ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.73-412.004.12

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-11-19

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ СЛИТКА И УСЛОВИЙ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ НА ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЕ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ

Гаманюк С.Б., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Чубуков М.Ю., Пузиков А.Я.

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Аннотация

Актуальность и цели: для производства полых поковок применяются как прибыльные слитки нормальной длины, так и удлиненные прибыльные и бесприбыльные слитки. Наиболее перспективными в смысле обеспечения качественных характеристик изделий и экономических показателей производства являются слитки с заголовочной головной частью. **Материалы и методы:** объектом исследования являлся слиток с заголовочной головной частью массой 1,53 т стали 38ХНЗМФА, отлитый с использованием прибыли-холодильника объемом 10,8%. Процесс кристаллизации и структурообразования исследуемого слитка проводили с помощью физического моделирования на плоских моделях – изложницах с прозрачными стенками. Исследование литого металла слитка на макроструктуру проводили путём травления. Математическое моделирование процесса кристаллизации слитка осуществлялось с помощью системы компьютерного моделирования «Crystal». **Результаты и выводы:** результаты физического моделирования слитков с различным объёмом захлаживающей надставки позволили выявить особенности затвердевания как всего слитка, так и различных его областей. Математическим моделированием получена зависимость, связывающая геометрические параметры слитка (отношение Н/Д) с относительной глубиной проникновения усадочной раковины в тело слитка. Для количественной оценки эффективности воздействия прибыли-холодильника на вертикальную кристаллизацию был проведён расчёт тепловой работы захлаживающей и утепляющей прибыльной надставки. Установлено, что в слитках с заголовочной головной частью зона осевой рыхлости в 2 раза меньше в диаметре и короче по высоте по сравнению с обычными слитками. Химическая неоднородность обычных слитков развита весьма значительно, а в слитке с заголовочной головной частью более равномерно. Расположение усадочной раковины в слитке с заголовочной головной частью вдоль его оси при значительном диаметре обеспечивает ее удаление при изготовлении полой поковки. Слиток с заголовочной головной частью характеризуется минимальной трудоёмкостью при подготовке к разливке и имеет наименьшую головную обрезь. Применение этой технологии обеспечивает выравнивание содержания ликвирующих элементов по высоте слитка и улучшает его структурные и качественные характеристики.

Ключевые слова: слиток с заголовочной головной частью, кристаллизация, химическая и структурная неоднородность, усадочные дефекты, ливкация, физическое и математическое моделирование.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 16-08-01029 А и № 15-08-08098 А конкурса СП-2015 (СП-4573.2015.1).

Введение

Увеличение единичной мощности машин и агрегатов, создание крупных энергетических установок, развитие атомной энергетики ставят перед металлургами задачу повышения качества изделий, что в свою очередь вызывает необходимость разработки эффективных технологий, снижающих физическую, химическую и структурную

турную неоднородность затвердевающих слитков, поскольку служебные характеристики кованых изделий в значительной степени связаны с качеством кузнечного слитка.

Для повышения служебных свойств стальных изделий применяют различные методы воздействия на жидкий и затвердевающий металл: вибрацию, вращение, продувку газами, электромагнитное перемешивание, модифицирование и т.д. Данные методы, используемые как самостоятельно, так и в сочетании между

собой, дают недостаточный положительный эффект при существенном повышении трудоемкости производства.

Машиностроительные предприятия, располагающие соответствующим парком литейной оснастки, позволяющей получать слитки размером от 1 до 200 т и выше, производят поковки самой широкой номенклатуры, при этом до 80 % из них являются полыми (валы роторов, кольца, толстостенные трубы, обечайки, корпусные детали и др.) [1–5].

