

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРУПНЫХ КУЗНЕЧНЫХ СЛИТКОВ НА ИХ КАЧЕСТВО

Абдулов А. Р., Жбанков Я.Г.

Выполнено моделирование процессов кристаллизации и затвердевания крупных кузнечных слитков из стали 38ХМ. В качестве моделей были выбраны обычный, укороченный и удлиненный слитки. Исследование изменения характера распределения температурных полей в теле слитка при переходе из жидкой в твердую фазу позволило определить время кристаллизации слитков. Установлено, что дольше всех происходит кристаллизация укороченного слитка. Была определена глубина проникновения дефектов усадочного характера, таких как усадочная раковина и усадочная пористость, в годную часть слитков. Минимальная глубина проникновения характерна для укороченного слитка, что свидетельствует о более качественной его структуре.

Виконано моделювання процесів кристалізації і тверднення великих ковальських злитків зі сталі 38ХМ. В якості моделей були обрані звичайний, укорочений і видовжений злитки. Дослідження зміни характеру розподілу температурних полів в тілі злитка при переході з рідкої в тверду фазу дозволило визначити час кристалізації злитків. Встановлено, що найдовше відбувається кристалізація укороченого злитка. Була визначена глибина проникнення дефектів усадочного характеру, таких як усадочна раковина і усадочна пористість, в придатну частину злитків. Мінімальна глибина проникнення характерна для укороченого злитка, що свідчить про більш якісну його структуру.

Modeling of crystallization and solidification processes of large forging steel ingots was made. As models ordinary, shortened and elongated ingots were selected. The crystallization time of ingots was determined by studying of temperature fields changing in ingots body during solidification. It was established, that the highest time of crystallization corresponds to the shortened ingot. The penetration depth of shrinkage exposures to the formal part of ingots was determined. The minimal depth of penetration is corresponded for shortened ingot. This indicates on the best structure for this type of ingots.

Абдулов А. Р.

канд. хим. наук, доц. каф. КИТ ДГМА

Жбанков Я. Г.

д-р техн. наук, доц. каф. ОМД ДГМА  
yzhbankov@gmail.com

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.7

Абдулов А. Р., Жбанков Я. Г.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРУПНЫХ КУЗНЕЧНЫХ СЛИТКОВ НА ИХ КАЧЕСТВО

Качество поковок существенно зависит от качества слитков, на которое в свою очередь оказывает влияние технологический процесс плавки стали, температура разливки, скорость заполнения изложницы, скорость охлаждения жидкой стали в изложнице и т.д. Вместе с этим, на качество слитков также оказывают влияние геометрические параметры получаемых слитков [1, 2], таких как соотношение  $h/D$ , где  $h$  – высота слитка,  $D$  – средний диаметр поперечного сечения слитка; конусность слитка; размер прибыльной надставки и т.д. Все эти параметры обуславливают тепловое состояние в процессе охлаждения и кристаллизации.

В процессе кристаллизации слитков в них образуются дефекты, связанные с физическими и химическими процессами, происходящими в интервале температур от температуры заливки до температуры извлечения слитка из изложницы. В свою очередь, максимальное количество дефектов в слитках, равно как и в любых изделиях, получаемых литьем, образуется в период их кристаллизации в интервале температур между температурами ликвидуса и солидуса. Окончательная структура слитка формируется при затвердевании и охлаждении вплоть до комнатной температуры.

Основными дефектами кристаллизующихся кузнечных слитков являются ликвация и дефекты усадочного характера. Развитие ликвации зависит от содержания легирующих элементов, режимов разливки и охлаждения слитков, и многих других факторов. Дефекты усадочного характера возникают за счет уменьшения объема металла при кристаллизации. К таким дефектам относят усадочную раковину, рыхлость и пористость.

Процессы, происходящие в изложнице при заливке жидким металлом, а также в процессе кристаллизации слитка, влияющие на его структуру и качество, могут быть исследованы экспериментальными и математическими методами. В связи с чрезвычайной сложностью, дороговизной и трудоемкостью экспериментальных методов, в последнее время широкое распространение получили математические методы. Эти методы закладываются в основу современных программных продуктов, позволяющих моделировать поведение жидкого металла в изложнице. Применение подобных продуктов способно заменить дорогостоящий эксперимент и получить данные с удовлетворительной для практики точностью.

