

УДК 621.735.35

**Герасименко А. В., Марков О. Е., Хващинский А. С., Житников Р. Ю.,  
Бочковой Д. А.**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ КУЗНЕЧНЫХ ЗАГОТОВОК**

Основным направлением повышения качества крупных поковок является применение высококачественных слитков. Под качеством слитка подразумевается плотность его строения, отсутствие крупнодендритной структуры и исключение попадания усадочной раковины в тело слитка. Существующие кузнечные слитки не гарантируют стабильного качества. Это приводит к отбраковыванию отдельных крупных поковок, которые изготавливаются из этих слитков. Для этого необходимо разрабатывать новые кузнечные слитки и изложницы для их изготовления. Перспективным направлением повышения качества крупных слитков является управление процессом кристаллизации, что и позволит формировать строения слитка.

М. Valcar и др. [1] исследовали влияние формы слитка на процессы застывания 9 т слитка из инструментальной стали, чтобы устранить внутренние разрывы слитка и получить приемлемые уровни структурной и химической гомогенности. Результаты численного моделирования показали, что выливание расплава при постоянной скорости, более низкое отношение  $H/D$ , использование круглого сечения для прибыли и увеличение конусности являются предпочтительными для повышения скорости вертикального застывания и уменьшения скорости поперечного застывания в области прибыли. Однако в работе влияние  $H/D$  на расположение теплового центра кристаллизации не установлено.

В последнее время значительное внимание уделяется слиткам с направленной кристаллизацией [2]. Изменение направления кристаллизации позволяет локализовать усадочную раковину в верхней части слитка и уменьшить ее глубину. Универсальность таких изложниц дает возможность отливать разные по массе слитки в одной изложнице. Постепенная кристаллизация снизу-вверх обеспечивает вытеснение неметаллических включений и газов в верхние слои слитка, где будет размещена усадочная раковина. Это создало предпосылки к появлению укороченных слитков, которые обладают высокой плотностью, меньшей ликвацией и не требуют применения энергоёмкой операции осадки. Установлено, что для устранения осевых дефектов слитков необходимо создать условия, при которых скорость кристаллизации в вертикальном направлении преобладала бы над скоростью кристаллизации со стороны стенок изложницы.

С целью увеличить время кристаллизации G. W. Ao и др [3] предлагают в боковой стенке изложницы создать полость. Направленное застывание слитка в изложнице с изолированной полый боковой стенкой было смоделировано с помощью метода конечных элементов в программном обеспечении ProCAST. Использование изолированной полый боковой стенки ограничивает потери тепла через боковую стенку, продлевает все время коагуляции, повышает внутреннее качества слитков во время однонаправленного застывания. Тепловое сопротивление полости очень велико при использовании воздушного зазора. Изоляционный эффект огнеупорного кирпича улучшается и время застывания жидкой стали также значительно увеличивается. В работе способы интенсификации процесса кристаллизации не предложены.

Высокие требования к качеству слитка вызывают необходимость разработки практических методов застывания для создания технологий более высокого уровня в настоящее время. С этой целью модель неравномерной кристаллизации роста дендритов при получении слитка в изложнице была развита [4]. Данное соотношение описывает зависимость диаметра

зерна от скорости затвердевания. Это позволяет прогнозировать макроструктуру слитка с достаточной точностью на основе вычислительного эксперимента. Однако модель не применима к укороченным слиткам с направленной кристаллизацией.

В работе С. J. Ху и др. [5] электромагнитная прибыльная надставка была предложена для повышения равномерности застывания и улучшения качества слитка в вертикальном направлении, то есть вдоль оси. Генератор электромагнитного поля вводится в прибыль. Он может генерировать временное постоянное электромагнитное поле. Джоулево тепло, которое генерируется индуктивным током в пределах глубины проникновения тока, может сделать температуру стали в прибыли постоянной, увеличить или уменьшить её. После заливки стали, и симметрия и однородность распределения магнитного поля в прибыли изменяются. Индукция магнитного поля у краев выше, чем во внутренней части прибыли. Это полезно для функции сохранения тепла. Исследуемый способ увеличивает затраты на производство слитков. По этой причине способы отливки слитков следует разрабатывать без увеличения затрат на их производство.