Для производства полых поковок применяются как прибыльные слитки нормальной длины, так и удлиненные прибыльные и бесприбыльные слитки. Наиболее перспективными в смысле обеспечения качественных характеристик изделий и экономических показателей производства являются слитки с захоложенной головной частью [6–10]. Вместо «классической» прибыльной надставки используется надставка-холодильник с относительным объемом порядка 4%. Её предназначение в том, чтобы компенсировать усадку затвердевающего металла до тех пор, пока фронты кристаллизации, движущиеся в горизонтальном направлении от боковых стенок изложницы, не сблизятся на достаточную величину, обеспечив тем самым получение в теле слитка узкой усадочной раковины. В то же время у стенки головной части должен затвердеть слой металла достаточной толщины, чтобы его прочности хватило для надежной фиксации слитка захватом манипулятора при ковке.

Металл осевой части тела слитка со следами усадочной раковины удаляется в ходе последующей обработки прошивкой или сверлением заготовки. Слитки с захоложенной головной частью характеризуются повышенной химической однородностью, что обеспечивает стабильность величин механических свойств металла готовых изделий.

Материалы и методы исследования

Для производства полых поковок под руководством профессора Жульева С.И. был разработан слиток с захоложенной головной частью [11], успешно опробованный при получении полых заготовок на ПО «Баррикады» [12, 13].

По результатам проведенных исследований под руководством профессора Жульева С.И. в ОАО «Буммаш» (г. Ижевск) были разработаны и внедрены уширенные книзу слитки с захоложенной головной частью (рис. 1) [14, 15].

Рис. 1. Схема слитков с надставкой-холодильником: а – уширенный кверху слиток [9]; б – уширенный книзу слиток [15]

Объектом исследования являлся слиток с захоложенной головной частью массой 1,53 т стали 38ХНЗМФА, отлитый с использованием прибили-холодильника объемом 10,8%.

После полного затвердевания слиток подвергался смягчающему отжигу для снятия внутренних напряжений и облегчения его последующей резки. После термообработки из слитка механической порезкой вырезали продольные осевые плиты толщиной 25 мм последующей порезкой на шлифы. Плоскость порезки слитков была выбрана перпендикулярно поверхности отвода тепла, с тем чтобы можно было определять структуру в периферийных и срединных слоях металла. Исследование литого металла слитка стали 38ХНЗМФА на макроструктуру проводили путём травления.

Пробы для химического анализа отбирали на шлифах, вырезанных из темплетов с трех горизонтов слитка. Химический анализ образцов проводился спектральным методом ГОСТ 18895-97 на приборе ARC-Met 930.

Особенность кинетики кристаллизации и структурообразования слитков с различным утеплением головной части изучалось с помощью физического моделирования на плоских моделях – изложницах с прозрачными стенками [16, 17]. В качестве модельного расплава использовался натрий серноватистокислый (раствор кристаллического гипосульфита) $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \times 5\text{H}_2\text{O}$. Выбор расплава для холодного моделирования достаточно подробно и обосновано приведен в работе [18].

Математическое моделирование процесса кристаллизации слитка осуществлялось с помощью системы компьютерного моделирования «Crystal» [19], расчеты в котором ведутся методом конечных разностей.

Результаты исследования

Слиток с захоложенной головной частью характеризуется минимальной трудоёмкостью при подготовке к разливке и имеет наименьшую головную обрезь.

Применение этой технологии обеспечивает выравнивание содержания ликвирующих элементов по высоте слитка и улучшает его структурные и качественные характеристики (рис. 2, 3 и таблица).

В слитках с захоложенной верхней частью зона осевой рыхлости в 2 раза меньше в диаметре и короче по высоте по сравнению с обычными слитками. Это объясняется меньшей протяженностью зоны затрудненного питания на заключительном этапе кристаллизации слитка и, следовательно, лучшей её подпиткой жидким расплавом. Вместе с тем при ускоренной кристаллизации ликвационные процессы имеют меньшее развитие, что сокращает температурный интервал затвердевания и, как следствие, величину усадки.

