

УДК 621.735.35

Герасименко А. В., Марков О. Е., Хващинский А. С., Житников Р. Ю., Рагулина Н. В.**ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ КУЗНЕЧНОГО СЛИТКА НОВОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ПОКОВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Неоднородность химического состава и неметаллические включения относятся к дефектам металлургического происхождения. Эти дефекты возникают в процессе кристаллизации стали. Наличие в слитках осевой рыхлости и усадочной раковины отмечается зарубежными исследователями E. J. Pickering, C. Chesman, J. Wang, P. Fu, H. Liu, A. Ludwig, M. Wu и многими другими [1–3]. Это два сопутствующих дефекта кристаллизации, являющиеся, в основном, результатом изменения плотности сплава в процессе застывания [4]. Рыхлость делится на два вида: газовая рыхлость и усадочная рыхлость. Первая отвечает за развитие больших полостей, в то время как вторая приводит к образованию относительно небольших полостей [5, 6].

M. Flemings [7] и Соболев В. В. [8] в своих работах описывают кинетику процесса образования усадочной раковины. Давление в расплаве во время застывания уменьшается как следствие напряженности расплава из-за сжатия в направлении от поверхности к ее центральной части. В результате формируется область разряжения, в которую всасывается расплав. Это приводит к образованию пористости в верхней части слитка, распространяющейся вверх к поверхности прибыли [7, 8]. Было установлено, что межзеренная усадочная рыхлость (микропористость) возрастает с увеличением скорости кристаллизации. Ускорение роста кристаллов приводит к тому, что усадочная пористость увеличивается. Таким образом, замедление роста кристаллов является причиной уменьшения усадочной пористости. При относительно небольшом междендритном расстоянии усадочная микропористость меньше вблизи столбчатых зерен, чем вблизи равноосных [9]. О наличии таких дефектов, как усадочная пористость, стало известно после того как были проведены исследования с разрезанием слитков вдоль оси. На наш взгляд, два способа могут решить эту проблему либо изменение конструкции изложницы, утеплив ее [2], либо изменение формы слитка, выведя дефектные зоны ближе к прибыли, чтобы затем их удалить. Это требует проведения дополнительных исследований механизма кристаллизации слитков специальной формы.

Пустоты и трещины в центральной зоне и по оси слитка могут быть устранены ковкой (заваркой от деформации сжатия) [10], если они не имеют окисленной поверхности, при определенных условияхковки (высокая температура металла и соответствующее напряженно-деформированное состояние). Строение осевой зоны слитков обычно весьма неоднородно, что характеризуется усадочными мелкими пустотами и скоплением примесей (углерода, фосфора и серы). Поэтому строение осевой зоны слитков новой конфигурации является важной научной задачей.

Мировая практика [11] показала, что отношение H/D близкое к единице целесообразно соблюдать при увеличении массы слитка. Такое соотношение обеспечивает более плотную осевую зону, более однородное строение, а усадочная раковина полностью выведена в прибыльную часть слитка. Такие слитки могут применяться для изготовления поволоков роторов. Похожие результаты, полученные в работе П. В. Камнева, подтверждают тот факт, что уменьшение соотношения H/D до единицы приводит к отсутствию осевой рыхлости. В этом случае скорость кристаллизации в вертикальном направлении преобладает над скоростью со стороны стенок изложницы. Неисследованным остается процесс управляемой кристаллизации сверху вниз.

На основе анализа состояния вопроса установлено, что не только форму, но и условия кристаллизации необходимо менять для получения качественного слитка. Получение высококачественных поковок без применения дополнительных энергоемких операций можно осуществить за счет использования заготовок с минимальными внутренними дефектами [12, 13]. Для устранения осевых дефектов необходимо создать такие условия, при которых скорость кристаллизации в вертикальном направлении преобладает над скоростью кристаллизации со стороны стенок изложницы. Разработка новых кузнечных слитков является перспективным направлением. Этим направлением является применение укороченных слитков с $H/D < 1,5$ с направленной кристаллизацией.