Качество слитка значительно влияет на механические свойства поковок и их качество, зависящее от процессов кристаллизации. Механизм и скорость затвердевания слитка важно знать в этой связи [6]. Поэтому исследование процессов кристаллизации слитков в изложницах, процесс формирования качества кузнечных заготовок является актуальной проблемой.

При разработке нового 2.8 тонного слитка, результаты численного моделирования показали, что изменение параметров изложницы, такие как высота слитка, конусность формы, коэффициент  $H/D$ , радиус вогнутости формы, радиус скругления внутренних углов слитка могут улучшить внутреннее качество слитка [7]. Однако в работе оптимальные параметры кузнечных слитков не установлены для повышения их качества.

На основе литературного обзора было установлено, что для повышения качества кузнечных слитков необходимо менять форму слитка, что также приведет к изменению, условий кристаллизации металла. Чтобы исключить образование внутренних осевых дефектов слитка необходимо повысить скорость затвердевания слитка в вертикальном направлении и снизить фронт кристаллизации со стороны стенок изложницы. В связи с этим, проектирование новых форм кузнечных слитков является важным направлением повышения качества крупных кузнечных слитков. Разработка новых конфигураций слитков сводится к применению слитков с относительной высотой  $H/D < 1,0$ , а также утепления верхней части слитка и охлаждении поддона. Это позволит изменить условия кристаллизации.

Проводить исследования кристаллизации крупных кузнечных слитков целесообразнее на уменьшенных моделях. Для получения предварительных результатов строения слитков новой конфигурации достаточно проведения исследований на прозрачных моделях. Поэтому на первом этапе для экспериментального моделирования процесса кристаллизации на прозрачных моделях использовался тиосульфат натрия ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ). Низкая температура плавления этого материала ( $85^\circ\text{C}$ ) позволяет проводить эксперимент в лабораторных условиях с расплавлением вещества на водяной бане. Это вещество удовлетворяет условиям кристаллизации и линейного расширения как модель расплава стали.

Специальная универсальная установка (рис. 1), которая содержит утепленную прибыльную надставку 1 и крышку 2 была сконструирована и изготовлена для проведения эксперимента. Боковая поверхность 3 выполнена из теплоизоляционного материала для исключения появления горизонтального фронта кристаллизации. Поддон изложницы 4 выполнен из медной трубки, в которой вода циркулирует по гибким шлангам охлаждения 5. Отверстия 6 предусмотрены для варьирования конусности слитков в боковой поверхности изложницы. Они служат для крепления верхних прозрачных стенок 7 из оргстекла. Внешняя поверхность прибыльной части выполнена конусной с углом наклона  $5^\circ$ . Это позволяет опускать её и варьировать высоту тела слитка. Макроструктура, форма и размеры усадочной раковины фиксировались поэтапно через каждые 15 мин после заполнения изложницы жидким расплавом в ходе эксперимента.

