

УДК 621.74

**Марков О. Е., Герасименко А. В., Косилов М. С., Шевцов С. А.****РАЗРАБОТКА НОВЫХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ПОКОВОК  
ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Внеосевая неоднородность («усы») является существенным дефектом стального слитка. Процесс образования зональной неоднородности в слитках представляет собой результат кристаллизации и диффузионного перераспределения примесей, обладающих различной растворимостью в жидком и твердом металле. Зональная неоднородность слитков связана с дендритной неоднородностью и является дальнейшим ее развитием [1]. Усадочные дефекты, возникающие в центральной части слитков, серьезно влияют на качество продукции, особенно если они не могут быть устранены путем ковки [2].

Разработка ресурсосберегающего технологического процессаковки крупных поковок из слитков не может ограничиваться только оптимизацией переходов (операций)ковки. Повышение качества поковок определяется качеством исходной заготовки – кузнечного слитка. В первую очередь это получение слитков плотного строения с отсутствием осевой пористости как основного сложноустраняемого дефекта кузнечной заготовки. Для этого необходимо управлять процессом формирования структуры слитка и обеспечить определённые условия кристаллизации металла. Основными параметрами в этом случае выступает форма слитка и конструкция изложницы для его получения [3, 4].

Zhang P. и др [5] исследовали влияние оптимизации параметров литья, включая температуру литья, скорость заливки и поверхность передачи тепла для уменьшения усадочной раковины и микропористости. M Heidarzadeh и H Keshmiri для улучшения качества и внутренней структуры мелких слитков из инструментальной стали предложили изменить некоторые параметры конструкции слитка. К ним относятся конусность, соотношение  $H/D$ , радиус вогнутости граней, соотношение диаметра подачи к верхнему диаметру слитка. Так же были исследованы влияние изоляции между кокилем и подающим кольцом, изоляция наружной поверхности подающего кольца, изолирование наружной поверхности одной трети верхней части кокиля на формирование срединной пористости [6].

Осевая рыхлость и усадочная раковина являются дефектами литья, являющиеся, в основном, результатом изменения плотности в процессе застывания [7]. В свою очередь рыхлость делится на два вида: газовая рыхлость и усадочная рыхлость. Первая, из которых отвечает за развитие больших полостей, в то время как вторая приводит к образованию относительно небольших полостей [8, 9].

Одним из решений для повышения качества кузнечных заготовок является создание слитков новой формы, которые обеспечивают требуемые условия кристаллизации металла при его охлаждении в изложнице и сосредоточенную деформацию в осевой зоне для лучшей проработки внутренних дефектов слитка при ковке.

Известны попытки применения слитков с прибыльной частью, уменьшенной до 6...12 % [10], но использование малоотходных традиционных слитков возможно лишь в тех случаях, когда куются полые изделия и остатки усадочной раковины удаляются в процессе прошивки пустотелым прошивнем.

Для получения плоских поковок типа плит предложено использовать плоские (квадратные) слитки с прямоугольным сечением [11]. Диапазон макросегрегации в плоском слитке ниже, чем в случае обычных многоугольных тяжелых кузнечных слитков. В то же время, в центральной оси тела плоского слитка был спрогнозирован большой объем микропористости. Также у плоского слитка имеется риск горячих разрушений и трещин, в основном, в нижней (донной) части слитка и в районе центральной оси слитка вблизи пористости.

Для устранения осевых дефектов, осевой рыхлости и усадочной раковины, имеется несколько путей решения. Один – изменить конструкцию изложницы с целью управления отводом тепла и таким образом управлять процессом кристаллизации [12]. В последние годы в зарубежной практике широко применяется и совершенствуется процесс получения слитков электрошлаковым переплавом (ЭШП). Эти слитки идут на изготовление деталей ответственного назначения для тепловых и атомных электростанций из специальных сталей (валы генераторов и турбин). Масса слитков ЭШП достигает 165 т при диаметре 2,3 м и длине 5,0 м. Направленная кристаллизация обеспечивается за счёт применения водоохлаждаемых медных кристаллизаторов [13]. Второй – изменить форму слитка, выведя осевые дефекты в прибыльную часть с последующим их удалением в процессековки.