Рис. 2. Структура слитка с захоложенной головной частью [12]: а – макроструктура слитка; б – серный отпечаток; в – структурные зоны слитка: 1 – корковая зона; 2 – зона столбчатых кристаллов; 3 – зона равноосных кристаллов; 4 – конус осаждения; 5 – осевая зона; 6 – усадочная раковина; 7 – головная часть

Усадочная раковина в слитке с захоложенной верхней частью может занимать до 50% от его высоты и 30% от среднего диаметра слитка (см. рис. 3).

Обработка данных, полученных в системе компьютерного моделирования «Crystal» [19], по влиянию конусности (уширенных кверху и уширенных книзу) слитков с захоложенной головной частью показала, что в слитках с обратной ко-

нусностью усадочная раковина менее развита по ширине и имеет большее развитие по высоте. Увеличение массы слитков приводит к большему развитию усадочной раковины в теле уширенных кверху и низу слитках.

Расположение усадочной раковины в слитке с захоложенной верхней частью вдоль его оси при незначительном диаметре обеспечивает ее удаление при изготовлении полой поковки.

Рис. 3. Влияние массы слитка с захоложенной головной частью на развитие усадочной раковины в теле слитка

Химическая неоднородность обычных слитков развита весьма значительно. Это связано не только с образованием областей отрицательной и положительной объёмной ликвации (соответственно в нижней и верхней частях прибыльных слитков), но и с зональной ликвацией, проявляющейся в виде развитых шнуров с повышенным содержанием углерода, серы, фосфора. В слитке с захоложенной головной частью эти элементы распределены более равномерно (рис. 4, см. таблицу).

Химическая неоднородность слитков

Ликвация, %	Слиток массой 1,7 т с утепляющей надставкой [20]	Слиток массой 1,53 т с надставкой-холодильником	Слиток массой 2,07 т с надставкой-холодильником [15]
Положительная:			
углерода	+10,8	+3,0	+2,0
серы	+18,8	+7,1	–
фосфора	+18,0	0	–
Отрицательная:			
углерода	–8,1	–3,0	–3,7
серы	–6,3	–14,3	–
фосфора	–9,1	–11,1	–
Суммарная:			
углерода	18,9	6,0	5,7
серы	25,1	21,4	–
фосфора	27,1	11,1	–

Рис. 4. Химическая неоднородность слитков с заголовной частью:
а–в – распределение углерода, серы и фосфора в слитке массой 1,53 т стали 38ХНЗМФА:
г – распределение углерода в слитке массой 2,07 т стали 5ХНМФ

Результаты физического моделирования слитков с различным объёмом заголовной части приведены на рис. 5.

Рис. 5. Динамика нарастания твёрдой фазы модельных слитков в зависимости от времени затвердевания: а – слиток с утепляемой головной частью;
б – слиток с заголовываемым объёмом (11,6%); в – слиток с заголовываемым объёмом (21,8%)

Физическое моделирование в условиях «захолаживания» головной части позволило выявить особенности затвердевания как всего слитка, так и различных его областей в зависимости от условий теплоотвода. В случае использования утепляющей прибыльной надставки (**рис. 5, а**) рост твёрдой фазы в вертикальном направлении практически имеет прямо пропорциональную зависимость. Это характеризует равномерность процесса затвердевания модельного слитка традиционной формы. При захолаживании расплава объемом 11,6% (**рис. 5, б**) пропорциональный участок вертикальной кристаллизации сохраняется в течение 50 мин (27% от всего времени затвердевания), после чего интенсивность затвердевания возрастает (вертикальный участок кривой), что обусловлено смыканием вертикального фронта кристаллизации. Увеличение захолаживающего объема до 21,8% (**рис. 5, в**) приводит к возрастанию пропорционального участка равномерной кристаллизации до 110 мин. Динамика дальнейшего процесса кристаллизации практически не отличается от предыдущего случая (см. **рис. 5, б**). Изменение объемов захолаживания головной части привело к изменению общего времени вертикального затвердевания для всех типов слитков.

