

УДК 621.746.393

Алиев И. С.  
Марков О. Е.  
Захарчук С. С.  
Таган Л. В.

## ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ УКОРОЧЕННЫХ КУЗНЕЧНЫХ СЛИТКОВ С НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ

Совершенствование технологииковки крупных поковок из слитков является актуальной задачей в тяжелом и энергетическом машиностроении. Существующие технологические процессыковки нерентабельны из-за высокой себестоимости и неконкурентоспособны из-за низкого качества [1]. Объемы производстватяжёлого машиностроения возрастают. Это касается и увеличения объемов производства крупных поковок из слитков и такая тенденция будет сохранена на ближайшие годы. В качестве заготовок для крупных поковок, изготавливаемых ковкой на гидравлических прессах, используются слитки, для которых свойственны неоднородность структуры, химического состава и механических свойств [2]. Чем больше масса слитка, тем больше его неоднородность. Механические свойства поковок и их качество в значительной степени зависят от качества слитка. В этой связи особенно важно знать механизм кристаллизации слитка. Поэтому исследование процессов кристаллизации слитков в изложницах, как процесс формирования качества кузнечных заготовок, постоянно привлекает к себе внимание исследователей.

С. Я. Скобло и Е. А. Казачков предложили устройство для получения крупных кузнечных слитков [3]. При кристаллизации в такой изложнице интенсифицируется теплоотвод от слитка и сохраняется принцип направленной кристаллизации снизу вверх, обеспечивая высокий выход годного металла. Применение такого устройства позволяет увеличить выход годного металла при ковке до 85–90 % и сократить время охлаждения слитка.

По результатам исследования влияния формы слитка авторами работы [4] установлено, что снижение величины  $H/D$  от 3 до 1 приводит к полному исчезновению внецентренной ликвации (шнуров). В. А. Дурынин и Ю. П. Солнцев установили, что уменьшение величины  $H/D$  от 2 до 1 приводит к снижению протяженности зоны шнуров и увеличению её ширины в 1,5 раза в слитке массой 40 т и в 1,3 раза в слитке массой более 300 т [1].

Похожие результаты представлены в работе П. В. Камнева [5], которые подтверждают тот факт, что уменьшение соотношения  $H/D$  до единицы приводит к отсутствию появления осевой рыхлости. В этом случае скорость кристаллизации в вертикальном направлении преобладает над скоростью со стороны стенок изложницы.

Последние зарубежные исследования также показали, что с увеличением массы слитка необходимо применять малые соотношения  $H/D$  [6]. Одним из способов повышения качества слитков является управление процессом кристаллизации (направленная кристаллизация), что позволяет получать вертикальное направление роста дендритов. В последние годы в зарубежной практике широко применяется и совершенствуется процесс получения слитков электрошлаковым переплавом. Направленная кристаллизация обеспечивается за счёт применения водоохлаждаемых медных кристаллизаторов [7].

В последнее время большое внимание стало уделяться слиткам с направленной кристаллизацией, это объясняется тем, что за счет охлаждения поддона изложницы тепловой центр смещается вверх [8], что изменяет направление кристаллизации, что уменьшает глубину осевой рыхлости и усадочной раковины. Постепенная кристаллизация снизу вверх обеспечивает вытеснение неметаллических включений и газов в верхние слои слитка, где будет размещена усадочная раковина. Также созданы предпосылки к появлению укороченных слитков, которые обладают высокой плотностью и меньшей ликвацией, более того данные слитки не требуют применения дополнительной энергоёмкой операции осадки. Однако

исследований укороченных слитков с направленной кристаллизацией, которые бы дали представления о механизме кристаллизации и строении таких слитков, на сегодняшний день очень мало.

Цель работы – определение основных параметров процесса кристаллизации, теплового и фазового состояния укороченных кузнечных слитков с направленной кристаллизацией.

Устранение возникновения осевой рыхлости предлагается за счёт изменения направления кристаллизации металла. Для этого предлагается произвести утепление верхней и боковой поверхности изложницы, а отвод тепла обеспечить в сторону поддона [8].

