

УДК 621.735.35

**Герасименко А. В., Марков О. Е., Инчаков Е. В., Маркова М. А.,
Житников Р. Ю.****ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
УКОРОЧЕННЫХ СЛИТКОВ ДЛЯ ПОКОВОК ОТВЕТСТВЕННОГО
НАЗНАЧЕНИЯ**

Слитки обычной конфигурации используются в качестве заготовок для крупных поковок, получаемых на гидравлических прессах. Отношение высоты к среднему диаметру поперечного сечения у таких слитков составляет 2,0...2,5, конусность на обе стороны – 5 %. Однако, для кузнечных слитков с соотношением $H/D = 2,5...3,0$ характерны внеосевая ликвация, неоднородность структуры, химического состава и механических свойств [1].

На заводе CELSA – Huta Ostrowiec были проведены исследования на 15-тонном кузнечном слитке. Были определены структурные зоны слитка. Металлографические исследования позволили выявить мелкие зерна, столбчатые зерна и крупные равноосные зерна в поверхностных слоях слитка. С помощью этих исследований были обнаружены зоны столбчатой и равноосной структур. Основываясь на этих исследованиях W. Wołczyński и др. [2], выполнили моделирование полей температурного градиента. Это позволило спрогнозировать появление равноосных дендритов и столбчатых зерен в зависимости от времени кристаллизации и появление вышеуказанных зон по отношению к радиусу слитка. Было выполнено моделирование для двух толщин изложницы. Установлено, что образование столбчатой разветвленной структуры происходит при значительном температурном градиенте. Это важно, потому, что расположение зоны перехода столбчатых зерен в равноосные влияет на окончательные свойства кузнечного стального слитка. Однако качество слитка зависит также от наличия усадочных дефектов и пористостей, особенно в осевой зоне. Описание образования этих дефектов не отображено в работе и требует дальнейшего исследования.

S. P. Wu и др. [3] исследовали влияние температуры подогрева изложницы, материала изложницы и состав материала в зоне перехода столбчатых зерен в равноосные. Было выявлено, что большая равноосная зона слитка образовывается при заливке в песочную форму, чем при заливке в металлическую. Так же установлено, что изменение температуры изложницы минимально влияет на расположение зоны перехода столбчатых зерен в равноосные. При этом длина столбчатых зерен увеличивается с повышением температуры расплава. Тем не менее, увеличение подогрева в специальном диапазоне незначительно влияет на зону перехода столбчатых зерен в осевые. Изменение формы прибыльной части требует дальнейшей проверки, с целью вытеснения усадочной раковины из тела слитка.

Такие недостатки кузнечного слитка как неоднородность химического состава и наличие включений можно отнести к недостаткам, которые вызваны процессом литья. Например, неоднородность содержания углерода присутствует в крупных слитках, масса которых более 100 т. T. Wutao и др [4] определяли возможность заливки стали в изложницу из трех ковшей с различным содержанием углерода через промежуточный ковш. В первом – наибольшее содержание углерода, в последнем – самое низкое. Сталь с высоким содержанием углерода заливалась вначале, поэтому концентрация углерода была выше в нижней части слитка, чем в верхней. Зона с низкой концентрацией углерода, образованная в верхней части слитка, является благоприятной для снижения положительной ликвации в верхней части. Зона с высокой концентрацией углерода сосредотачивается в нижней области, которая является благоприятной для подавления отрицательной ликвации в нижней части слитка. Дальнейшее

развитие исследования неплохо было бы провести для различных соотношений высоты к среднему диаметру слитка и возможности утепления изложницы, для получения направленной кристаллизации.

Включения неметаллического происхождения также часто встречаются в кузнечных слитках. Этот недостаток можно отнести к дефектам литейного происхождения. В работе [5] Н. Tobimatsu и др. определили, что такие включения как SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , MgO и др. попадают в слиток из футеровки прибыльной части. В процессе заполнения изложницы в ней образуются вихревые потоки стали. Они затягивают частицы футеровки изложницы в тело слитка. Для решения этой проблемы было предложено форму прибыльной надставки выполнять не параллельно поверхности поднимающейся жидкой стали, а под углом. Это позволяет уменьшить завихрение под прибыльной надставкой и снизить, таким образом, количество неметаллических включений. Проверка изменения соотношения H/D слитка и образование усадочной раковины требуют дальнейшего исследования.