Изменение скорости вертикальной кристаллизации в зависимости от времени затвердевания и условий охлаждения приведено на **рис. 6**. Высокие значения вертикальной скорости в начальные моменты кристаллизации во всех рассматриваемых случаях практически идентичны и обусловлены значительным градиентом температур между расплавом и поддоном. Снижение теплоотвода за счёт нарастания затвердевшего слоя приводит к снижению температурного градиента и, как следствие, резкому снижению скорости кристаллизации (для всех случаев).

Дальнейшее возрастание скорости кристаллизации связано с формированием дендритного каркаса и затвердеванием слитка практически по всему объёму. Однако в случае с утепляющей прибылью этот процесс тормозится относительно медленным затвердеванием осевых и прилегающих к ним объёмов слитка за счёт воздействия прибыли, чем и объясняется небольшой рост, а затем снижение скорости

кристаллизации. В случае применения захолаживающих прибыльных надставок наблюдается более интенсивный рост скорости кристаллизации, однако максимальное значение этой величины характерно для надставки с объёмом 11,6%. При объёме захолаживающей части 21,8% эти значения меньше, что можно объяснить снижением температурного градиента по высоте слитка, несмотря на интенсивные процессы кристаллизации за счёт сращивания зоны равноосных кристаллов.

Учитывая существенное влияние захолаживающей прибыли на формирование осевой зоны, математическим моделированием была получена зависимость, связывающая геометрические параметры слитка (отношение H/D) с относительной глубиной проникновения усадочной раковины в тело слитка L , % [21]:

$$L = -66,358 \cdot (H/D)^3 + 336,57 \cdot (H/D)^2 - 574,697 \cdot (H/D) + 365,696, \quad (1)$$

$$R = 0,999.$$

Анализ полученной модели показывает, что с увеличением H/D от 1,3 до 2,4 относительная протяжённость усадочной раковины в слитках с захолаженной головной частью снижается с 40 до 22%. Использование этих результатов позволяет выбирать оптимальную геометрию слитков данного типа с благоприятным расположением дефектов усадочного происхождения. Для количественной оценки эффективности воздействия прибыли холодильника на вертикальную кристаллизацию был проведён расчёт тепловой работы захолаживающей и утепляющей прибыльной надставки. Результаты расчёта в виде теплового баланса прибыльной надставки для случая захолаживания и утепления приведены на **рис. 7**. Из представленных данных видно, что при использовании захолаживаемой прибыли наблюдается более чем двукратное поглощение тепла расплавленного металла прибылью-холодильником (77,7%) по сравнению со слитком с утепляющей прибыльной надставкой (36,67%), что повышает интенсивность теплоотвода в головной части слитка и обеспечивает ускорение процесса затвердевания металла.

Рис. 6. Изменение скорости вертикальной кристаллизации модельных слитков в процессе затвердевания расплава: 1 – слиток с захлаживаемой прибыльной надставкой объёмом 11,6%; 2 – слиток с захлаживаемой прибыльной надставкой объёмом 21,8%; 3 – слиток с утепляющей прибылью

Слиток стали 38ХНЗМФА массой 1,53 т с прибылью- холодильником

Обычный слиток стали 20 массой 6,61 т

Рис. 7. Баланс тепловой работы захлаживаемой и утепляющей прибыльных надставок:
 Q' – теплота, выделившаяся при охлаждении расплава от температуры разливки до температуры ликвидус; Q'' – теплота, выделившаяся при охлаждении металла от температуры ликвидус до температуры солидус; Q''' – теплота, выделившаяся при охлаждении металла от температуры солидус до средней температуры металла в прибыли на момент окончания процесса; Q'''' – скрытая теплота кристаллизации; Q_1 – количество тепла, расходуемого на нагрев футеровочных материалов и корпуса прибыльной надставки; Q_2 – количество тепла, излучаемого с наружной поверхности прибыльной части изложницы; Q_3 – количество тепла, излучаемого через зеркало металла прибыльной части слитка; Q_4 – количество тепла, переданного телу слитка

Заключение

Таким образом, предлагаемый слиток с заохоложенной головной частью превосходит слиток обычной геометрии по своим качественным и структурным характеристикам.