Последние зарубежные исследования показали, что с увеличением массы слитка необходимо применять малые соотношения  $H/D$ . Так, компания Sheffield Forgemasters International Ltd (SFIL) в 2008 году освоила производство слитков массой 300 т (диаметр слитка 3,3 м) с соотношением  $H/D \approx 1,2$  [14]. Этот слиток служит заготовкой для изготовления прокатных валков с шириной бочки 4,5 м.

Подобная тенденция наблюдается у японских производителей (Japan Steel Works) особо крупных поковок для деталей атомного реактора из слитков массой 600 т [15]. Полученные результаты свидетельствуют о высокой равномерности распределения углерода (от 0,17 в нижней части до 0,19 в верхней) и направленной кристаллизации снизу вверх, что не соблюдается для слитков с соотношением  $H/D > 1,5$ .

Черногорова и Вабищевич [15] исследовали процесс затвердевания сплава в цилиндрической металлической изложнице. В работе [16] исследуется влияние параметров изложницы на образование трещин в области прибыли во время ковочного процесса. Рассматривается влияние таких параметров как отношение  $H/D$ , изменение конусности изложницы, размеры и форма прибыли и её изоляционного материала. Результаты показали, что заливка расплава при постоянной скорости, уменьшенном коэффициенте  $H/D$  и использование надлежащей конструкции для изоляции горячей верхней части, в общем, улучшило бы эффективность прибыли и тем самым, возможно, уменьшило бы восприимчивость трещин при последующей ковке. Было установлено, что более низкий коэффициент  $H/D$  является предпочтительным для повышения вертикального застывания и уменьшения поперечного застывания в верхней области. Это привело к повышению эффективности прибыли. Высота и форма изоляционного материала в верхней части влияют на поведение застывания. Круглое поперечное сечение для верхней части является предпочтительным.

С помощью анализа методом конечных элементов в программном обеспечении ProCAST было смоделировано направленное застывание слитка с изолированной полый боковой стенкой. Полость боковой стенки значительно улучшает теплоизоляционный эффект, замедляет передачу тепла боковой стенкой и уменьшает боковое тепло слитка. Результаты моделирования показали рациональную конструкцию однонаправленного застывания с изолированной полый боковой стенкой. Использование изолированной полый боковой стенки во время однонаправленного застывания может ограничить потери тепла боковой стенкой, продлить все время коагуляции, повысить внутреннее качества слитков. При использовании воздушного зазора во время однонаправленного застывания с полыми боковыми стенками, тепловое сопротивление зазора очень велико, изоляционный эффект огнеупорного кирпича, очевидно, улучшается, значительно расширяется полное время застывания жидкой стали [17].

Цель данного исследования – определение основных параметров процесса направленной кристаллизации и строения кузнечных слитков с соотношением  $H/D = 0,75$ .

Для проведения эксперимента была сконструирована и изготовлена специальная универсальная установка (рис. 1), которая содержит утепленную прибыльную надставку 1 и крышку 2. Боковая поверхность 3 выполнена из теплоизоляционного материала для исключения горизонтального фронта кристаллизации. Поддон изложницы 4 выполнен из медной

трубки, по которой циркулирует вода по гибким шлангам охлаждения 5. Для варьирования конусности слитков в боковой поверхности изложницы предусмотрены отверстия 6, которые служат для крепления верхних прозрачных стенок 7 из оргстекла. Для изменения высоты слитка внешняя поверхность прибыльной части выполнена конусной с углом наклона  $5^\circ$ , что позволяет опускать её и варьировать высоту тела слитка. В ходе эксперимента фиксировались поэтапно через каждые 15 мин макроструктура, форма и размеры усадочной раковины после заполнения изложницы жидким расплавом.