Особенность предлагаемой конструкции слитка и изложницы – отсутствие прибыльной надставки. Это позволит исключить расход металла, связанного с прибыльной частью слитка, и изготавливать слитки без остатка металла. Эти мероприятия позволят повысить использование металла до 80...90 %. Объем донной части слитка для его удержания предполагается увеличить. Этот участок станет цапфой слитка под захват манипулятора. Трехмерная модель изложницы представлена на рис. 1.

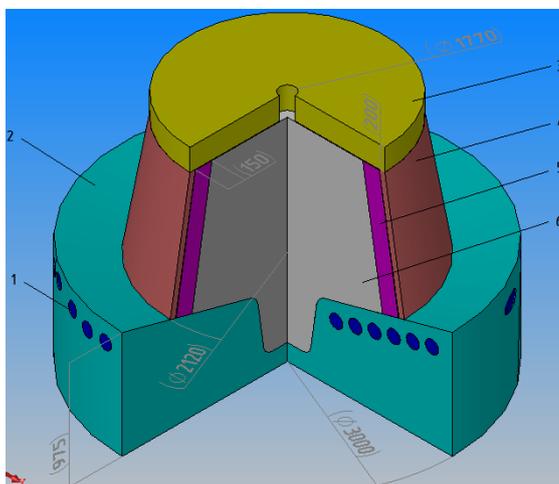


Рис. 1. Исследуемый слиток и конструкция изложницы

Моделирование процесса получения стального слитка с направленной кристаллизацией было проведено с использованием лицензионного программного продукта MAGMASoft. Результаты исследований преобразованы в ряд последовательных графиков основных показателей процесса кристаллизации с заданным интервалом во времени для анализа полученных данных.

Необходимо получить зависимости изменения температуры во времени для оценки теплового состояния слитка в динамике. Для этого были выбраны характерные точки. Изменение температуры этих точек характеризует тепловое состояние слитка. Для анализа теплового состояния слитка, получаемого по новой технологии, необходимо разместить точки на оси заготовки, так как кристаллизация происходит снизу-вверх. Для исследования напряженного состояния слитка необходимо оценить разность температур в продольном и поперечном сечении. По данным распределения температурных полей в продольном сечении слитка разность температур в поперечном сечении слитка можно оценить при помощи данных температуры оси слитка и его поверхности на одном уровне. Изменение температуры поверхности слитка в его нижней, центральной и верхней части с расположением представительных точек представлено на рис. 2.

Верхняя часть тела слитка имеет наивысшую температуру на протяжении всего времени охлаждения, а его донная часть – низшую температуру (см. рис. 2). Температура боковой поверхности тела слитка выше температуры донной части, но ниже центра тела.

Это приводит к образованию корки слитка. Температура на оси в нижней части тела слитка с течением времени сначала изменяется скачкообразно, а затем плавно снижается со скоростью $34^{\circ}\text{C} / \text{ч}$. Скачки температуры в первые 2 часа после разливки происходят из-за большой потери тепла на охлаждаемый поддон. Как только происходит значительное наслоение кристаллов аустенита, передача тепла уменьшается за счёт изменения способа теплопередачи от конвективного (для жидкостей) к теплопроводности (для твердых тел).