Подробное исследование литой структуры металла слитка с заохоложенной головной частью показало, что наиболее дефектная зона со значительным преобладанием факторов, способных негативно сказаться на качестве металла слитка, расположена в осевой части слитка. Благоприятное расположение дефектов усадочного происхождения в слитке, приводит к гарантированному удалению в отход при ковке.

Применение «захолаживания» головной части дает двукратное поглощение тепла затвердевающего металла надставкой-холодильником, что приводит к возрастанию скорости затвердевания слитка практически по всему объёму и, как следствие, снижению химической неоднородности металла.

Полученные результаты позволяют проводить целенаправленный выбор соответствующей конфигурации слитка, обеспечивающей изготовление качественной полой поковки с минимальным развитием ликвационной неоднородности и контролируемым расположением усадочных дефектов.

Список литературы

- Zhbankov I.G., Perig A.V. Forging of ingots without hot tops. *Materials and Manufacturing Processes*. 2013, vol. 28, no. 3, pp. 229–235.
- Machovčák P., Tkadlečková M., Opler A., Carbol Z., Trefil A., Michalek K. The development of new type of 90 ton forging ingot. *Conference Proceedings: 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, METAL 2014; Czech Republic; 2014*, pp. 72–80.
- Jiang Z.-H., Liu F.-B., Yu Q., Chen X., Zang X.-M., Deng X. Development of a new technology for manufacture of hollow ingots by electroslog remelting process. *Kang T'ieh/Iron and Steel*, vol. 50, iss. 10, 2015, pp. 30–36.
- Ao G.W., Shen M.G., Zang Z.S., Li B.L. Study on unidirectional solidification ingot with hollow lateral wall insulation. *Metalurgija*, vol. 55, iss. 4, 2016, pp. 597–600.
- Liu M., Ma Q.X. Modeling and numerical simulation research on hollow steel ingot forging process of heavy cylinder forging. *4th International Conference on Manufacturing Science and Engineering, ICMSE 2013; Dalian; China, 2013*, vol. 712–715, pp. 627–632.
- Кулешов Н.И. Разработка системы автоматизированного выбора слитка с учётом его весовых, геометрических и структурных характеристик: дис. ... канд. техн. наук. Днепродзержинск, 1993. 187 с.
- Скобло С.Я., Казачков Е.А. Слитки для крупных поковок. М.: Металлургия, 1973. 248 с.
- Жульев С.И., Зюбан Н.А. Влияние параметров изготовления крупных кузнечных слитков на формирование оптимальной структуры осевой зоны // *Металлург*. 2001. №12. С. 38–39.
- Samoilovich Yu.A., Timoshpol'skii V.I., Trusova I.A. Possibility of forming an ingot with a convex crystallization front. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 2001, no. 1, vol. 74, pp. 134–138.
- Samoilovich Yu. A., Timoshpol'skiy V. I. The analysis of thermo-gravitational convection in the liquid kernel of solidified steel ingots. Part 2. The role of the configuration of a liquid kernel. *Vestsi Natsyanalnai Akademii Navuk Belarusi. Series of physical-engineering sciences*, 2006, no. 1, pp. 5–9.
- Жульев С.И. Оптимизация процессов производства кузнечных слитков для поковок ответственного назначения с использованием САПР-технологий: дис. ... д-ра техн. наук. Волгоград, 1991. 372 с.
- Шамрей В.А. Исследование слитков с заохоложенной верхней частью и их использование для производства полых поковок: дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИЧЕРМЕТ, 2007. 146 с.
- Шамрей В.А., Жульев С.И. Новая форма кузнечного слитка для изготовления полых кованых изделий // *Металлург*. 2007. № 11. С. 54–57.
- Разработка литейной оснастки и технологии отливки кузнечных слитков: отчет о НИР / ООО «МетМаш»; рук. Жульев С.И. Волгоград, 2007. 106 с.
- Колодкин М.В. Оптимизация тепловой работы кузнечных слитков для производства полых изделий с улучшенными технико-экономическими показателями: дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИТМАШ, 2010. 140 с.
- П. м. 135551 Российская Федерация, МПК В22Д7/08. Модель изложницы для исследования процесса кристаллизации слитков / Н.А. Зюбан, Д.В. Руцкий, А.Н. Галкин, С.Б. Гаманюк, Е.А. Косова, А.Я. Пузиков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВолГТУ». № 2013120789/02; заявл. 06.05.2013; опубл. 20.12.2013.
- П. м. 141550 Российская Федерация, МПК В22Д7/08. Модель изложницы для исследования процесса кристаллизации слитков / Н.А. Зюбан, Д.В. Руцкий, А.Н. Галкин, С.Б. Гаманюк, Е.А. Косова, А.Я. Пузиков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВолГТУ». № 2014100754/02; заявл. 09.01.2014; опубл. 10.06.2014.
- Эльдарханов А.С., Ефимов В.А., Нурадинов А.С. Процессы формирования отливок и их моделирование. М.: Машиностроение, 2001. 208 с.
- Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013613206 от 28.03.2013 РФ. Система компьютерного моделирования «Crystal» / В.П. Багмутов, И.Н. Захаров, Н.А. Зюбан, Д.В. Руцкий, С.Б. Гаманюк; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВолГТУ». № 2013611342; заявл. 12.02.2013; опубл. 20.06.2013.
- Руцкий Д.В. Исследование химической неоднородности кузнечных слитков для крупногабаритных заготовок тяжелого машиностроения: дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИТМАШ, 2006. 134 с.
- Влияние захолаживания головной части на условия кристаллизации стального слитка и качество полученных из него поковок / А.Н. Галкин, Н.А. Зюбан, Д.В. Руцкий и др. // *Металлург*. 2013. № 3. С. 54–59.