Исследования Дурьнина и Солнцева [6] позволили получить топографию кузнечного слитка массой 40 т из стали 34ХМА. Она выявила, что концентрация наиболее крупных неметаллических включений наблюдается со стороны донной части слитка и его осевой зоны. Природа появления этих силикатов – преимущественное направление кристаллизации от стенок изложницы к оси слитка. По данным А. Н. Смирнова, такое направление кристаллизации приводит к образованию осевой рыхлости для слитка из среднелегированной стали 34ХНЗМА массой 4,5 т; высоколегированной – массой 1,6 т (рис. 2, в) [7]. В слитке развиты осевая и внеосевая ликвации. Внеосевая ликвация подтверждена исследованиями В. А. Ефимова и А. С. Елдаханова на аналогичной марке стали для близких соотношений размеров обычных слитков [8]. Идентичные результаты так же установлены исследователями для слитков массой 65 т [9]. Внеосевая ликвация также характерна для слитков с соотношением $H/D = 2,0 \dots 3,0$ [6]. Однако в данных работах пути устранения выявленных дефектов не предложены.

По результатам проведенного обзора, необходимость дальнейшего развития научных основ проектирования и разработки новых форм кузнечных слитков установлена. Это требует проведения специальных комплексных исследований.

Помимо увеличения объемов производства и производственных мощностей, повышение качества, снижение себестоимости и расширение сортамента слитков являются основными направлениями развития кузнечного производства. Достижение указанного уровня производства может быть обеспечено за счет проведения конструкторских мероприятий, связанных с изменением производства качественных кузнечных заготовок. Для получения слитков высокого качества следует совершенствовать и разрабатывать новые конструкции изложниц.

С учётом этого обстоятельства основными задачами разработки укороченных слитков с направленной кристаллизацией являются:

- определение рациональной геометрии;
- определение основных показателей качества и базовых механических характеристик;
- разработка изложницы для производства.

Цель исследования – определение основных параметров процесса направленной кристаллизации и строения кузнечных слитков с соотношением $H/D = 1,1$.

Качество поковок определяется качеством исходной заготовки – кузнечного слитка. В первую очередь это строение слитков и отсутствие осевой пористости как основного сложноустраняемого дефекта кузнечной заготовки. Для этого необходимо управлять процессом формирования структуры слитка и обеспечить определённые условия кристаллизации металла [10, 11]. Форма слитка и конструкция изложницы для его получения выступают основными параметрами в этом случае. Моделирование процесса кристаллизации сводится к определению теплового состояния слитка. Моделирование осуществлялось в САМ-программе, разработанной для проектирования кристаллизационных процессов,

MAGMA Soft (совместно с ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод»). Была разработана изложница для получения укороченных бесприбыльных кузнечных слитков (рис. 1).