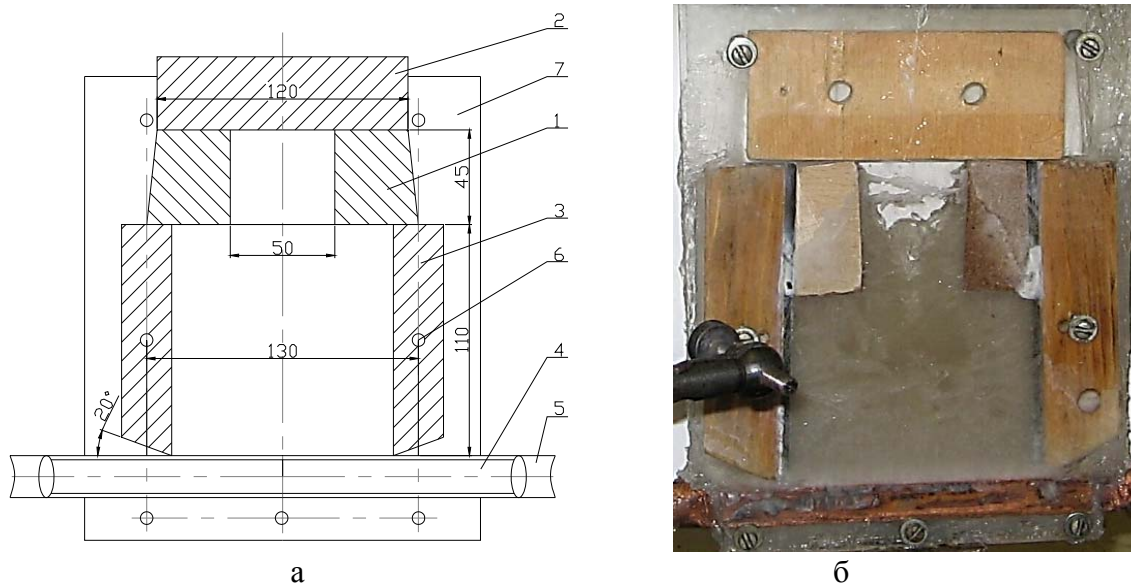


Рис. 1. Эскиз (а) и экспериментальная установка (б) изложницы для получения прозрачных моделей укороченного слитка с направленной кристаллизацией

Базовые показатели качества кузнечных заготовок подразумевают форму и размеры усадочной раковины, макростроение. Геометрию кузнечной заготовки, исключая попадание усадочной раковины в тело слитка и обеспечивающую получение плотной однородной структуры, необходимо определить на первом этапе.

Согласно методике проведения эксперимента, слитки исследовались при условии их направленной кристаллизации в изложнице. Соотношение высоты к среднему диаметру  $H/D = 1,1$  и конусность  $\gamma = 0^\circ; +5^\circ; -5^\circ$  ( $0^\circ$  – цилиндрический слиток;  $+5^\circ$  – обычная конусность  $5^\circ$ ;  $-5^\circ$  – обратная конусность  $5^\circ$ ) исследовались на специально изготовленной установке (см. рис. 1). В ходе эксперимента фиксировались размеры усадочной раковины (диаметр и глубина усадочной раковины), направление роста кристаллов и макроструктура слитка.

Анализ полученных результатов (рис. 2) позволил установить, что минимальная глубина усадочной раковины соответствует слитку с обратной конусностью ( $-5^\circ$ ). Применение слитков обычной конусности с углом  $5^\circ$  приводит к увеличению глубины усадочной раковины. Полученные результаты объясняются снижением интенсивности отвода тепла при направленной кристаллизации при диаметре слитка в донной части меньше, чем в верхней. Это позволяет сделать вывод, что для обеспечения направленной кристаллизации снизу-вверх необходимо применить слитки, уширенные в нижней части.

Рост дендритных зерен от стенок изложницы к оси характерен для слитков с соотношением высоты к среднему диаметру  $H/D = 1,1$  и конусностью  $\gamma = +5^\circ$  (рис. 3, а). Рост кристаллов на начальной стадии происходил снизу-вверх более интенсивно, чем от периферии к центру, образуя плотный слой мелкозернистых кристаллов. Затем начинался рост дендритов от стенок и снизу. Появлению усадочных дефектов в теле слитка способствует процесс транскристаллизации. Структура слитка не отличается от традиционной схемы кристаллизации «классического» кузнечного слитка при таком соотношении.

Усадочная раковина, локализованная в верхней прибыльной части, имеет значительную глубину проникновения с образованием в прибыльной части «моста» (закристаллизовавшейся перегородки в верхней части). Этот мост скрывает реальную форму и уменьшает размеры усадочной раковины.

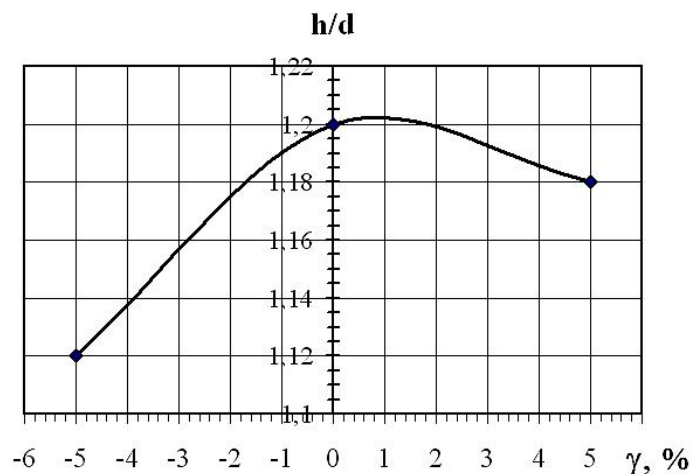


Рис. 2. Залежність відносної глибини усадочної раковини від конусності слитка  $\gamma$  для  $H/D = 1.1$