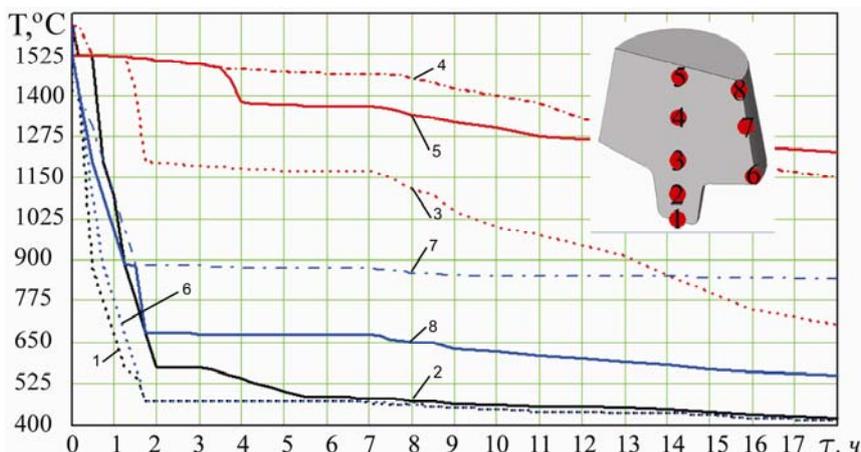


Рис. 2. Изменение температур характерных точек слитка во времени

Скачок температуры в верхней части слитка происходит через 4 часа после окончания разливки из-за отвода тепла через крышку изложницы. После этого верхняя часть тела слитка в осевой зоне охлаждается со скоростью $15^{\circ}\text{C} / \text{ч}$. 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 охлаждалась равномерно со средней скоростью $20^{\circ}\text{C} / \text{ч}$. В течение 1 часа и 45 минут температура поверхности тела слитка снижается с 1600°C до: нижней части — 470°C ; центральной части — 680°C и верхней части — 900°C (рис. 3). После этого температура поверхности нижней и верхней части тела слитка поддерживается на том же уровне за счет теплового потока из центра. Температура поверхности центральной части поддерживается постоянной в течение следующих 5 часов, после чего плавно снижается со скоростью $15^{\circ}\text{C} / \text{ч}$. Это тепловое состояние сохраняется до полной кристаллизации и охлаждения центра слитка.

Разность температур в теле слитка определяет уровень термических напряжений, что необходимо учитывать при последующем нагреве. По результатам численной модели MAGMA максимальная разность температур в конце охлаждения в поперечном сечении в нижней и центральной части тела слитка совпадает и составляет 300°C (рис. 3). Перепад температур на начальном периоде охлаждения связан с переходом из жидкой фазы в твердую. Максимальная разность температур в продольном сечении слитка составляет 800°C в момент полной кристаллизации (рис. 4).

Завершение кристаллизации стали необходимо для определения остаточных напряжений с помощью разности температур в поперечном сечении слитка (в жидкой фазе напряжения отсутствуют).

Максимальная разность температур в продольном сечении слитка между прибыльной и донной частью слитка возникает через 8 часов с момента окончания разливки и составляет 980°C (рис. 5). Это также подтверждает направленный теплоотвод сверху вниз. Разность температур снижается до 800°C в течение следующих 6 часов и поддерживается на этом уровне до окончания кристаллизации.