Целью настоящей работы стало моделирование процесса затвердевания и охлаждения крупных кузнечных слитков различной конструкции, а также анализ влияния параметров слитков на характер распределения и размер дефектов в них.

В работах [1–4] для моделирования процессов изготовления слитков в изложнице использовался программный пакет ProCAST [5].

В работах [1, 2] было изучено влияние скорости заливки, соотношения геометрических размеров слитка и его конусности, высоты и формы прибыльной надставки на характер затвердевания металла в слитках. Результаты работ показали, что для производства качественных слитков необходимо регулировать параметры заливки, при этом осуществлять заливку с постоянной скоростью, уменьшать соотношение  $h/D$  и организовывать процесс затвердевания таким образом, чтобы он происходил в вертикальном направлении.

В работе [3] был изучен характер заполнения изложницы сифонным способом. Моделирование производилось на слитке массой 19 т круглого сечения из стали 42CrMo4. Авторами работы было установлено то, что при заполнении изложницы жидким металлом с высокой скоростью в потоке металла создаются зоны турбулентности с потоками, которые могут выходить на поверхность зеркала металла вплоть до завершения заливки изложницы.

Авторы работы [4] с применением программы ProCAST был определен характер гравитационной ликвации основных легирующих элементов и примесей в слябовом слитке массой 40 т из среднеуглеродистой хромо-молибденовой стали. Согласно результатам моделирования, полученным в работе, для всех элементов характерно увеличение ликвации в направлении от стенок изложницы к центру слитка и снизу вверх.

В настоящей работе моделирование процессов кристаллизации и затвердевания слитков выполнялось с применением метода конечных элементов. Данный метод позволяет успешно выполнять решение температурных и гидродинамических задач, возникающих при моделировании литейных процессов: охлаждение, кристаллизация и затвердевание стальных слитков. Для моделирования тепловых процессов, происходящих в изложнице в процессе изготовления слитка, учитываются данные по теплопроводности, конвекции и излучению, а также данные по физико-химическим свойствам заливаемой в форму стали.

В качестве объекта моделирования были выбраны три слитка с различными геометрическими размерами годной части слитка. На рис. 1 и в табл. 1 представлены геометрические размеры исследованных слитков. Были изучены обычный, укороченный и удлиненный слиток с соотношениями  $h/D$  равными 2,34, 1,5 и 3,2, соответственно.

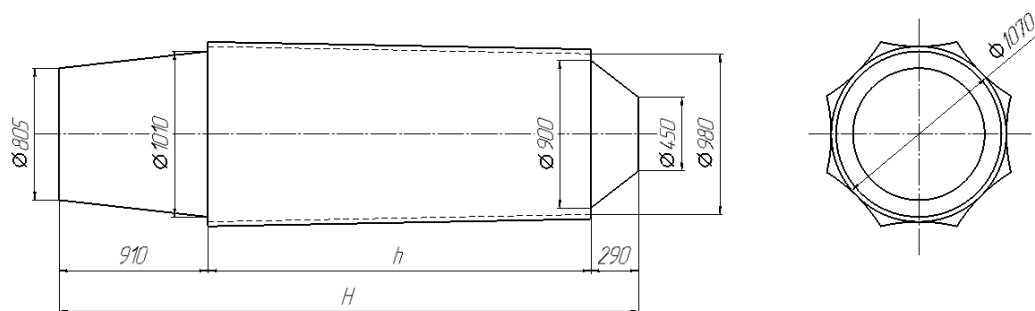


Рис. 1. Общая схема слитка, использованного для моделирования процессов кристаллизации и затвердевания

Таблица 1

№ п/п	Параметры слитков						
	Масса, т			Размеры, мм		Соотношение $h/D$	Конусность, %
	годной части	прибыльной надставки	донная часть	$h$	$H$		
1	15,2	4,6	0,8	2340	3540	2,34	3,2
2	9,7			1500	2700	1,5	6
3	20,7			3200	4400	3,2	2,8

В качестве материала для слитков была выбрана сталь 38ХМ, температура ликвидуса которой составляет 1494°C, температура солидуса 1425°C. Температура заливки составила 1550°C. В качестве материала изложницы использовался серый чугун марки СЧ25.