Кристалли, в цьому випадку, починають рости знизу-вверх при умови відводу тепла кристалізації на поддон. Однак швидкість вертикального фронту кристалізації стає рівною горизонтальній при товщині нижнього шару кристаллів рівною приблизно 35...45 % висоти тіла слитка. Це пояснюється зменшенням впливу охолоджуючого поддона на процес направленої кристалізації для високих слитків. Шар кристаллів, утворений з боку поддона, зменшує теплоотдачу від расплава к поддону.

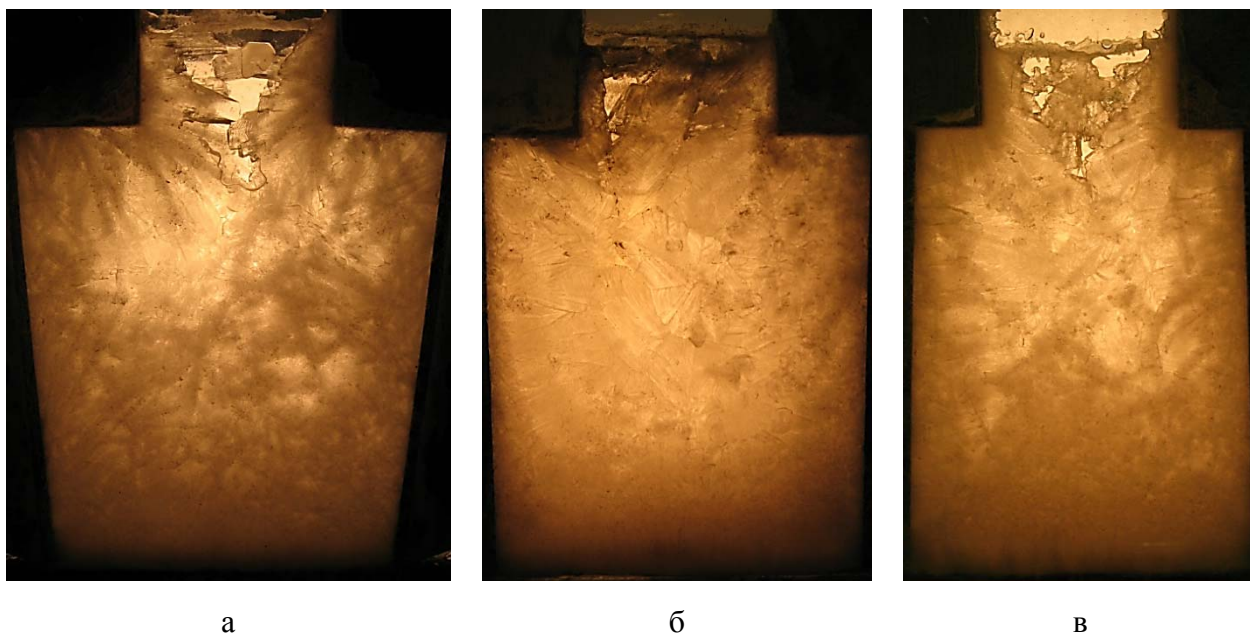


Рис. 3. Макроструктура слитків ( $H/D = 1,1$ ):  
 $\gamma = +5^\circ$  (а),  $\gamma = 0^\circ$  (б),  $\gamma = -5^\circ$  (в)

Світлі частини в підприбыльній і осевій зоні слитка свідчать про меншу щільність металу і хімічної ліквідації в цій області. Кристалізація металу проходить на 10 % швидше при зміні конусності до  $\gamma = 0^\circ$  (циліндричний слиток). Усадочна раковина має менший об'єм за рахунок часткового зменшення рівня расплава при кристалізації (см. рис. 3, б) і розподілу усадки в підприбыльній частині слитка з утворенням нелокалізованої усадочної раковини.