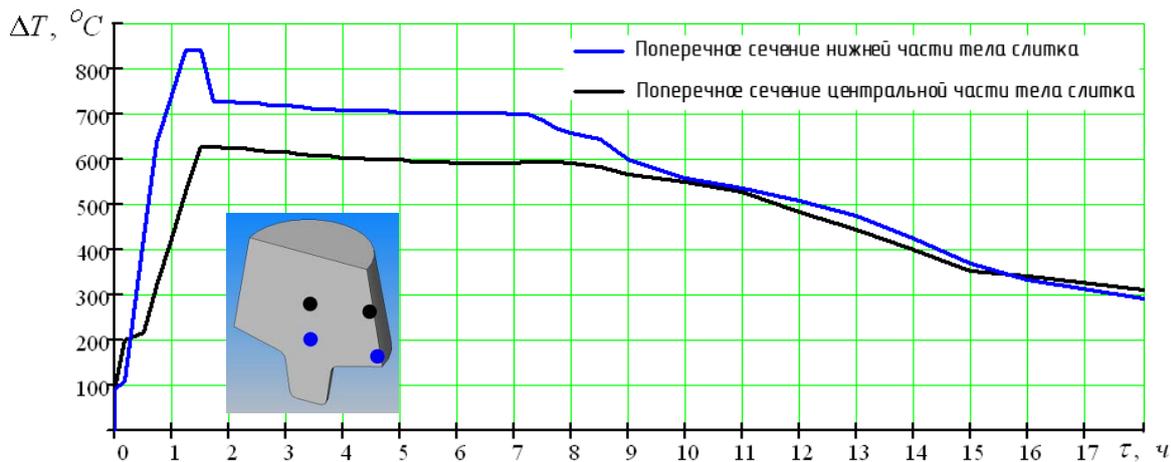


Рис. 3. Максимальная разность температур в поперечном сечении слитка

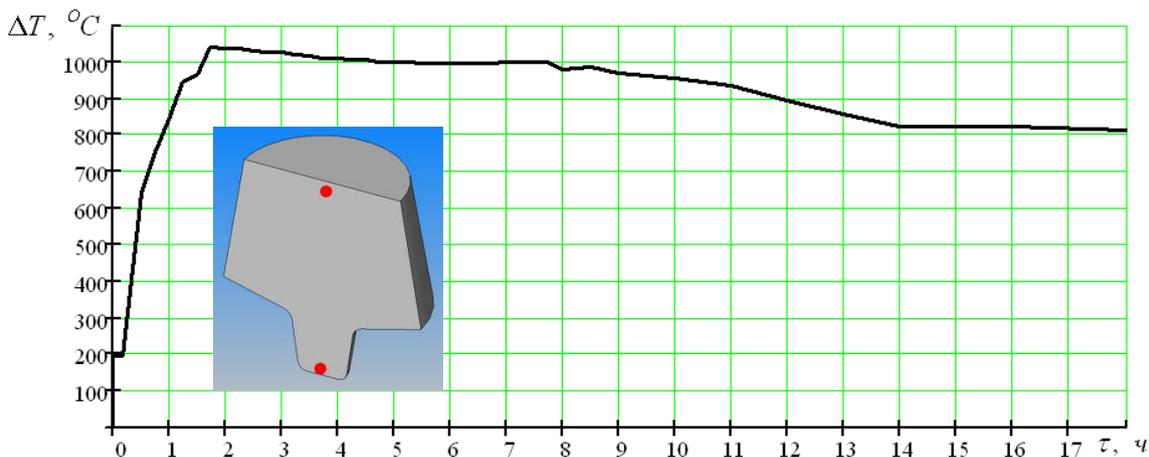


Рис. 4. Зависимость максимальной разности температур в продольном сечении слитка от времени охлаждения

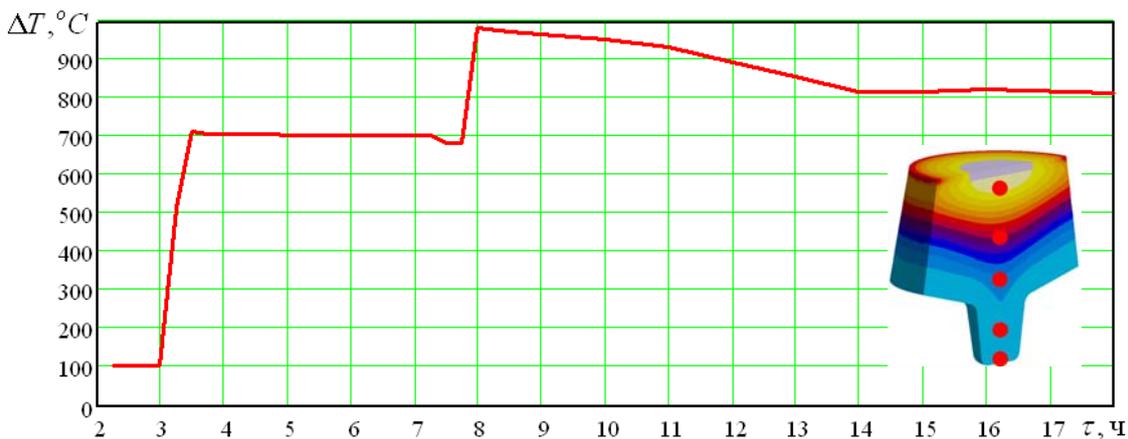


Рис. 5. Зависимость разности температур в вертикальном направлении слитка от времени охлаждения, учитывая только твердую фазу

Максимальная разность температур в радиальном направлении возникает через 3,5 часа после окончания разливки в нижней части тела слитка и составляет 710 °C, так как этот участок контактирует с охлаждаемым поддоном (рис. 6). Эта разность температур поддерживается в течение следующих 4 часов в нижней части тела слитка. После чего она плавно снижается до значения 300 °C. Максимальная разность температур в поперечном сечении

центральной части тела слитка возникает через 8 часов после окончания разливки и составляет 590 °С. Так же, как и нижняя часть слитка, разность температур монотонно снижается с той же интенсивностью до окончания кристаллизации. Максимальная разность температур в поперечном сечении центральной части слитка составляет 310 °С в конце процесса кристаллизации. Верхняя часть тела слитка, соответствующая точке 5 (см. рис. 2), кристаллизуется спустя 16 часов после разливки. Максимальная разность температур в поперечном сечении составляет 690 °С и поддерживается на том же уровне до окончания кристаллизации.