Материал поступил в редакцию 07.09.16.

THE EFFECT OF INGOT GEOMETRY AND INGOT TOP SOLIDIFICATION CONDITIONS ON SOLIDIFICATION AND THE DEVELOPMENT OF INTERNAL DEFECTS

Sergey B. Gamanyuk – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: tecmat@vstu.ru

Dmitry V. Rutsikii – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: tecmat@vstu.ru

Nikolai A. Zyuban – D.Sc. (Eng.), Professor

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. Phone: +7(8442)24-81-58. E-mail: tecmat@vstu.ru

Mikhail Yu. Chubukov – Postgraduate Student

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: tecmat@vstu.ru

Artem Ja. Puzikov – Postgraduate Student

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. E-mail: tecmat@vstu.ru

Abstract

Relevance and Objectives: Both crop top ingots of normal length and elongated crop top ingots as well as elongated ingots without crop tops are used for the fabrication of hollow forgings. Chilled top ingots provide the best efficiency both in terms of final product quality and performance indicators. **Materials and Methods Applied:** The object of research is a 1.53 ton chilled top ingot of '38XH3MΦA' steel teemed with a 10.8% cooling top extension. 2D ingot models with transparent walls were used for the physical modeling of crystallization and structure formation in the ingot under study. Etching was applied when examining the macrostructure of the cast ingot metal. The process of crystallization was studied with the help of the Crystal simulation software. **Findings:** Based on the physical modeling results obtained for model ingots with cooling top extensions of various volumes, we were able to identify the solidification patterns typical of both the whole ingot and its parts. With the help of mathematical modeling, a relationship was obtained which correlates the ingot geometry (H/D ratio) with the relative depth of the shrinkage cavity. For quantitative assessment of the vertical solidification efficiency supported by the mold cooling top extension, calculations were done to determine the thermal performance of a chilling top extension and a warmth-keeping top extension. It was established that the axial porosity zone in chilled top ingots is twice smaller in diameter and in length compared with that in conventional ingots. While conventional ingots have a significant chemical heterogeneity, in chilled top ingots these elements are more evenly distributed. The location of the shrinkage cavity along the chilled top ingot centerline ensures the cavity can be easily eliminated when the ingot is used for a hollow forging provided the shrinkage cavity is only minor. Chilled top