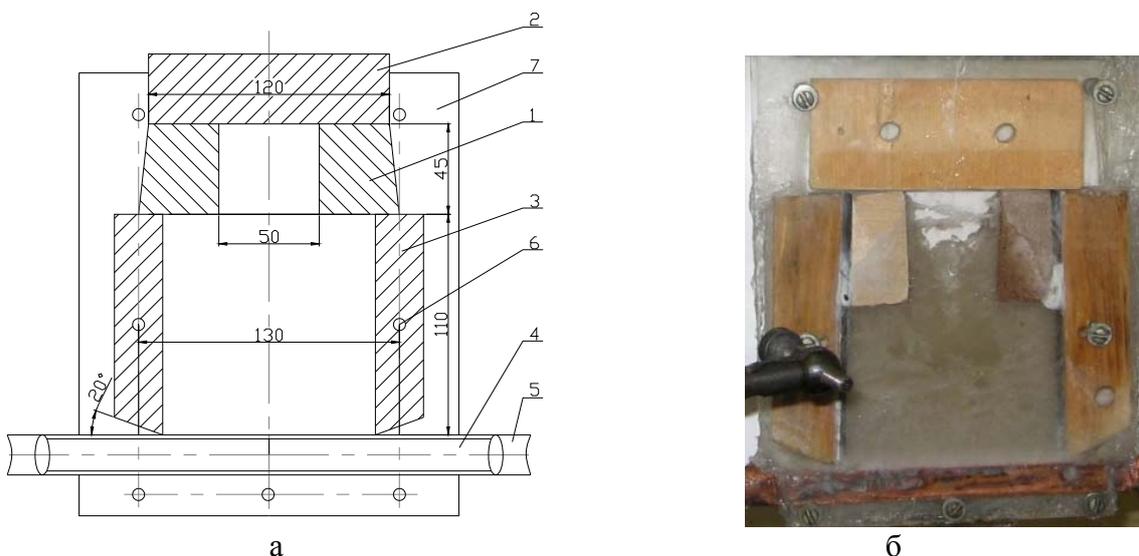


Рис. 1. Эскиз (а) и экспериментальная установка (б) изложницы

Для 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 ( $85^\circ\text{C}$ ) которого позволяет проводить эксперимент в лабораторных условиях с расплавлением вещества на водяной бане. Это вещество удовлетворяет условиям кристаллизации и линейного расширения как модель расплава стали.

Дополнительно проводились экспериментальные исследования на металлическом расплаве. Материалами для проведения экспериментов были выбраны алюминий марки А1. Для выплавки была использована электрическая индукционная печь. Полученные слитки после кристаллизации разрезались. Разрезка слитков вдоль оси по меридиональному сечению с отступом от оси 5 мм производилась механической пилой с охлаждением водой при малых скоростях резки, что позволяет исключить разогрев заготовки и изменение структуры и механических свойств слитка в плоскости реза. В качестве опоки был применен полый металлический цилиндр диаметром 180 мм, высотой 200 мм и толщиной стенки 5,0 мм. Теплоизоляцию боковой стенки изложницы обеспечивал песчано-глинистый формовочный материал с добавлением силикатного клея.

Тепло кристаллизации расплава отбирал поддон-кристаллизатор (массивная стальная плита), что обеспечивало вертикальное направление кристаллизации слитка (рис. 2). Разливка расплава производилась из одной плавки в заливочное отверстие 1 (рис. 2). Отливка слитка осуществлялась по специально изготовленной конической модели с отношением  $H/D = 0,7$ , эскизы которых приведены на рис. 3.

По макрошлифу изучались: размер зерна (форма и расположение в литом металле), макропустоты, трещины и усадочная раковина. Для травления шлифа применялся раствор (40 мл  $\text{ICl}$  и 40 мл  $\text{HNO}_3$ ). Производился подсчет количества зерен на квадратном миллиметре и приближенный их диаметр в три раза в каждой области. Балл зерна согласован со стандартной величиной зерна по ГОСТ 5639–76.