В табл. 2 представлены результаты моделирования характера изменения температуры в процессе кристаллизации, затвердевания и охлаждения слитков. Результаты представлены в виде температурных полей, показывающих изменения температуры в слитках с течением времени. Эти результаты позволили оценить продолжительность кристаллизации слитков, то есть времени, за которое вся жидкая фаза полностью переходила в твердую. Для обычного слитка это время составило около 4,9 часов, для укороченного – 4,7 часа, для удлиненного – 5,4 часа. Результаты, полученные для слитков с разной массой, не сильно отличаются. Однако если учесть то, что масса слитков разная и минимальную массу имеет укороченный слиток, то можно предположить, что данный тип слитков при одинаковых условиях технологического процесса и одинаковой массы сравниваемых слитков, будет затвердевать дольше

всего. Низкая скорость кристаллизации укороченного слитка связана с тем, что скорость продвижения фронта кристаллизации с течением времени уменьшается в связи с ростом температуры стенок изложницы и уменьшением теплопроводности через периферийную часть слитка из-за увеличения слоя затвердевшего металла.

Также результаты, представленные в табл. 2, демонстрируют, что для всех слитков характерно распространение усадочной раковины из прибыльной надставки в тело слитка. В процессе моделирования не была учтена возможность установки теплоизолирующих вставок в прибыльных надставках, хотя на производстве для уменьшения усадки это широко применяется.

Для обычного и удлиненного слитков наблюдается образование выраженной раковины, которая глубоко проникает в слиток. Согласно результатам моделирования усадочная раковина проникает в тело обычного слитка на глубину  $0,13h$ , удлиненного на глубину –  $0,12h$  и укороченного – на глубину  $0,09h$ , где  $h$  – высота годной части слитка. Наличие выраженной раковины у обычного и удлиненного слитков оказывает благоприятное влияние на получение плотных слитков по всему сечению, однако значительная глубина проникновения раковины в слиток приводит к увеличению расхода металла на получение годного слитка.

Минимальная глубина проникновения усадочной раковины в тело слитка наблюдается для укороченного слитка ввиду особенностей его кристаллизации, связанных с продолжительным временем затвердевания слитка и отсутствием предпосылок для образования глубокой усадочной раковины.

Как известно, в процессе кристаллизации, в центральной области вдоль вертикальной оси слитка образуется дефект – усадочная пористость. Причиной возникновения данного дефекта является то, что в этой области металл находится в «кашеобразной консистенции», которая является следствием одновременного существования жидкой и твердой фаз. Вследствие этого, остывающий расплав, ввиду его малой жидкотекучести, не имеет возможности просачиваться сквозь смыкающиеся ветви дендритов, что приводит к возникновению дефектов усадочного характера.