Моделирование теплового состояния в процессе кристаллизации слитка производилось программой MAGMA Soft (совместно с ПАО «НКМЗ», правообладателем соответствующего лицензионного программного обеспечения) [9]. Объектом исследования является укороченный кузнечный слиток из валковой стали 9ХФ весом 18 тонн, разливаемый сверху. Для исследования была разработана изложница для получения укороченного бесприбыльного кузнечного слитка (рис. 1).

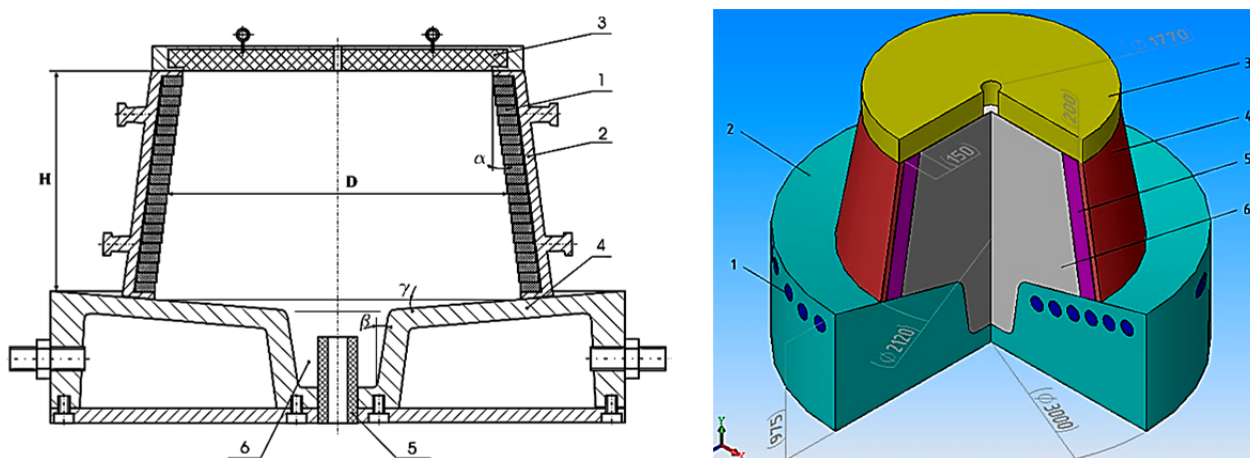


Рис. 1. Изложница для получения бесприбыльных укороченных слитков:

1 – футеровка; 2 – корпус; 3 – крышка; 4 – охлаждаемый поддон; 5 – вставка; 6 – поддон

Особенностью данной конструкции слитка и изложницы является отсутствие прибыльной надставки, что позволит исключить расход металла, связанного с прибыльной частью слитка, и позволит разливать слитки без годного остатка. Эти мероприятия позволят повысить коэффициент выхода годного до 90 % [10]. Для возможности захвата слитка манипулятором предполагается увеличить объём донной части, которая станет цапфой для удержания слитка. Диаметр каналов для охлаждения принимался 120 мм, расход охлаждающей жидкости 20 м<sup>3</sup>/час при температуре 25 °С.

Рассмотрим тепловое состояние металла слитка в момент его полной кристаллизации (рис. 2). Тепловое состояние слитка рис. 2 подтверждает направленный теплоотвод от поддона к теплоизоляционной крышке, так как максимальная температура (тепловой центр кристаллизации) располагается в верхней части слитка, который имеет вид усечённого эллипсоида вращения, что приводит к формированию в этом месте усадочной раковины. Температура донной части составляет  $\approx 750$  °С, а теплового центра кристаллизации – 1377 °С. Глубина усадки металла составляет 100–150 мм (рис. 3), осевая рыхлость отсутствует. Ближе к прибыльной части слитка слои из конусной формы преобразуются в эллипсы из-за увеличения толщины закристаллизовавшегося дна слитка и соответственно уменьшения теплоотвода.

Программа MAGMA позволяет получить дополнительные технологические параметры, такие как: температурный градиент (рис. 4). На основании данных о градиенте температур можно оценить уровень термических напряжений, которые появляются после кристаллизации слитка перед его нагревом.