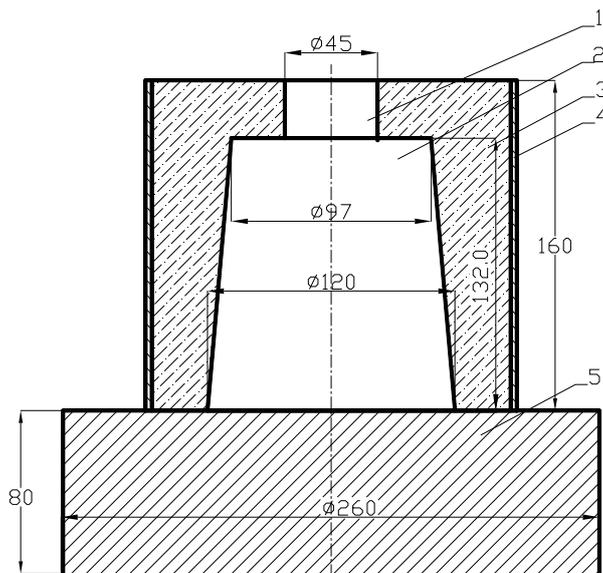


Рис. 2. Схема экспериментальной изложницы:

1 – отверстие для заливки; 2 – полость от модели; 3 – форма; 4 – опока; 5 – массивная плита

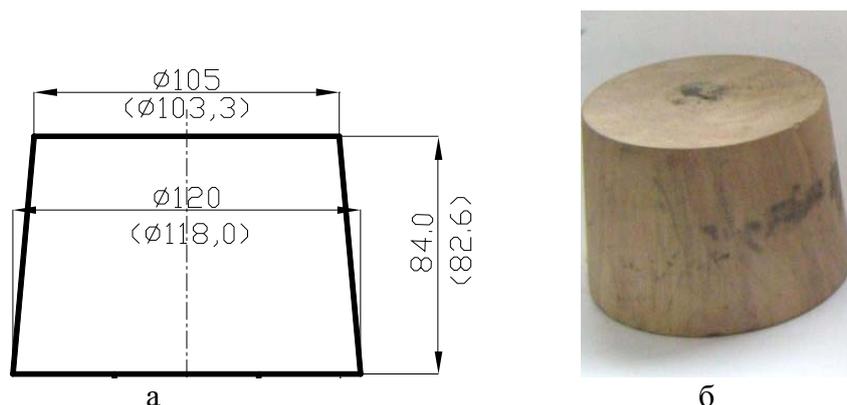


Рис. 3. Эскизы (а) и деревянные модели (б) укороченных слитков

Для слитков с соотношением  $H/D = 0,7$  и конусностью  $\gamma = +5^\circ$  характерна более однородная структура с явно выраженной усадочной раковинной, которая локализована в прибыльной части слитка, но также можно отметить рост дендритных кристаллов от периферии к центру (см. рис. 4, а). Для этих параметров характерна направленная кристаллизация снизу вверх, плотный слой мелкозернистых кристаллов образуется примерно на 55 % высоты тела слитка. Такой процесс кристаллизации продолжается на протяжении половины всего времени затвердевания, после чего кристаллы быстрее растут в перпендикулярном направлении и имеют форму больших дендритов.

Для цилиндрического слитка ( $\gamma = 0^\circ$ ) характерна большая высота плотной и однородной структуры в нижней части слитка, усадочная раковина локализована в прибыльной части слитка (см. рис. 4, б), однако кристаллизация сопровождалась возникновением «моста» в прибыльной части слитка, что привело к образованию скрытой усадочной раковины. Усадочная раковина не проникает в тело слитка. Ослабленной по плотности материала остаётся центральная подприбыльная часть слитка.