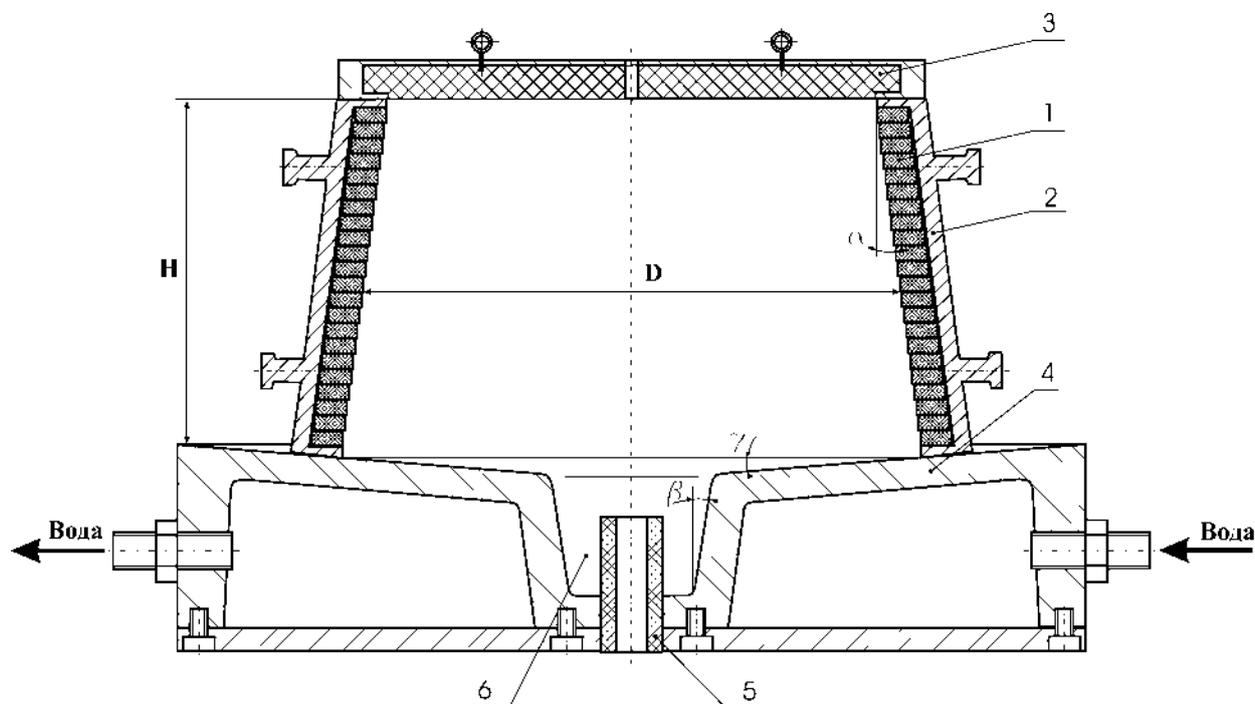


Рис. 1. Изложница для получения бесприбыльных укороченных слитков:

1 – футеровка стенок изложницы; 2 – корпус изложницы; 3 – теплоизоляция крышки изложницы; 4 – охлаждаемый поддон; 5 – вставка для разливки сифоном; 6 – донная часть слитка

Утепленная боковая поверхность и крышка изложницы должны способствовать уменьшению глубины усадочной раковины. Исследовался слиток массой 18 тонн из стали 34ХНМ, предназначенный дляковки поковок типа валов.

Исходные данные для расчёта: температура заливки стали – 1610 °С; материал поддона – чугун; материал футеровки – шамот; утепление крышки – высокоглиноземистый пресованный порошок; начальная температура всех элементов – 20 °С. Диаметр каналов для охлаждения принимался 120 мм при их суммарной длине 15 000 мм, расход охлаждающей жидкости 20 м³ / ч при температуре 25 °С.

Проведение экспериментальных исследований на натуральных слитках для определения температурных полей и внутреннего строения в слитке требует значительных материальных затрат. Эксперименты на уменьшенных моделях не дадут адекватных результатов в связи с сильным влиянием масштабного фактора на условия кристаллизации стали. Численное исследование является основным инструментом исследования формирования внутренней структуры кузнечного слитка в процессе кристаллизации. Оно позволяет с высокой точностью моделировать термодинамические процессы кристаллизации металла. Укороченный кузнечный слиток из стали 34ХНМ весом 18 тонн, разливаемый сверху, является объектом исследования.

Исследуемая технология получения слитков основана на охлаждении со стороны поддона. Процесс кристаллизации был исследован в динамике. Для анализа полученных результатов выбрали конечную стадию процесса затвердевания. Полученные результаты свидетельствуют о начале кристаллизации со стороны охлаждаемого поддона. При этом тепловой центр кристаллизации располагался в верхней части слитка. Согласно данной расчетной

схеме, незначительная кристаллизация происходила со стороны верхней крышки, которая в начальный момент имела температуру 300 °С. Температура в тепловом центре слитка составляла 1465 °С. Это соответствовало наличию жидкой фазы для исследуемой стали. Температура донной части слитка, по результатам MAGMA, составляла 470 °С (рис. 2).