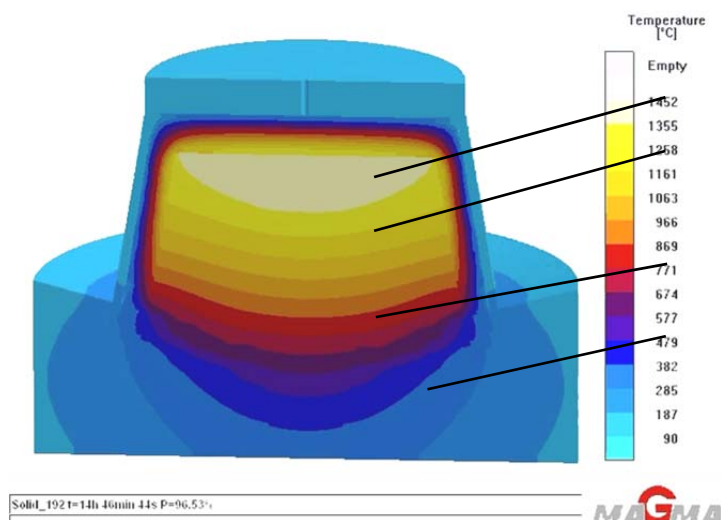


Рис. 2. Температурное поле слитка в момент полной его кристаллизации

Металл донной части слитка наслаивался в виде конусов (рис. 3) вследствие сильного переохлаждения и интенсивного отвода тепла, повторяя геометрию поддона.

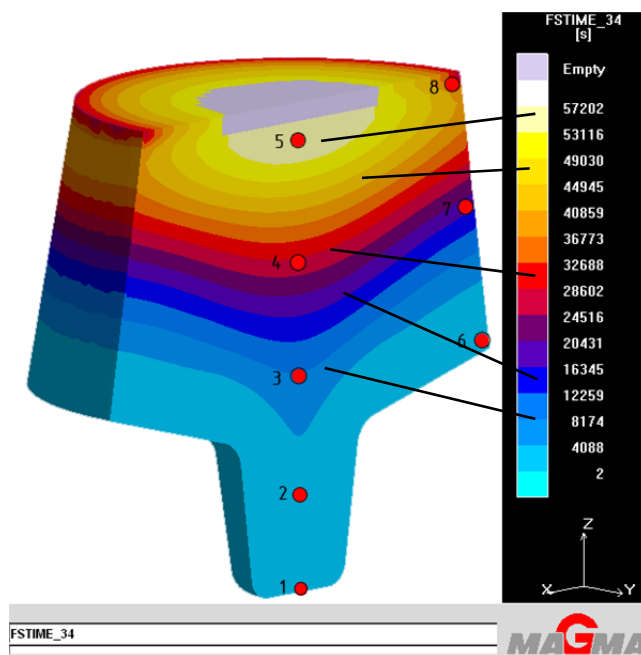


Рис. 3. Время кристаллизации стали с характерными точками для определения температур

Полученные результаты показывают, что максимальный температурный градиент сосредотачивается на контакте металла и охлаждаемого поддона и составляет 2,5–2,8 °C/мм, а основной по сечению слитка – 0,6 °C/мм (рис. 4). Полученные данные подтверждают отсутствие трещинообразования от перепада температур.

Для оценки теплового состояния слитка в динамике необходимо построить зависимости изменения температуры во времени. Для этого необходимо выбрать характерные точки, по изменению температуры которых можно будет судить о тепловом состоянии слитка. Для анализа теплового состояния слитка, получаемого по новой технологии, необходимо точки разместить на оси слитка, так как кристаллизация происходит снизу вверх. Исследуем температуры поверхности слитка в его нижней центральной и верхней части. Расположение точек для контроля температуры представлены на рис. 3.

Наивысшей температурой на протяжении всего времени охлаждения обладает верхняя часть тела слитка, а низшей – его донная часть; температура боковой поверхности тела слитка выше температуры донной части слитка, но ниже центра тела слитка (рис. 5).