Подобные результаты получаются при кристаллизации слитка с таким же соотношением  $H/D$ , но обратной конусностью  $\gamma = -5^\circ$  (см. рис. 4, в). Отличие заключается в образовании дисперсной и равномерной структуры. При такой геометрии слитка

кристаллы с равной скоростью начинают расти как снизу, так и от периферии в виде транс-кристаллов. Усадочная раковина формируется сразу после разливки расплава в форме полусферы с образованием тонких несплошных «мостов». Мелкокристаллическое плотное строение составляет 60...70 % объёма слитка.

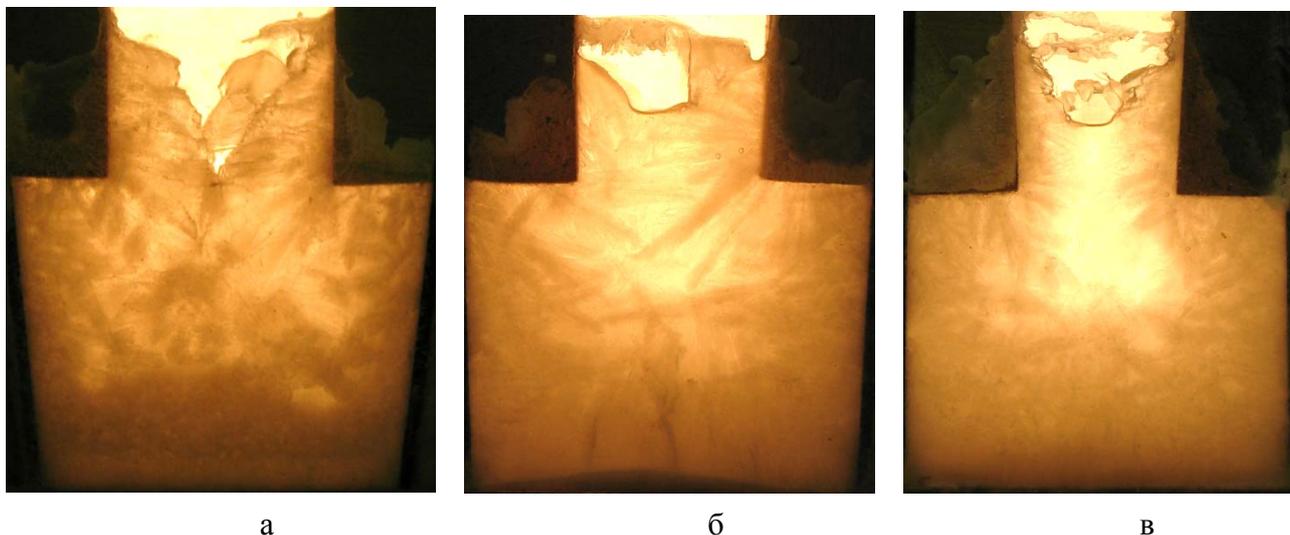


Рис. 4. Макроструктура слитков  $H/D = 0,7$ :  
 а –  $\gamma = + 5^\circ$ ; б –  $\gamma = 0^\circ$ ; в –  $\gamma = - 5^\circ$

При увеличении конусности тела слитка для заготовок с  $H/D = 0,75$  относительная глубина усадочной раковины практически не изменяется.

Уменьшение высоты слитка на 25 % ( $H/D = 0,75$ ) способствует повышению плотности внутреннего строения слитков с обратной конусностью и направленной кристаллизацией (рис. 5, а–в). Для этого случая характерна более однородная структура по размеру кристаллов, что, соответственно, повысит равномерность механических свойств исходной кузнечной заготовки и уменьшит анизотропию. Это, в свою очередь, позволит уменьшить степени деформации при ковке (уков). Усадочная раковина располагается примерно на границе перехода прибыльной части слитка в тело слитка. Это позволит удалить усадочную раковину при ковке.