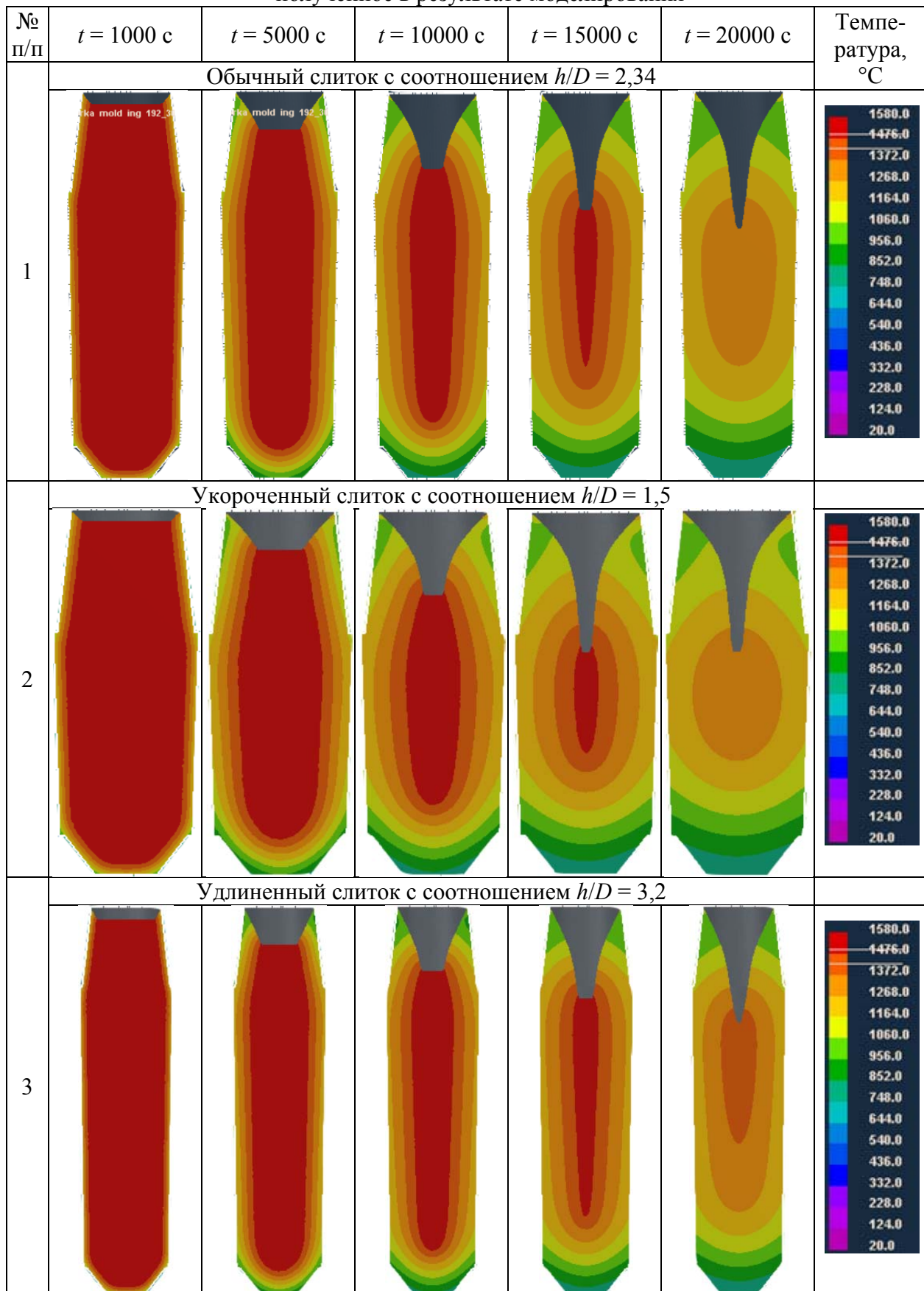
Результаты моделирования пористости в слитках представлены на рис. 2. Для количественной оценки на рис. 2 представлены шкалы со значениями пористости. Значения пористости в процентах, полученные в результате моделирования, означают то, что в данной области количество пор составляет 80% от всего объема, но размер этих пор не указывается. Для всех слитков характерно образование пористости в центральной части слитка под усадочной раковинной. Данная область кристаллизуется в последнюю очередь и для уменьшения пористости необходимо обеспечивать подпитку верхней части слитка жидким металлом. Завершение кристаллизации жидкого металла в конусе усадочной раковины приводит к тому, что под ним в центральной части слитка остается зона одновременного существования жидкой и твердой фаз. Кристаллизация этой зоны без подпитки ее жидким металлом приводит к образованию усадочной пористости.

Количественная оценка дефектов усадочного характера в тело слитков различной конфигурации может быть выполнена на основании определения глубины проникновения усадочной пористости со значением не менее 2% в годную часть слитка (рис. 2). Меньшие значения пористости не рассматривались, поскольку принималось, что расчетные значения меньше 2% находятся в пределах погрешности проведенных расчетов.

