цилиндрических заготовок мерной длины обеспечивает повышение ресурса работы деталей из чугунов различных типов, применяемых в машиностроении, металлургии, промышленности строительных материалов и др., при этом показатели качества материала не уступают мировым. В процессе проведенных исследований определена возможность и разработана технология получения методом направленного затвердевания без стержня качественных полых заготовок высотой 90–250 мм, наружным диаметром 50–85 мм с толщиной стенки ( $\xi$ ) до 15 мм, время формирования которых в основном не превышает 20 с. При этом по классификации отливок, получаемых направленным затвердеванием, они относятся к разряду тонкостенных и со средней толщиной стенки:  $\xi/R \leq 0,35$  при  $K_{изб} = 0,3$  (рис. 3).

Номенклатура изделий, имеющих форму тел вращения, очень велика и разнообразна по геометрическим параметрам и типам чугунов. Значительное место среди них занимают толстостенные детали типа втулок, катков, заготовок зубчатых колес и т. п. из специальных и высокопрочных чугунов ( $\xi/R > 0,35$ ,  $K_{изб} < 0,4$ ). Поэтому проведение исследований и разработка технологических основ получения таких заготовок методом направленного затвердевания является перспективным направлением и имеет большое научное и практическое значение. При этом одной из основных проблем является определение возможности осуществления технологического процесса литья заготовок при заданных геометрических параметрах и высоких требованиях к качеству и структуре материала.

Эксперименты показали, что толстостенные отливки получают с отбелом или с большим количеством структурно-свободного цементита. Одной из основных причин этого является высокая интенсивность теплоотвода от затвердевающей отливки в период первичной кристаллизации и большая продолжительность выдержки в кристаллизаторе. Как уже отмечалось, при получении полых заготовок методом направленного затвердевания в условиях непрерывно-циклической разливки интенсивность теплоотвода в значительной степени зависит от температурного режима рабочей втулки кристаллизатора, который во многом определяется толщиной ее стенки и режимными параметрами литья.

Увеличение толщины стенки кристаллизатора на 30–35 % по сравнению с рекомендуемой ( $X_2 = 12$  мм) приводит к повышению до 190 °С температуры рабочей поверхности кристаллизатора в момент ее контакта с расплавом [5]. В результате в начале формирования каждой отливки расплав попадает на стенку кристаллизатора, имеющую повышенную температуру, что снижает интенсивность теплоотвода, минимизирует возможность образования карбидов и при затвердевании в эвтектическом интервале температур способствует образованию аустенитно-графитной эвтектики вместо ледебуритной.

Таким образом, увеличение толщины стенки кристаллизатора в указанных пределах при получении полых толстостенных заготовок методом направленного затвердевания в непрерывно-циклическом режиме литья приводит к снижению интенсивности теплоотвода от затвердевающей отливки и при этом его тепловой режим не достигает области критических температур, что обеспечивает надежную работу в течение длительного времени.

Как уже отмечалось, в настоящее время актуальной является задача расширения номенклатуры изделий по геометрическим параметрам и материалам, получаемых методом намораживания. В частности, большой интерес представляет получение заготовок из легированных чугунов для деталей, работающих в условиях сухого трения и абразивного изнашивания. Для деталей, работающих в таких условиях, часто применяются дорогостоящие высоколегированные марки сталей. Например, в машинах для свивки металлокорда используется деталь «диск тормозной», которая представляет собой кольцо наружным диаметром 108 мм и радиальной толщиной 14 мм. Эта деталь во многом определяет качество свивки и производительность канатного оборудования. Изготавливают ее из легированных сталей ШХ15, 18ХГТ, Х12М и др. Наружная полированная поверхность тормозного диска работает в паре с колодками из полимерного материала в условиях сухого трения. Ресурс работы определяется износом рабочей поверхности и уменьшением ее размера за пределы допустимого.

Проведенные исследования позволили подготовить исходные данные для разработки литейно-термической технологии получения заготовок из хромистого чугуна методом намораживания. Разработан ресурсосберегающий метод отжига отливок с использованием их первичного тепла в едином неразрывном технологическом цикле «литье – термическая обработка».

Установлено, что затвердевание хромистого чугуна в условиях литья намораживанием при высокой скорости охлаждения отливки обеспечивает получение дисперсной карбидной эвтектики в литом состоянии. Мелкодисперсная структура чугуна сохраняется и после высокотемпературной термической обработки. Решающая роль в наследовании положительного эффекта кристаллизации чугуна в условиях высокой интенсивности теплоотвода и постоянного избыточного питания фронта затвердевания жидкой фазой состоит в формировании плотной структуры и более дисперсной карбидной эвтектики с благоприятной морфологией карбидов, что определяет высокую износостойкость чугуна и эксплуатационные характеристики деталей.

Еще одной интересной и непростой задачей является получение чугунов со специальными свойствами. Так, для ремонта узлов и агрегатов нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности используется большая номенклатура деталей типа «тел вращения» (втулок и колец ответственного назначения), изготавливаемых из специальных (легированных) чугунов, в том числе втулки подшипников нефтяных центробежных насосов. В связи с эксплуатацией таких деталей в экстремальных условиях к их материалу предъявляется ряд специальных требований: немагнитность, ростоустойчивость при отрицательных температурах (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ), коррозионная стойкость и др. Этим условиям удовлетворяют никелево-медистые аустенитные чугуны типа ЧН15Д7 с пластинчатым графитом, известные под названием «нирезист» [6,7].

На начальной стадии исследований основной задачей было определение порога возможности осуществления стабильного процесса получения полых заготовок малого диаметра ( $D \approx 40$  мм) методом направленного затвердевания.