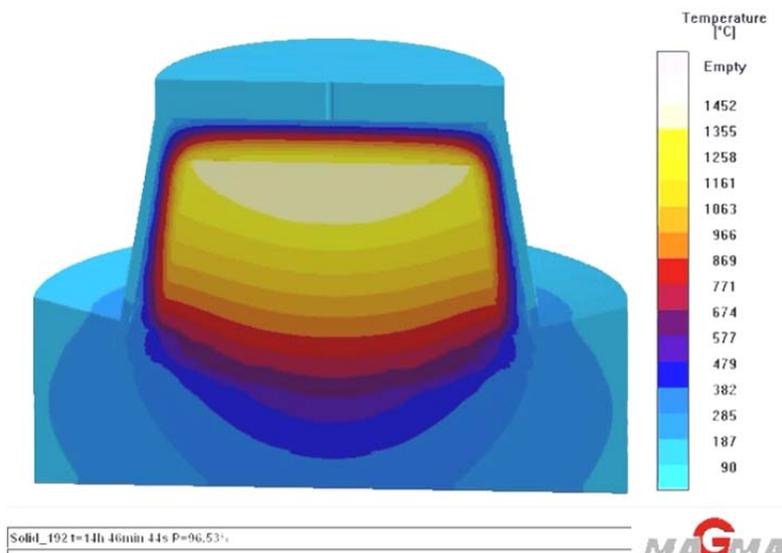


Рис. 2. Температурное поле слитка в момент полной его кристаллизации

Количество твердой фазы, по результатам расчетов в MAGMA, составляет 71,2 %. Область расположения жидкой фазы соответствует месту расположения будущей усадочной раковины. Температура донной части слитка остается приблизительно одинаковой. Это подтверждает предположение о том, что тепловой поток от слитка к охлаждаемому поддону достиг своего максимума и является промежуточным слоем между жидким слоем и закристаллизовавшимся низом слитка.

Результаты теплового состояния слитка в момент полной кристаллизации металла позволили сделать вывод о форме и расположении усадочной раковины в слитке. Время кристаллизации слитка составляет 15,6 часа после окончания разливки по результатам расчетов в MAGMA. Это состояние будет отвечать температуре слитка при загрузке в печь под нагрев перед ковкой.

Для возможности оценить качество слитка новой конфигурации необходимо также проанализировать фазовое состояние металла слитка до момента полного его затвердевания (рис. 3). По расчетам в MAGMA тепловое состояние слитка подтверждает направленный теплоотвод от поддона к теплоизоляционной крышке изложницы. Так как тепловой центр кристаллизации располагается в верхней части слитка, который имеет вид усеченного эллипсоида вращения, это приводит к формированию в этом месте усадочной раковины. Температура донной части составляет ≈ 750 °С, а теплового центра кристаллизации – 1377°С. Количество твердой фазы составляет 96,5 % (рис. 6), а температура верхней части тела слитка составляет 1452°С, по результатам расчетов в MAGMA.

Полученное тепловое поле (см. рис. 2) и фазовое состояние (см. рис. 3) подтверждают направленную кристаллизацию, которая исключает образование осевой рыхлости. Глубина усадки металла находится в диапазоне 100...150 мм (рис. 4). Это составляет 5...7 % от высоты тела слитка и на 20...25 % меньше, чем для обычных кузнечных слитков. Динамику кристаллизации исследуемого слитка в MAGMA можно определить по данным, представленным на рис. 5. Металл донной части слитка наслаивался в виде конусов вследствие сильного переохлаждения и интенсивного отвода тепла, повторяя геометрию поддона.