Плотность строения слитка выше, чем в предыдущем случае с обычной конусностью. Слиток имеет чётко выраженный плотный слой мелких кристаллов. Явно выраженный рост дендритов к центру слитка, как в предыдущем способе, отсутствует.

Обратная конусность ( $\gamma = -5^\circ$ ) характеризуется преимущественным направлением роста кристаллов снизу-вверх (см. рис. 3, в), но рост дендритных кристаллов в поперечном направлении способствует образованию зоны столбчатых кристаллов. Отвод тепла со стороны поддона обеспечивает направленную кристаллизацию в виде конуса с вершиной, достигающей середины тела слитка. Усадочная раковина имеет классическую форму, и вершина её проникает в тело слитка. Данные параметры слитка обеспечивают низкую плотность кристаллов центральной зоны слитка.

Анализ строения укороченных слитков с направленной кристаллизацией позволяет сделать вывод, что слиток с обратной конусностью  $\gamma < 0^\circ$  наиболее полно отвечает требованиям плотного строения и структурной однородности.

### ВЫВОДЫ

Слитки с соотношением высоты к среднему диаметру  $H/D = 1,1$  и конусностью  $\gamma = +5^\circ$  характеризуются ростом дендритных зерен от стенок изложницы к оси. При изменении конусности до  $\gamma = 0^\circ$  (цилиндрический слиток) кристаллизация металла проходит на 10 % быстрее. Преимущественное направление роста кристаллов снизу вверх характерно для обратной конусности ( $\gamma = -5^\circ$ ), но рост дендритных кристаллов в поперечном направлении способствует образованию зоны столбчатых кристаллов. Наиболее полно требованиям плотного строения и структурной однородности отвечает слиток с обратной конусностью  $\gamma < 0^\circ$ .

Максимальная высота фронта кристаллизации от поддона составляет 65...75 % высоты тела слитка при различных значениях величины обратной конусности для слитков с  $H/D = 1,1$ . Поэтому для повышения плотности строения необходимо исследовать слитки с меньшим соотношением высоты к среднему диаметру на 25...35 %.

Установлено, что для слитка с отношением  $H/D = 1,1$  большая часть объема тела слитка (60...70 %) имеет плотную, однородную, мелкозернистую структуру. Мелкое зерно, обеспечивающее плотную структуру, образуется в нижней части и в углах со стороны поддона. Это вызвано быстрым переохлаждением расплава и интенсивным отводом тепла на поддон и боковую холодную стенку изложницы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balcar M, Zelezny R, Sochor L, Fila P, Martinek L (2008) The Development of a Chill Mould for Tool Steels Using Numerical Modeling. *Journal of Materials and Technology* 42(4): 183-188.
2. Zhbankov IG, Markov OE, Perig AV (2014) Rational Parameters of Profiled Workpieces for an Upsetting Process. *Int J Adv Manuf Technol* 72:865-872. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5727-5>
3. Ao G W, Shen M G, Zang ZS, Li BL (2016) Study on unidirectional solidification ingot with hollow lateral wall insulation. *Metalurgija* 55 (4): 597-600
4. Markov OE (2012) Forging of Large Pieces by Tapered Faces. *Steel in Translation* 42 (12): 808 – 810. <https://doi.org/10.3103/S0967091212120054>
5. Xu CJ, Zeng YX, Wang ZL, Li J, Li SL, Zhang XJ (2016) Magnetic field distribution in the electromagnetic feeding riser of rectangle steel ingot. *Metalurgija* 55 (4): 593-596.
6. Markov OE, Perig AV, Markova MA, Zlygoriev VN (2016) Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation. *Int J Adv Manuf Technol* 83(9-12): 2159-2174. <http://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>
7. Heidarzadeh M, Keshmiri H (2013) Influence of Mould and Insulation Design on Soundness of Tool Steel Ingot by Numerical Simulation. *Journal Of Iron And Steel Research International* 20(7): 78-83. [http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60130-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60130-2)