ingots require only minimum preparation cost and have minimum top scrap. This technology provides a more homogeneous distribution of segregates along the height of the ingot and improved structure and quality.

Keywords: Chilled top ingot, solidification, chemical and structural heterogeneity, shrinkage, segregation, physical and mathematical modeling.

This research was conducted as part of Research Projects No. 16-08-01029 A and No. 15-08-08098 A within the SP-2015 (SP-4573.2015.1) grant competition with support from the Russian Foundation for Basic Research.

References

1. Zhibankov I.G., Perig A.V. Forging of ingots without hot tops // Materials and Manufacturing Processes. 2013, vol. 28, no. 3. pp. 229–235.
2. Machovčák P., Tkadlečková M., Opler A., Carbol Z., Trefil A., Michalek K. The development of new type of 90 ton forging ingot. Conference Proceedings: 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, METAL 2014; Czech Republic; 2014, pp. 72–80.
3. Jiang Z.-H., Liu F.-B., Yu Q., Chen X., Zang X.-M., Deng X. Development of a new technology for manufacture of hollow ingots by electroslag remelting process. Kang T'ieh/Iron and Steel, vol. 50, iss. 10, 2015, pp. 30–36.
4. Ao G.W., Shen M.G., Zang Z.S., Li B.L. Study on unidirectional solidification ingot with hollow lateral wall insulation. Metalurgija, vol. 55, iss. 4, 2016, pp. 597–600.
5. Liu M., Ma Q.X. Modeling and numerical simulation research on hollow steel ingot forging process of heavy cylinder forging. 4th International Conference on Manufacturing Science and Engineering, ICMSE 2013; Dalian: China, 2013, vol. 712–715, pp. 627–632.
6. Kuleshov N.I. *Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo vybora slitka s uchjotom ego vesovyh, geometricheskikh i strukturnykh harakteristik. Diss. cand. tekhn. nauk* [The development of an automatic ingot selection system based on weight, geometry and structure. Ph.D. dissertation]. Dnepropetrovsk, 1993. 187 p. (In Russ.)