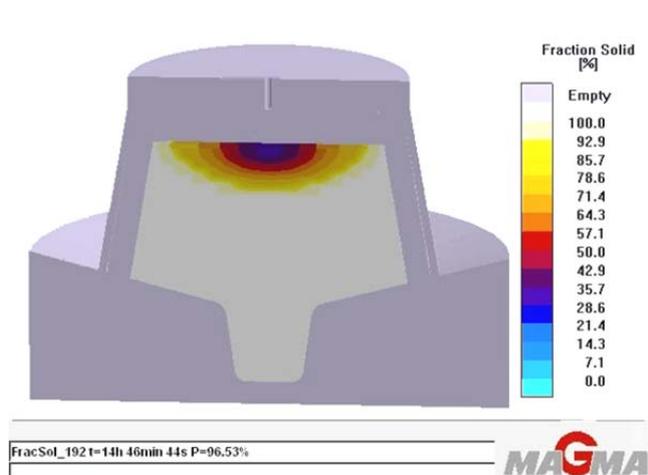


Рис. 3. Количество твердой фазы слитка после кристаллизации металла по результатам расчетов в MAGMA

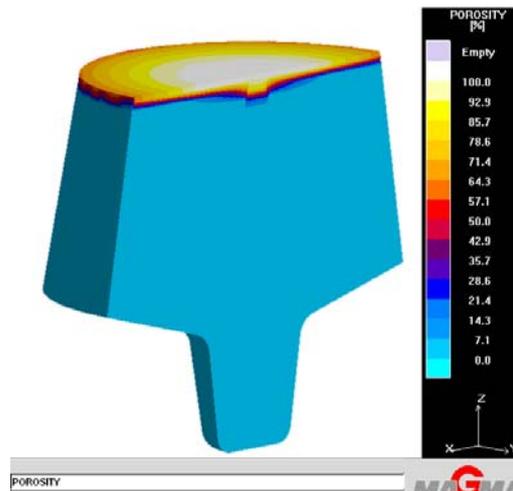


Рис. 4. Усадка слитка по результатам в MAGMA

Слои преобразуются из конусной формы в эллипсы со стороны прибыльной части слитка из-за увеличения толщины закристаллизовавшегося дна слитка и уменьшения теплоотвода в сторону поддона. Скорость охлаждения со стороны поддона и стенок изложницы выравнивается при этом. Полное время кристаллизации составило 57202 с (15,6 ч), табл. 1.

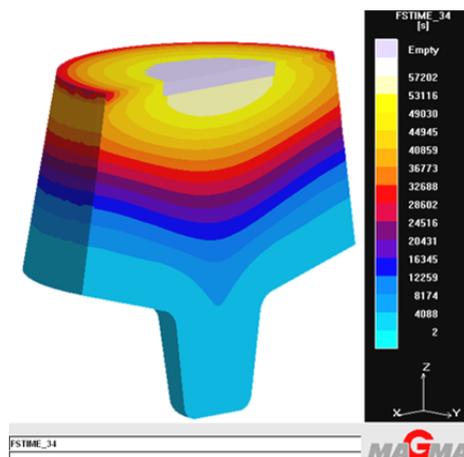


Рис. 5. Время кристаллизации стали MAGMA

Таблица 1

Результаты моделирования

Параметр	Значение
Время кристаллизации, ч	15.6
Глубина усадочной раковины, мм	100...150
Температура донной части слитка, °С	420
Температура боковой поверхности тела слитка, °С	800
Температура геометрического центра слитка, °С	1090
Температура теплового центра слитка, °С	1375

Температура плавления стали 34ХНМ, содержащей 0,3...0,4 % углерода, составляет примерно 1530 °С. В процессе кристаллизации формирование кристаллов аустенита происходит при температуре 1400 °С.

MAGMA soft позволяет получить также дополнительные технологические параметры, такие как скорость охлаждения металла, температурный градиент и критерий Нияма. На основании этих параметров можно сделать вывод о качестве получаемых слитков (размер зерна, внутреннее строение, трещинообразование).