Так, для обычного слитка глубина усадочной раковины и пористости проникает в его годную часть на глубину  $0,74h$ , для удлиненного слитка – на глубину  $0,82h$ , для укороченного слитка –  $0,56h$ . Полученные значения указывают на то, что медленный теплоотвод при кристаллизации металла в укороченном слитке, позволяет дольше осуществлять подпитку кристаллизующейся центральной части слитка жидким металлом, что уменьшает глубину усадочной раковины и позволяет получить концентрированную область усадочных дефектов под раковинной. В свою очередь, для удлиненного слитка характерно распространение усадочных дефектов на довольно большую глубину, что значительно ухудшает качество будущих поковок.

Таблица 2

Распределение температуры стали в слитках при затвердевании, полученное в результате моделирования



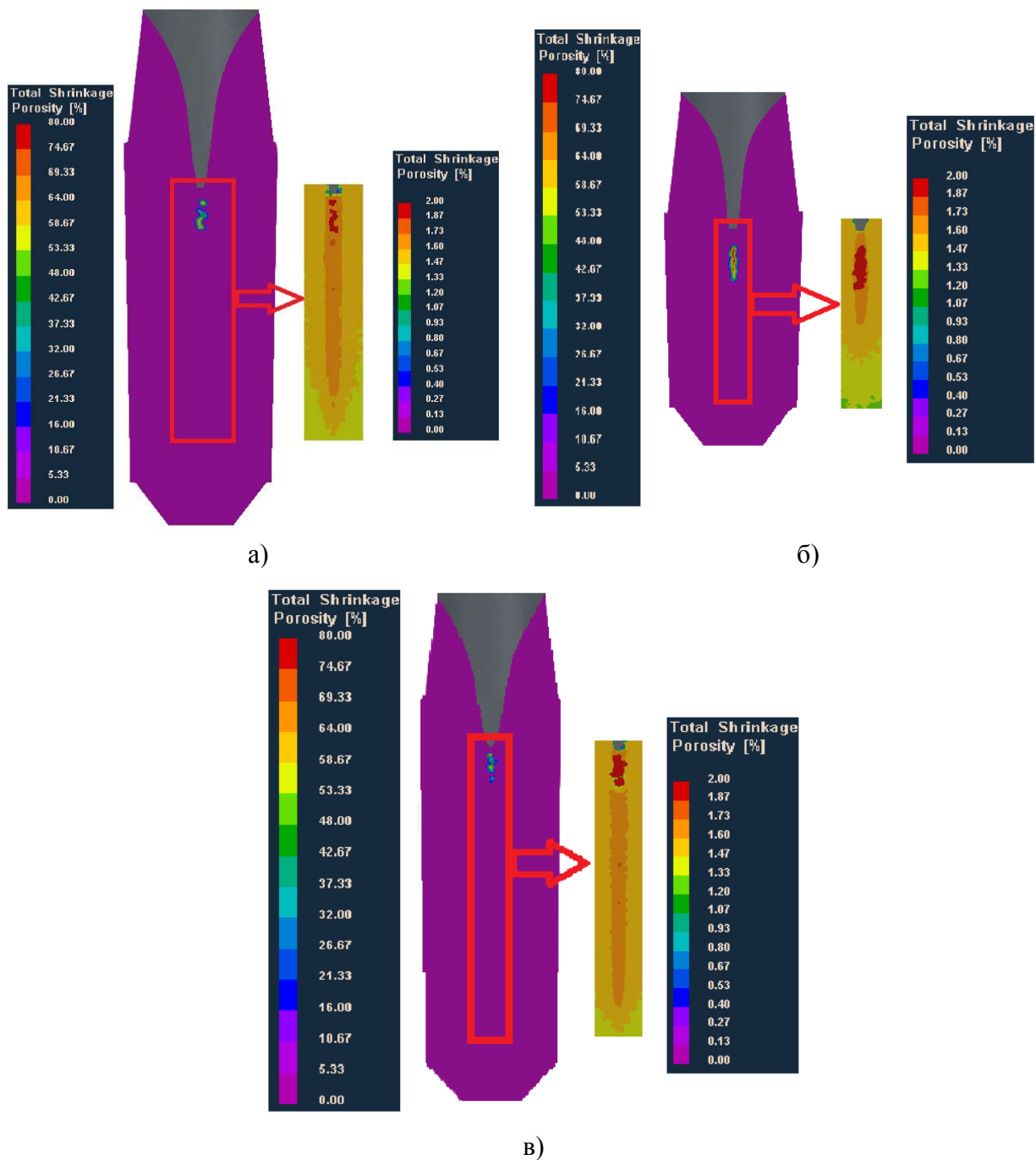


Рис. 2. Результаты моделирования усадочной пористости в обычном (а), укороченном (б) и удлиненном (в) слитках