7. Skoblo S.Ya., Kazachkov E.A. *Slitki dlja krupnyh pokovok* [Large forging ingots]. Moscow: Metallurgy, 1973, 248 p. (In Russ.)
8. Zhulyev S.I., Zyuban N.A. The effect of large forging ingot production parameters on the optimization of the axial zone structure formation. *Metallurg* [Metallurgist], 2001, no. 12, pp. 38–39. (In Russ.)
9. Samoilovich Yu.A., Timoshpol'skii V.I., Trusova I.A. Possibility of forming an ingot with a convex crystallization front. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 2001, no. 1, vol. 74, pp. 134–138.
10. Samoilovich Yu. A., Timoshpol'skiy V. I. The analysis of thermo-gravitational convection in the liquid kernel of solidified steel ingots. Part 2. The role of the configuration of a liquid kernel. *Vestsi Natsiyanalnai Akademii Navuk Belarusi. Series of physical-engineering sciences*, 2006, no. 1, pp. 5–9.
11. Zhulyev S.I. *Optimizacija processov proizvodstva kuznechnykh slitkov dlja pokovok otvetstvennogo naznachenija s ispol'zovaniem SAPR-tehnologii. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Optimized CAD-based forging ingot production process for heavy-duty forgings. Doctoral dissertation]. Volgograd, 1991. 372 p. (In Russ.)
12. Shamrey V.A. *Issledovanie slitkov s zaholozhennoj verhnjej chast'ju i ih ispol'zovanie dlja proizvodstva polykh pokovok. Diss. cand. tekhn. nauk* [A study of chilled top ingots and hollow forgings produced from chilled top ingots. Ph.D. dissertation]. Moscow: TsNIICHERMET, 2007. 146 p. (In Russ.)
13. Shamrey V.A., Zhulyev S.I. A new shape of forging ingots designed for hollow forged products. *Metallurg* [Metallurgist], 2007, no. 11, pp. 54–57. (In Russ.)
14. MetMash LLC. R&D report: Designing a forging ingot mold and a teeming technology. Led by S.I. Zhulyev. Volgograd, 2007, 106 p. (In Russ.)
15. Kolodkin M.V. *Optimizacija teplovoj raboty kuznechnykh slitkov dlja proizvodstva polykh izdelij s uluchshennymi tekhniko-ekonomicheskimi pokazateljami. Diss. cand. tekhn. nauk* [Optimized thermal performance of forging ingots intended for the manufacture of hollow products with enhanced performance indicators. Ph.D. dissertation]. Moscow: TsNIITMASH, 2010. 140 p. (In Russ.)
16. Zyuban N.A., Rutskii D.V., Galkin A.N., Gamanyuk S.B., Kosova E.A., Puzikov A.Ya. *Model' izlozhnicy dlja issledovaniya processa kristallizacii slitkov* [A model mold to study ingot solidification]. Patent RF, no. 135551, 2013. (In Russ.)
17. Zyuban N.A., Rutskii D.V., Galkin A.N., Gamanyuk S.B., Kosova Ye.A., Puzikov A.Ya. *Model' izlozhnicy dlja issledovaniya processa kristallizacii slitkov* [A model mold to study ingot solidification]. Patent RF, no. 141550, 2014. (In Russ.)
18. Eldarkhanov A.S., Efimov V.A., Nuradinov A.S. *Processy formirovaniya otlivok i ih modelirovanie* [Casting formation processes and their modeling]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2001, 208 p. (In Russ.)
19. Bagmutov V.P., Zakharov I.N., Zyuban N.A., Rutskii D.V., Gamanyuk S.B. *Sistema komp'yuternogo modelirovaniya «Crystal»* [The Crystal computer simulation software]. State registration certificate for a computer application, no. 2013613206, 2013. (In Russ.)
20. Rutskii D.V. *Issledovanie himicheskoy neodnorodnosti kuznechnykh slitkov dlja krupnogabaritnykh zagotovok tjazhelogo mashinostroyeniya. Diss. cand. tekhn. nauk* [Investigation of the chemical heterogeneity of forging ingots intended for heavy engineering applications. Ph.D. dissertation]. Moscow: TsNIITMASH, 2006. 134 p. (In Russ.)
21. Galkin A.N., Zyuban N.A., Rutskii D.V., Gamanyuk S.B., Puzikov A.Ya., Firsenko V.V. The effect of a chilled top on the solidification conditions in steel ingots and the quality of resultant forgings. *Metallurg* [Metallurgist], 2013, no. 3, pp. 54–59. (In Russ.)

Received 07/09/16

Влияние геометрии слитка и условий затвердевания головной части на процессы структурообразования и развитие внутренних дефектов / Гаманюк С.Б., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Чубуков М.Ю., Пузиков А.Я. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 11–19. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-11-19

Gamanyuk S.B., Rutskii D.V., Zyuban N.A., Chubukov M.Yu., Puzikov A.Ja. The effect of ingot geometry and ingot top solidification conditions on solidification and the development of internal defects. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 11–19. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-11-19