Скорость охлаждения равномерная по площади сечения слитка и составляет $3...4^{\circ}\text{C} / \text{с}$. Исключением является донная часть слитка, которая находится в условиях резкого переохлаждения ($12...18^{\circ}\text{C} / \text{с}$). Равномерная скорость охлаждения будет обеспечивать получение однородной и равномерной структуры слитка (рис. 6).

Уровень термических напряжений, которые появляются в процессе кристаллизации, можно оценить на основании данных о градиенте температур (рис. 7). Полученные результаты позволили установить, что максимальный температурный градиент так же, как и скорость охлаждения, располагается на контакте металла и охлаждаемого поддона и равен $2,5...2,8^{\circ}\text{C} / \text{мм}$, а основной по сечению слитка – $0,6^{\circ}\text{C} / \text{мм}$ (рис. 7).

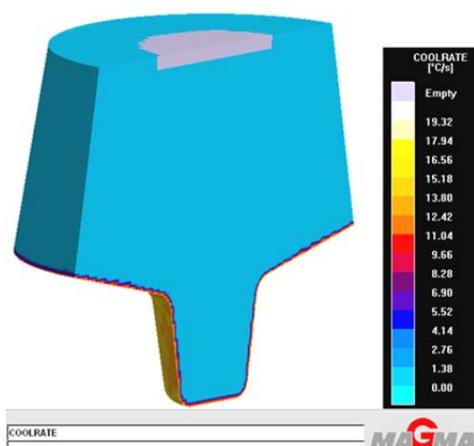


Рис. 6. Скорость охлаждения слитка с охлаждаемым поддоном

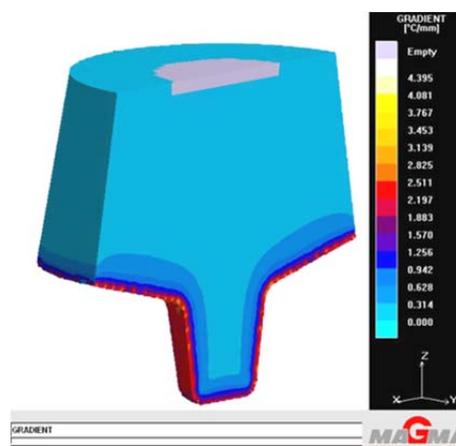


Рис. 7. Температурный градиент

Вероятность образования внутренних несплошностей оценивается по критерию Нияма (отношение градиента температур к корню квадратному скорости охлаждения) [12, 13]; максимальная его величина $10,2 (\sqrt{^{\circ}\text{C} \cdot \text{с} / \text{мм}})$ на поверхности донной части (рис. 8).

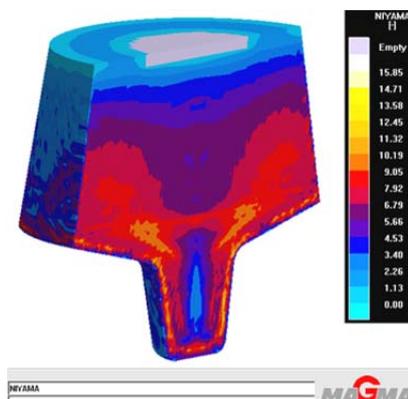


Рис. 8. Распределение критерия Нияма по сечению слитка

Анализ полученных результатов позволил установить, что в процессе формирования укороченного слитка с направленной кристаллизацией внутренние разрывы не образуются. Полученные данные подтверждают отсутствие вероятности трещинообразования от термических напряжений в процессе затвердевания.