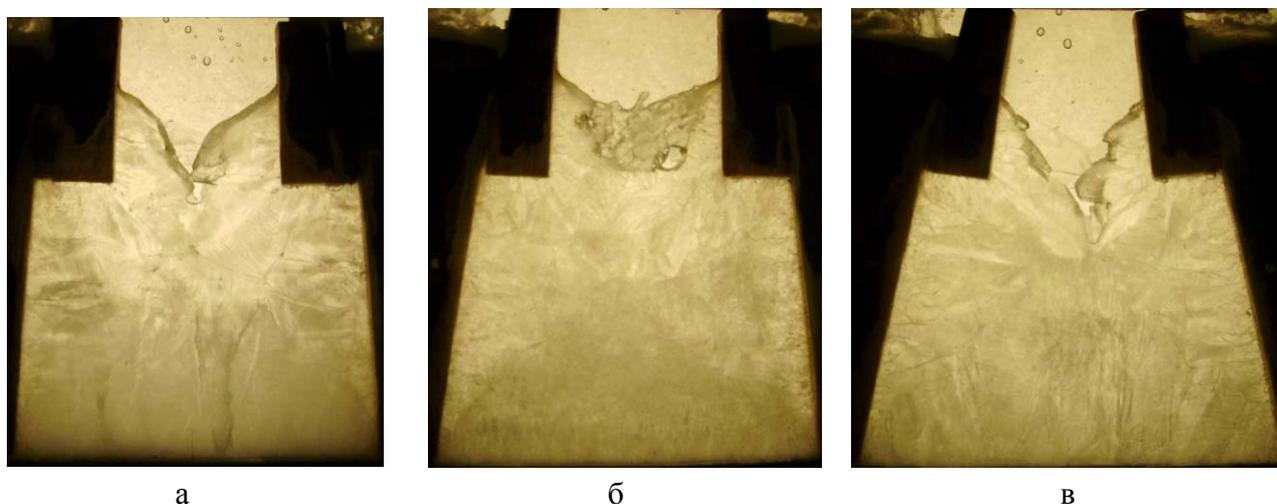


Рис. 5. Макроструктура слитков  $H/D = 0,75$ :  
 а –  $\gamma = 7 \%$ , б –  $\gamma = 14 \%$ , в –  $\gamma = 21 \%$

Высокая структурная однородность и минимальная глубина залегания усадочной раковины характерна для слитка с конусностью 14 % (рис. 5, б). Для этого варианта сложно визуально выделить зоны структурной неоднородности, однако менее плотной остаётся подприбыльная зона.

Было установлено, что для слитков с направленной кристаллизацией и обратной конусностью минимальную глубину усадочной раковины обеспечивает слиток с отношением  $H/D = 0,75 \dots 0,9$  (рис. 6). Слиток с относительной высотой  $H/D = 0,7$  и конусностью 7 % на каждую сторону (рис. 7, а) имеет усадочную раковину в форме конуса со сферическим дном, совпадающим по направлению с конусностью слитка. Форма усадочной раковины определяется интенсивностью охлаждения расплава от поддона-кристаллизатора. С увеличением высоты тела слитка теплоотвод в сторону поддона уменьшается, и это приводит к увеличению глубины усадочной раковины.