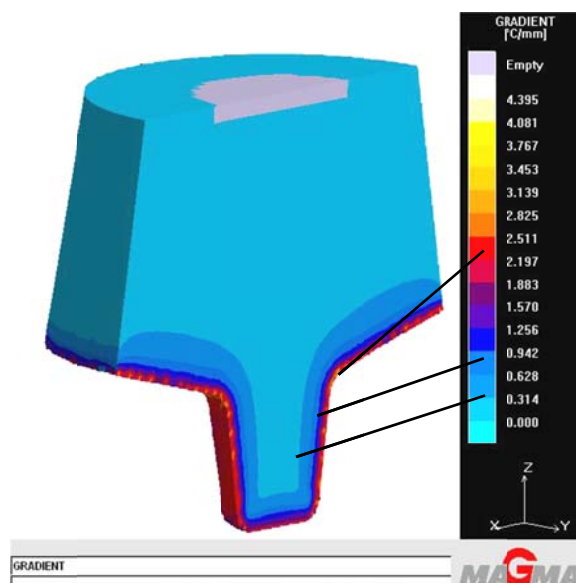


Рис. 4. Температурный градиент в продольном сечении слитка

Температура на оси в нижней части тела слитка с течением времени сначала изменяется скачкообразно, а затем плавно снижается со скоростью  $34\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$ . Скачки температуры в первые 2 часа после разливки происходят из-за большой потери тепла на охлаждаемый поддон.

После наложения кристаллов аустенита передача тепла уменьшается за счёт изменения способа теплопередачи от конвективного (для жидкостей) к теплопроводности (для твердых тел). В верхней части слитка скачек происходит через 4 часа после окончания разливки. После этого верхняя часть тела слитка в осевой зоне охлаждается со скоростью  $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$ . Эта скорость в два раза ниже, чем скорость охлаждения нижней части слитка, так как тепловому потоку необходимо преодолеть слой металла значительной толщины. Центральная часть слитка охлаждается равномерно со средней скоростью  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$ .