ВЫВОДЫ

В результате численного моделирования установлено, что тепловой центр кристаллизации слитка расположен в прибыльной части при вертикальной кристаллизации. Направленная кристаллизация исключает образование осевой пористости, глубина усадочной раковины составляет 5...7 % от высоты тела слитка. Это на 20...25 % меньше, чем для обычных кузнечных слитков. Основная часть высоты тела слитка кристаллизуется с постоянным градиентом температур, не превышающим предельных значений (4...5°C / мм), которые могут привести к образованию трещин. Это дополнительно подтверждается данными распределения критерия Нияма в теле слитка. Наивысшую температуру на протяжении всего времени охлаждения имеет верхняя часть тела слитка, а низшую температуру – его донная часть. Уменьшение отвода тепла за счет утепления боковой части изложницы компенсируется интенсивным отводом тепла на поддон. Это не приводит к увеличению времени кристаллизации в сравнении с процессом кристаллизации обычного кузнечного слитка аналогичной массы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stahlberg U. A study of void closure during plastic deformation / U. Stahlberg, H. Keife, M. Lundberg, A. Melander // *Journal of Mechanical Working Technology*. – 1980. – Volume 4, Issue 1, Pages 51–63 [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(80\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0378-3804(80)90005-4).
2. Numerical Model for Solidification Zones Selection in the Large Ingots / W. Wołczyński, P. Kwapisiński, B. Kania, W. Wajda, W. Skuza, A.W. Bydalek // *Archives of foundry engineering*. – Volume 15. – Issue 4/2015. – P. 87–90
3. Influence of process parameters on CET in Ti–Al alloy ingot with consideration of shrinkage cavity formation: A computer simulation / Shi Ping Wu, Dong Rong Liu, Jing Jie Guo, Yan Qing Su, Heng Zhi Fu // *Journal of Alloys and Compounds* 441 (2007) 267–277. DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.09.094
4. Tu Wutao, Zhang Xiong, Shen Houfa and Liu Baicheng, Numerical simulation on multiple pouring process for a 292 t steel ingot, *Research & Development*, Vol.11 No.1 January 2014, p. 52-58 ID: 1672-6421(2014)01-052-07.
5. Haruki Tobimatsu, Katsushige Nishiguchi, Motohiro Nagao, Atsushi Tomioka, Yuichi Kanzaki, Optimization of hot top shape for Bottom Pouring ingot, 19th international forgemasters meeting, japan. – P. 70–73.
6. Durynin V. A. Issledovanie i sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva s tselyu povysheniya resursa stalnykh izdeliy is krupnykh pokovok otvetstvennogo naznacheniya (Study and improvement of production technology for increase of service life of steel products of responsible usage) / V. A. Durynin, Yu. P. Solntsev. – Saint-Petersburg : Khimizdat, 2006. 272 p.
7. Smirnov A. N. Zatverdevanie metallicheskogo raspavya pri vneshnikh vozddeistviyakh (Solidification of metal melt in the conditions of external effects) / A. N. Smirnov. – Donetsk : VIK Publishers. 2008. – 250 p.
8. Efimov V. A. Tekhnologii sovremennoy metallurgii / V. A. Efimov, A. S. Eldarkhanov // (Modern metallurgical technologies) Moscow : Novye tekhnologii. – 2004. – 784 p.
9. Lesoult G. Macrosegregation in steel strands and ingots : Characterisation, formation and consequence / G. Lesoult // *Material Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing. ICASP : proceedings of the international conference on advances in solidification processes ; 2005; Stockholm – 2005. – Volume 413/414. – P. 19–29. URL: <https://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.203>*.
10. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state/ Oleg E. Markov , Alexander V. Perig, Vitalii N. Zlygoriev, Marina A. Markova, Alexander G. Grin // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 90. – P. 801–818. – ISSN 0268–3768. – Access: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6>.
11. Development of forging processes using intermediate workpiece profiling before drawing: research into strained state / O. E. Markov, A. V. Perig, V. N. Zlygoriev, M. A. Markova, M. S. Kosilov // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 39(4):1-17 – 2017. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-017-0812-y>.
12. Carlson K. D. & Beckermann, C. (2009). Prediction of Shrinkage Pore Volume Fraction Using a Dimensionless Niyama Criterion. *Metall. Mater. Trans. A*. 40A(1), 163-175. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-008-9715-y>.
13. Jain N. Round Robin Study to Assess Variations in Casting Simulation Niyama Criterion Predictions in Proceedings / N. Jain, K. D. Carlson, C. Beckermann. 61st Technical and Operating Conference, Steel Founders' Society of America, Chicago. – 2007.