Максимальная разность температур в конце кристаллизации в продольном сечении слитка составляет 800 °С (рис. 5), а в поперечном сечении – 680 °С (рис. 6). Снижение разности температур в продольном и поперечном сечении слитка начинается через 7 часов от начала разливки (рис. 6). В связи с этим наиболее важным для определения остаточных напряжений является разность температур в нижней части тела слитка (донной части) (рис. 7). Эта разность спустя 7 часов после разливки снижается с 690 °С и составляет 280 °С на момент окончания кристаллизации. Разность температур в донной части составит 300 °С в момент посадки слитка в печь.

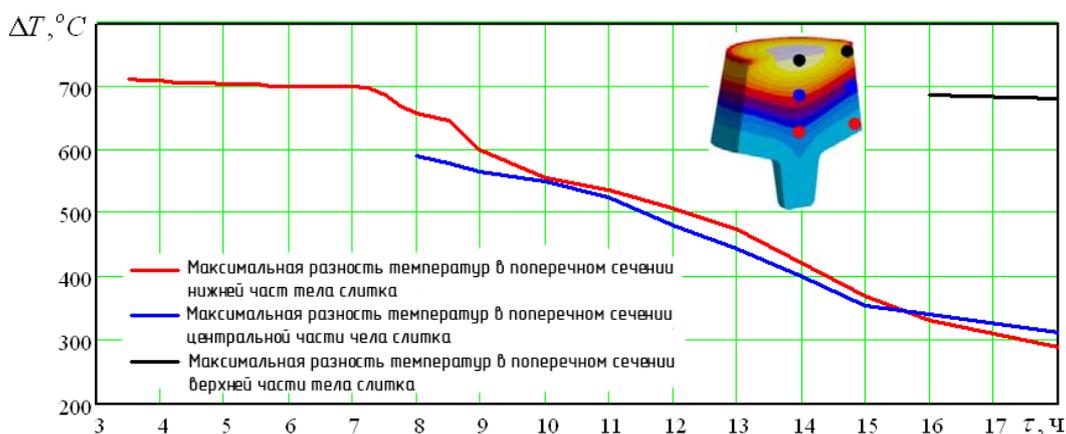


Рис. 6. Зависимость разности температур в радиальном направлении слитка от времени охлаждения, учитывая только твердую фазу

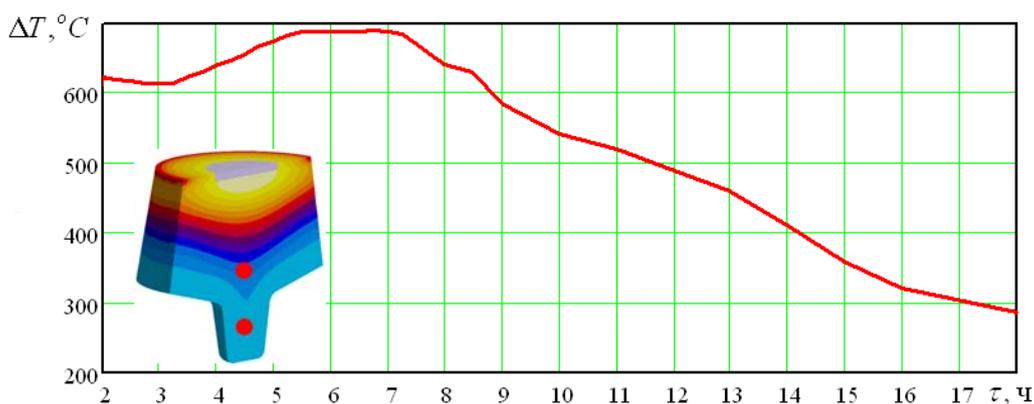


Рис. 7. Разность температур между 2-й и 3-й контрольными точками

Установлено, что в верхней части слитка высокотемпературное состояние слитка оказывают большое влияние на снижение напряжений. В дальнейшем расчете следует учитывать максимальную разность напряжений в нижней части тела слитка как в наиболее вероятном месте возникновения значительных температурных напряжений. Эта разность составляет 300 °С.