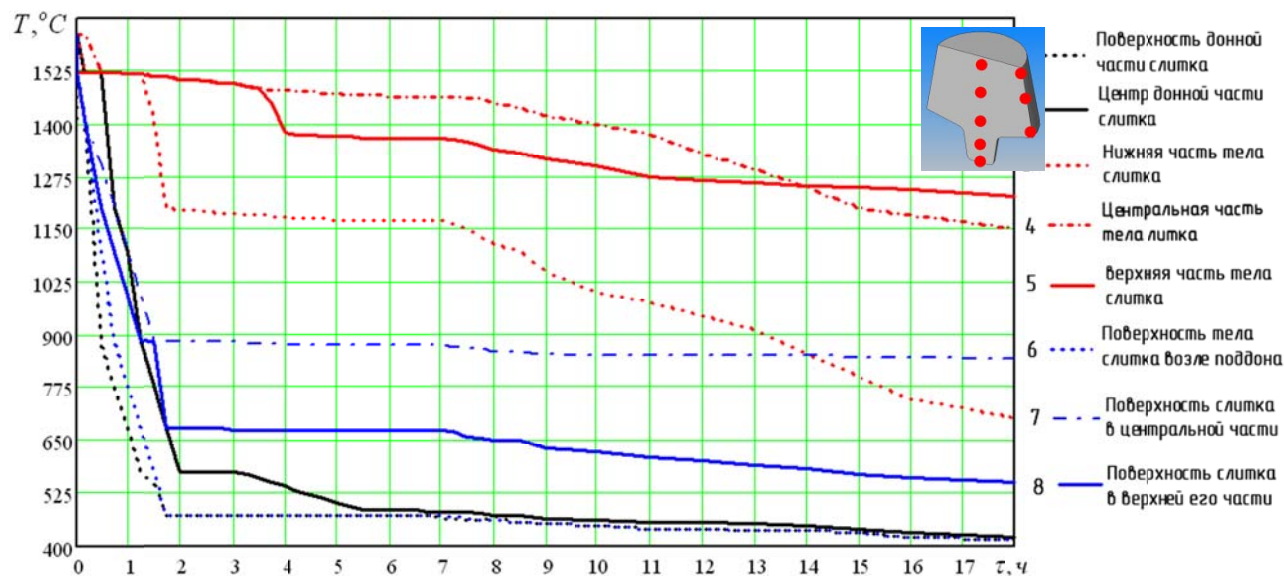


Рис. 5. Температуры характерных точек слитка от времени охлаждения

Температура поверхности тела слитка в течение 1 часа и 45 минут снижается с 1600 °С до: в нижней части – 470 °С, центральной части – 900 °С и верхней части – 670 °С (рис. 5). После этого температура поверхности нижней и верхней части тела слитка поддерживается на том же уровне за счет теплового потока из центра слитка, а температура поверхности центральной части слитка поддерживается постоянной в течение следующих 5 часов, после чего плавно снижается со скоростью 15 °С/час. Это тепловое состояние сохраняется до полной кристаллизации и охлаждения центра слитка.

## ВЫВОДЫ

В результате численного моделирования процесса кристаллизации укороченного кузнечного слитка с утепленной боковой поверхностью и охлаждаемым поддоном было установлено тепловое состояние, которое обеспечивает направленный фронт кристаллизации сплава снизу вверх. Тепловой центр кристаллизации расположен в самой верхней точке слитка. Направленная кристаллизация исключает образование осевой пористости, глубина усадочной раковины составляет 7–10 % от высоты тела слитка, что на 20–25 % меньше, чем для обычных кузнечных слитков. Снижение отвода тепла за счет утепления боковой части изложницы компенсируется интенсивным отводом тепла на поддон, что не приводит к увеличению времени кристаллизации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дурынин В. А. *Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения* / В. А. Дурынин, Ю. П. Солнцев. – СПб. : ХИМИЗДАТ, 2006. – 272 с.
2. Тюрин В. А. *Удлиненные цилиндрические слитки дляковки поковок* / В. А. Тюрин // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – № 2. – С. 19–23.*
3. Скобло С. Я. *Слитки для крупных поковок* / С. Я. Скобло, Е. А. Козачков. – М. : Машиностроение, 1973. – 248 с. : ил.
4. *О механизме возникновения химической неоднородности в стальном слитке* / В. А. Вишняков, Н. М. Данилов, В. Д. Дементьев, О. В. Трифонов // *Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1977. – № 2. – С. 35–39.*
5. Камнев П. В. *Совершенствованиековки крупных поковок* / П. В. Камнев. – Л. : Машиностроение, 1975. – 344 с.
6. *Le lingot de 300 tonnes de Sheffield Forgemasters (US)* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://aci.org/free/fr/index.php/2010/01/25/le-lingot-de-300-tonnes-de-sheffield-forgemasters-us>.
7. *Самая Полная База Данных о металлах в Мире* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&>.
8. Пат. 61771 Украина, МПК(2006) В 22 D7/06. *Виливниця для відливання коротких ковальських злитків* / Марков О. Є, Алієв І. С., Олешко М. В.; заявник і потентовласник ДДМА. – № u201100943; заявл. 28.01.11; опубл. 25.07.11, Бюл. № 14.
9. *Марков О. Е. Снижение себестоимости и повышения качества поковок за счет применения укороченных слитков* / О. Е. Марков // *Азовмаш 2006 : матеріали I міжнар. наук.-техн. конф., 10 червня 2006 р. – Маріуполь, 2006. – С. 58–59.*
10. *Марков О. Е. Применение укороченных слитков при ковке крупных поковок* / О. Е. Марков, С. В. Янчук // *Технологія – 2007 : матеріали X всеукр. наук.-практ. конф. – Северодонецьк, 19–20 квітня 2007. – С. 8.*

Алиев И. С. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМД ДГМА;

Марков О. Е. – канд. техн. наук, доц., докторант каф. ОМД ДГМА;

Захарчук С. С. – нач. лаб. ПАО «НКМЗ»;

Таган Л. В. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ПАО «НКМЗ» – Публичное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск.

E-mail: oleg.markov.omb@mail.ru