В результате проведенных исследований установлена принципиальная возможность получения полых цилиндрических отливок такого размера в непрерывно-циклическом режиме литья. При этом необходимо выдерживать условие стабилизации в определенных пределах температуры расплава, подаваемого в кристаллизатор в течение всей кампании разлива.

Особенностью при литье аустенитного никелевого чугуна «нирезист» является повышение твердости за счет появления ферромагнитной фазы при медленном охлаждении отливок в интервале температур 1000–700  $^{\circ}\text{C}$ . Это связано с тем, что отжиг и высокотемпературный отпуск после нормализации приводит к выпадению из пересыщенного легированного аустенита мелкодисперсных карбидов, равномерно распределенных в аустенитной матрице [8]. Это явление имеет место и при литье заготовок направленным затвердеванием. Для количественной оценки и выбора обоснованного режима охлаждения отливок после извлечения из кристаллизатора экспериментально было определено изменение температуры отливок при охлаждении в различных условиях.

Анализ показывает, что охлаждение отливок массой 5 кг в естественных условиях на воздухе от 1000 до 700  $^{\circ}\text{C}$  происходит со скоростью  $v_1 = 1,2$  К/с, в потоке воздуха, скорость которого составляет  $v_b =$

5 м/с,  $v_1 = 1,4$  К/с, в воде –  $v_1 = 250$  К/с. Надо отметить, что при охлаждении отливок в воде чугуна в литом состоянии имел аустенитную металлическую матрицу, твердость в пределах 78–87 HRB, остаточную магнитную индукцию не более 0,2 мТл, т. е. по этим параметрам он соответствовал техническим требованиям. Однако слишком большая скорость охлаждения определяет возникновение больших термических напряжений, что может вызывать появление трещин в отливках.

Установлено, что после извлечения из кристаллизатора отливки массой ~ 5 кг в интервале температур 1000–700 °С следует охлаждать со скоростью 1,3–1,4 К/с, т. е. в потоке воздуха, а затем в естественных условиях на воздухе. Такой режим обеспечивает стабильное получение аустенитной металлической матрицы в литом состоянии без включений в структуре чугуна карбидов и продуктов распада аустенита.

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение метода направленного затвердевания оказывает положительное влияние на качество и эксплуатационные характеристики полых цилиндрических заготовок из различных марок чугунов для широкого круга машиностроительных деталей [9, 10].

Метод направленного затвердевания обеспечивает получение заготовок из чугуна с плотной мелкодисперсной структурой, заданным фазовым составом и повышенными физико-механическими свойствами. Это существенно повышает эксплуатационные характеристики деталей и ресурс их работы.

Создание оптимальных условий затвердевания и охлаждения отливок на макро- и микроуровне придает чугуну новые повышенные механические и эксплуатационные характеристики, ставит его в разряд высокоэффективных конструкционных материалов и значительно расширяет область его применения.

Новый метод литья уже применяется при производстве полых цилиндрических заготовок различного назначения из серого и высокопрочного низколегированного чугуна с пластинчатым и шаровидным графитом, белого высокохромистого чугуна и из чугуна типа «нирезист». В ряде случаев такие заготовки с успехом заменяют сплавы на основе меди и легированные стали.

### Литература

1. **Марукович Е. И.** Принципиально новый эффективный процесс литья полых цилиндрических заготовок из чугуна методом направленного затвердевания / Е. И. Марукович, В. Ф. Бевза, В. П. Груша // *Литье и металлургия*. 2010. № 3. С. 21–24.
2. **Бевза В. Ф.** Температурное поле кристаллизатора при непрерывно-циклическом литье намораживанием / В. Ф. Бевза, А. М. Бодяко // *Литье и металлургия*. 2002. № 4. С. 96–98.
3. **Расчет** напряжений и упругопластических деформаций в стальном кристаллизаторе при циклическом тепловом нагружении / В. Ф. Бевза, Е. И. Марукович, В. А. Попковский // *Литье и металлургия*. 2004. № 2. С. 43–48.
4. **Бодяко А. М.** Новые возможности метода намораживания при литье чугунов / А. М. Бодяко, С. В. Галагаев, А. А. Бодяко, А. А. Супонев // *Литье и металлургия*. 2009. № 3 (52). С. 186–189.
5. **Современные** литейные технологии / Н. К. Толочко [и др.]; под ред. Н. К. Толочко и А. С. Калиниченко. Минск: БГиАТУ, 2009. 359 с.
6. **Mohd Rashidi M. and M. H. Idris** Effect of inoculation on microstructure, mechanical and corrosion properties of high manganese ductile Ni-resist alloy // *Materials & Design*, 2013. 51. P. 861–869.
7. **Rashidi M. M. and Idris M. H.** The effects of solidification on the microstructure and mechanical properties of modified ductile Niresist iron with a high manganese content // *Materials Science and Engineering: A*, 2014. 597. P. 395–407.
8. **Александров Н. А.** Влияние кремния и модифицирования расплава на устойчивость аустенита при охлаждении хромо-никелевого чугуна / Н. А. Александров, Н. С. Гушин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. № 7 (613). С. 15–17.
9. **Marukovich Y. I.** Fundamentally New Effective Process, of Casting of Hollow Cylindrical Billets of Cast Iron by the Method of Directional Solidification / Y. I. Marukovich, U. F. Bevza // *Key Engineering Materials*. 2011. Vol. 457. P. 465–469.
10. **Marukovich Y. I.** Continuously – iterative casting by freezing – up of tube billets / Y. I. Marukovich, U. F. Bevza, V. P. Grusha, 71 WORLD FOUNDRY CONGRESS. Advanced Sustainable Foundry 19–21 May 2014. BILBAO, SPAIN.