ВЫВОДЫ

В результате конечно-элементного моделирования установлено, что тепловой центр кристаллизации слитка локализуется в верхней части слитка при обеспечении направленной кристаллизации с низу в верх. Направленная кристаллизация исключает теплоотвод в радиальном направлении, что способствует уменьшению образования осевой рыхлости и уменьшению глубины усадочной раковины, которая составляет 5...7 % от высоты слитка. Большая часть объёма слитка кристаллизуется с постоянной разностью температур, не превышающей допустимых значений, которые могут привести к образованию внутренних разрывов. Максимальную температуру в процессе кристаллизации укороченного слитка с направленным теплоотводом имеет верхняя область слитка, а минимальную температуру – его донная часть. Снижение отвода тепла за счет теплоизоляции верхней и боковой поверхности слитка компенсируется интенсивным отводом тепла на поддон. В результате не происходит увеличение продолжительности кристаллизации в сравнении с временем кристаллизации обычного кузнечного слитка такой же массы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A comprehensive case study of macrosegregation in a steel ingot* / E. J. Pickering, C. Chesman, S. Al-Bermani, M. Holland, P. Davies, J. Talamantes-Silva // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2015. – В 46 (4). – P. 1860–1874. – <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0386-y>.
2. *Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr2Ni4MoV forging ingot* / Jiaqi Wang, Paixian Fu, Hongwei Liu, Dianzhong Li, Yiyi Li // *Materials and Design*. – 2012. – 35. – P. 446–456. [doi:10.1016/j.matdes.2011.09.056](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056).
3. *Ludwig A. On macrosegregation* / A. Ludwig, M. Wu, A. Kharicha // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2015. – A 46 (11). – P. 4854–4867. – [DOI: 10.1007/s11661-015-2959-4](https://doi.org/10.1007/s11661-015-2959-4).
4. *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. – 41. – P. 102–120. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.08.023>
5. *C. C. Berndt, W. Brindley, A. N. Goland, H. Herman, D. L. Houck, K. Jones, R. A. Miller, R. Nieser, W. Riggs, S. Sampath, M. Smith, S. Spanne* // *J. Therm. Spray Technol.* – 1992. – 1(4). – P. 341.
6. *Finke J. R., Swank W. D. Proc. Int. Thermal Spray Conf.* – Orlando, USA, ASM. – 1992. – P. 513.
7. *Form of gradient curve of temperature distribution of lengthwise the billet at differentiated heating before profiling by buckling* / V. Kukhar, V. Artiukh, O. Serduik, E. Balalayeva // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 165. – P. 1693–1704. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.911>.
8. *Flemings M. C. Solidification Processing* / M. C. Flemings // *Metallurgical Transactions*. – 1974. – Vol. 5, Issue 10. – P. 2121–2134. – <http://dx.doi.org/10.1007/BF02643923>.
9. *Sobolev V. V. Gas porosity formation kinetics in granule crystallization* / V. V. Sobolev // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 1991. – Vol. 30 (4). – P. 263–267. – <http://dx.doi.org/10.1007/BF00795952>.
10. *Sobolev V. V. The formation of coating shrinkage porosity in the process of thermal spraying* / V. V. Sobolev, J. M. Guilemany // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1996. – 58 Issue 2-3. – P. 227–232. – [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02100-0](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02100-0).
11. *Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation* / O. E. Markov, A. V. Perig, M. A. Markova, V. N. Zlygoriev // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 83. – Iss. 9-12. – P. 2159–2174. – <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5>.
12. *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>.
13. *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. – <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-017-0812-y>.