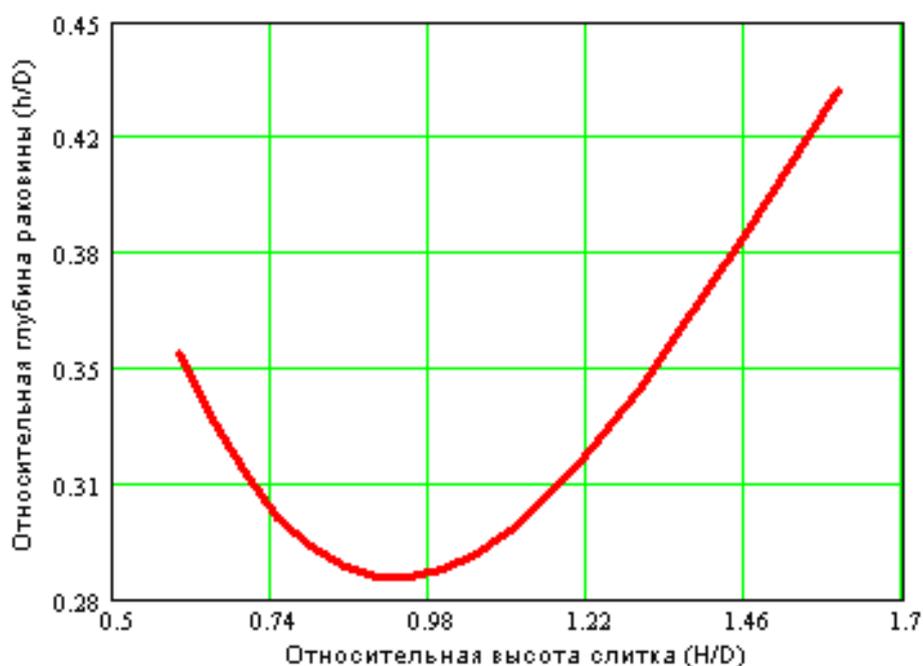


Рис. 6. Относительная глубина усадочной раковины в зависимости от  $H/D$

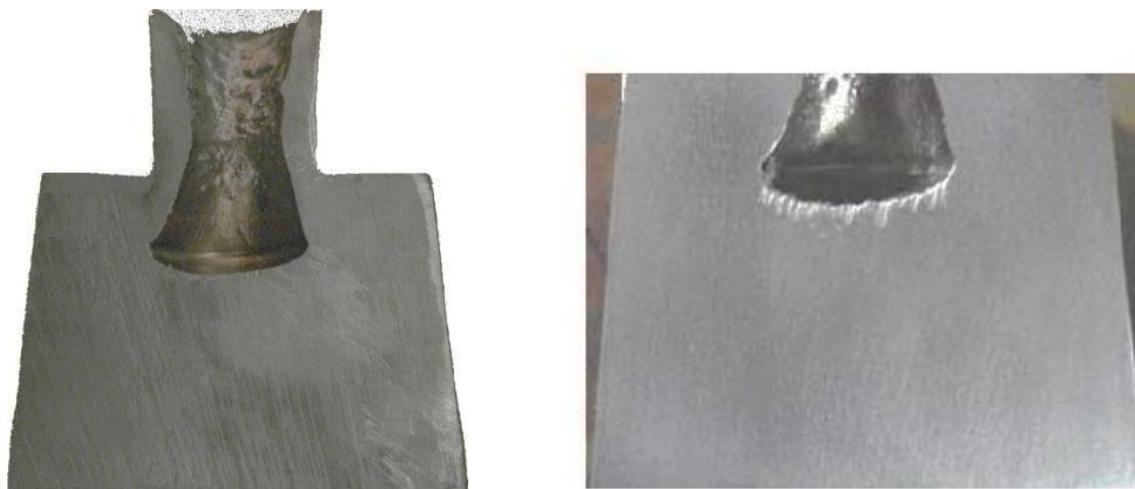


Рис. 7. Продольные разрезы слитков с  $H/D: 0,7$

## ВЫВОДЫ

Уменьшение высоты слитка до  $H/D = 0,70 \dots 0,75$  способствует повышению плотности и равномерности его внутреннего строения, а также позволяет исключить появление горизонтального фронта кристаллизации и, как следствие, образование осевой рыхлости. Полученная макроструктура мелкокристаллическая, направленная, однородная, имеет для различной конусности одинаковое строение, что позволяет сделать вывод о несущественном влиянии величины конусности на внутреннее строение и качество укороченных слитков. Усадочная раковина неглубокая, что позволяет уменьшить объём прибыльной части. Кроме того, для коротких слитков характерно отсутствие осевой рыхлости за счет преимущественно вертикального фронта кристаллизации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филимонов А. В. Оптимальный режим выведения усадочной раковины при отливке слитков в изложницу / А. В. Филимонов, О. Х. Фаткуллин // *Технол. легк. сплавов*. – 2006. – № 4. – С. 123–125.
2. Formation mechanism of shrinkage and large inclusions of a 70 t 12Cr2Mo1 heavy steel ingot / H. Liu, P. Fu, X. Kang, X. Ma // *Research & Development*. – 2014. – №1. – P. 46–51.
3. Пат. 61771 Україна, МПК (2006.01) В 22 D 7/06. Виливниця для відливання коротких ковальських злитків / Марков О. Є, Алієв І. С., Олешко М. В. ; заявник і власник ДДМА. – № u201100943 ; заявл. 28.01.11 ; опубл. 25.07.11, Бюл. № 14. – 3 с. : іл.
4. Пат. 21205 Україна, МПК (2007.01) В 22 D 7/06. Виливниця для відливання зливків / Марков О. Є. ; заявник і власник ДДМА, Краматорськ. – № u200605198 ; заявл. 12.05.06. ; опубл. 15.03.07, Бюл. № 3. – 2 с. : іл.
5. Optimizing casting parameters of steel ingot based on orthogonal method / Z. Pei, L. Xue-tong, Z. Xin-liang, D. Feng-shan // *Journal of Central South University of Technology*. – 2008. – № 15. – P. 296–300.
6. Heidarzadeh M. Influence of mould and insulation design on soundness of tool steel ingot by numerical simulation / M. Heidarzadeh, H. Keshmiri // *Journal of iron and steel research, international*. – 2013. – № 7. – P. 78–83.