Таким образом, полученные в работе результаты моделирования процессов кристаллизации и затвердевания обычного, удлиненного и укороченного слитков позволили оценить влияние их конструкции на качество. Показателем качества для выполнения данной оценки являлась глубина проникновения дефектов усадочного характера в годную часть слитка. Наибольшая глубина проникновения усадочной раковины, как показали результаты моделирования, характерна для удлиненного слитка, а наименьшая была получена для укороченного слитка. Вместе с этим, для более полной оценки характера распределения дефектов усадочного характера в слитках различной конфигурации, также потребовалось определить глубину распространения усадочной пористости в тело слитка. Было установлено, что

наименьшая глубина проникновения раковины и пористости в годную часть слитка характерна для укороченного слитка, а максимальная – для удлиненного слитка. Это свидетельствует о том, что на качество будущих поковок кроме технологических параметров процессов на различных этапах их изготовления, также оказывают влияние геометрические параметры получаемых слитков. Полученные результаты также свидетельствуют о том, что для получения более качественных поковок следует использовать укороченные слитки, в которых распределение усадочных дефектов имеет более благоприятный характер, чем для других типов слитков, исследованных в настоящей работе.

### ВЫВОДЫ

На качество кузнечных слитков, применяемых для изготовления поковок, оказывается комплексное влияние технологических параметров их получения, а также геометрические параметры слитков, такие как соотношение  $h/D$ , конусность слитков, размеры прибыльной надставки и др.

Моделирование процессов затвердевания крупных слитков с различным соотношением  $h/D$  позволило определить особенности протекания процессов кристаллизации и охлаждения металла в изложницах. Для слитков трех типов была оценена продолжительность кристаллизации. Так, для укороченного слитка продолжительность кристаллизации наибольшей, что связано с преимущественно боковым отводом тепла от слитка, что приводит к увеличению продолжительности их кристаллизации.

Полученные в работе данные о глубине проникновения усадочной раковины и усадочных дефектов в тело слитка указывают на то, что для обычного, удлиненного и укороченного слитков усадочная раковина проникает на глубину  $0,13h$ ,  $0,12h$  и  $0,09h$ , соответственно. Однако глубина проникновения дефектов усадочного характера в тело слитка, а именно, пористости, в тело укороченного слитка является наименьшей и составляет  $0,56h$ . Для обычного и удлиненного слитков эта величина составляет  $0,74h$  и  $0,82h$ , соответственно. Это свидетельствует о том, что более качественная структура, согласно результатам моделирования, характерна для укороченного слитка.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation* / A. Kermanpur, M. Eskandari, H. Purmohamad, M.A. Soltani, R. Shateri // *Materials and Design*. – 2010. – V. 31. – P. 1096–1104.
2. Zhang C. *Influence of casting parameters on shrinkage porosity of a 19 ton steel ingot* / C. Zhang, Y. Bao, M. Wang // *La Metallurgia Italiana* – N. 1 2016. – P. 37–44.
3. Pola A. *Comprehensive Numerical Simulation of Filling and Solidification of Steel Ingots* / A. Pola, M. Gelfi and G. Marina *La Vecchia* // *Materials*. – 2016. – V. 9. – P. 1–13.
4. *Study of casting and solidification of slab ingot from tool steel using numerical modelling* / M. Tkadlečková, K. Michalek, P. Machovčák, M. Kováč, L. Socha // *Archives of metallurgy and materials*. – 2015. – V. 60, Issue 4. – P. 2881–2885.
5. *ProCast User's Manual*. Available online: <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtualmanufacturing/casting/procast-quickcast> (accessed on 8 September 2016).