7. Wu M. A four-phase model for the macrosegregation and shrinkage cavity during solidification of steel ingot / M. Wu, A. Ludwig, A. Kharicha // *Applied Mathematical Modelling*. – 2017. – №1. – P. 102–120.
8. Current problems in plasma spray processing / [C. C. Berndt, W. Brindley, A. N. Goland et al]. – New York : Springer, 1992. – 341 p. – (*Journal of Thermal Spray Technology*). – (ISSN: 1059-9630 ; кн. 1).
9. Ковка слитков на прессах / Соколов Л. Н. [и др.] ; под ред. Л. Н. Соколова. – К. : Техника, 1984. – 127 с. : ил.
10. Prediction of qualitative parameters of slab steel ingot using numerical modelling / [M. Tkadlečková, K. Michalek, K. Gryc et al]. // *Metallurgija*. – 2016. – № 3. – P. 395–398.
11. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr2Ni4MoV forging ingot / [J. Wang, P. Fu, H. Liu et al]. // *Materials and Design*. – 2012. – № 3. – P. 446–456.
12. Chumanov V. I. Increasing the efficiency of the electroslag process and improving the metal quality by rotating a consumable electrode. Part 1 / V. I. Chumanov, I. V. Chumanov // *Russian Metallurgy*. – 2010. – № 6. – P. 499–504.
13. Le lingot de 300 tonnes de Sheffield Forgemasters (US) [Электронный ресурс] : Today in France-Metallurgie // *France-Metallurgie*. – 2010. – Режим доступа: <http://aciens.free.fr/index.php/2010/01/25/le-lingot-de-300-tonnes-de-sheffield-forgemasters-us>.
14. Suzuki K. Manufacturing and material properties of ultralarge size forgings for advanced BWRPV / K. Suzuki, I. Sato, H. Tsukada // *Nuclear Engineering and Design*. – 1994. – № 1. – P. 513–522.
15. Chernogorova T. P. Numerical investigation of solidification processes of cylindrical ingots in a metal mould at variable technological circumstances / T. P. Chernogorova, P. N. Vabishchevich // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1999. – № 17. – P. 3351–3359.
16. Исследование слитка весом 8 т с малым отношением  $= 0,5$  отлитого на массивном поддоне / А. М. Мадянов [и др.] // *Труды ГПИ им. А. А. Жданова*. – 1956. – Т. 11. – Вып. 5. – С. 101–109.
17. Антощенко Ю. М. Ковка поковок из слитков / Ю. М. Антощенко, В. А. Тюрин, В. П. Барсуков. – *Электросталь : ЭПИ МИСиС*, 2006. – 380 с.