

УДК 621.735.043.016.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКЕ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ

И. В. Зенкин, Е. А. Наумова, В. В. Драгобецкий

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: zenkinivan@mail.ru

Выполнена сравнительная характеристика преимуществ и недостатков методов производства стальных мелющих шаров. Предложена новая модель штампа для штамповки шаров из головки рельса. Рассмотрены вопросы моделирования процесса осадки длинномерной заготовки произвольной формы в шар. Прогнозирование и исследование локальных характеристик деформируемой заготовки производилось методом конечных разностей. Использована узловая схема расчета. На каждом шаге интегрирования производилась проверка условия начала скольжения контактных поверхностей. Методами моделирования получены основные закономерности пластического течения, деформированного состояния и распределения характеристик напряженно-деформированного состояния металла при осадке заготовок с произвольной боковой поверхностью. Для эксперимента, применялась реологическая модель для вязкой среды, в качестве заготовки использовался разноцветный пластилин, а матрица была изготовлена из прозрачного плексигласа. Использование пластилина обосновано тем, что процесс объемной штамповки проводится в горячем состоянии, а текучесть горячего металла, подобна текучести пластилина.

Ключевые слова: мелющие тела, осадка заготовки, закономерности пластического течения, моделирование процесса осадки, метод конечных разностей, математическая модель.

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ОБ'ЄМНІЙ ШТАМПОВЦІ МЕЛЮЩИХ ТІЛ

І. В. Зенкин, О. О. Наумова, В. В. Драгобецький

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: zenkinivan@mail.ru

Виконана порівняльна характеристика переваг і недоліків методів виробництва сталевих мелючих куль. Запропоновано нову модель штампа для штампування куль з головки рельсу. Розглянуто питання моделювання процесу осадки довгомірної заготовки довільної форми в кулю. Прогнозування і дослідження локальних характеристик заготовки що деформується проводилось методом кінцевих різниць. Використана вузлова схема розрахунку. На кожному кроці інтегрування проводилася перевірка умови початку ковзання контактних поверхонь. Методами моделювання отримані основні закономірності пластичної течії, деформованого стану та розподілу характеристик напружено-деформованого стану металу при осадці заготовок з довільною бічною поверхнею. Для експерименту, застосовувалася реологічна модель для в'язкого середовища, в якості заготовки використовувався різнокольоровий пластилін, а матриця була виготовлена з прозорого плексигласу. Використання пластиліну обумовлено тим, що процес об'ємного штампування проводиться в гарячому стані, а текучість гарячого металу, подібна текучості пластиліну.

Ключові слова: мелючі тіла, осадка заготовки, закономірності пластичної течії, моделювання процесу осадки, метод кінцевих різниць, математична модель.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Металлургия – передовая отрасль Украины, а также она является одной из самых мощных в мире. Вместе с тем, многие её предприятия имеют устаревшее оборудование и технологии производства. Отстает от мирового уровня ассортимент и качество продукции. В последние годы отрасль переживает глубокий кризис, вызванный значительным уменьшением спроса на её продукцию. Проблем в отрасли очень много, но научно-технический и кадровый потенциал страны позволяют решить их. Черная металлургия была, есть и должна быть главным источником поступления финансов в страну. Для развития этой отрасли, Украине ничего не нужно импортировать из других стран, за исключением технологий производства и управления отраслью, а также в отдельных случаях, привлекать иностранных инвесторов [1].

В связи с высоким спросом на мелющие тела для шаровых мельниц, предприятия не справляются с выпуском нужного количества стальных шаров. С целью сокращения дефицита, была предложена новая конструкция штампа, для получения шаров из

железнодорожных рельсов. Данная технология обеспечивает высокое качество продукции и низкую себестоимость, так как в Украине много списанных рельсов, которые отправляют в металлолом [2].

Основные трудности осадки заготовок овальной, цилиндрической и призматической формы в калибрах криволинейной формы связаны с неравномерностью распределения напряжений и деформаций, а также наличием областей растягивающих напряжений. Это существенно повышает вероятность разрушения материала. Выявление таких зон возможно при определении напряженно-деформированного состояния по полю очага деформации [3].

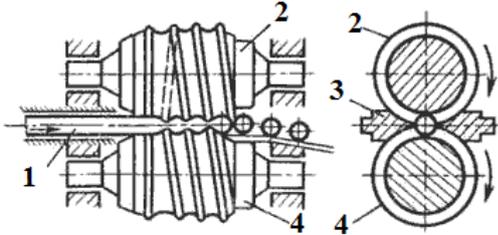
Целью работы является оценка возможности применения в производстве новой модели штампа; выявление зон с неравномерным распределением напряжений и деформаций; апробация математической модели процесса осадки в криволинейных калибрах.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В горнорудной промышленности и промышленности строительных материалов широко исполь-

зуються мелючіє тєла в формє шарєв діаметром 30–120 мм. Ізвєстні слєдуючіє мєтєды прєизводствє стальних мелючих шарєв [4]:

1. Винтовя прєкаткя;
2. Литьє шарєв;
3. Горячая обьємная штампєвка.

Винтовя прєкаткя – сущєстьє технологическогє прєцєссє заключается в том, что нагрєтый прутєк подается мєжду двумя вращающимися кєсєопєложєнными валкєми с винтовым калибром (рис. 1).



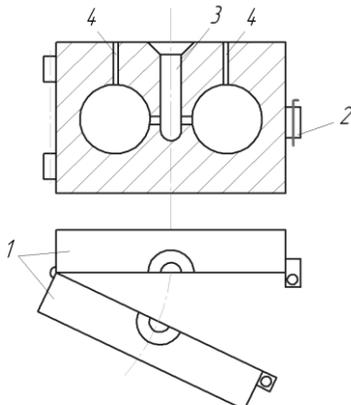
Рисунєк 1 – Схєма прєкаткє шарєв

Прєфиль калибра сєответствует формє и размерам прєкатываемогє шарє. Прутєк 1 захватывается валкєми 2, 4, вращается и одновременно продвигается по оси прєкаткє. Вслєдствие постєпенногє повышєния высєты ребєрды калибра заготовка обжємается, приобрєтая форму шарє, а затем отдєляется от прутєка. При этом за каждый оборєт прєкатывается один шар [5]. Для осєовогє перемещєния оси валков располагают под углом к оси вращения. От вылєта из валков заготовка прєдєхраняется центрирующими упорами 3. В валках нарезают винтовые калибры.

К прєимущєствам данногє спєсєба можно отнєсти: высєкую прєизводительность; отсутствие отхода мєтєлла в облєй; высєкое качєство и отнєсительно низкую сєбєстоимость изготєвления; низкие затраты труда.

Недостатком данногє спєсєба является возникновение неравномерно напряженной структурє шарє, вслєдствие чего шары в шарєвых мєльницах изнашиваются неравномерно.

Литьє шарєв – литые мелючіє тєла (рис. 2) изготєвливаются мєтєдами, позволяющими создавать условия направленной кристаллизации отливкє – литьєм в стационарный и вибрационный кокиль, а также мєтєдом центробєжного литья [4].



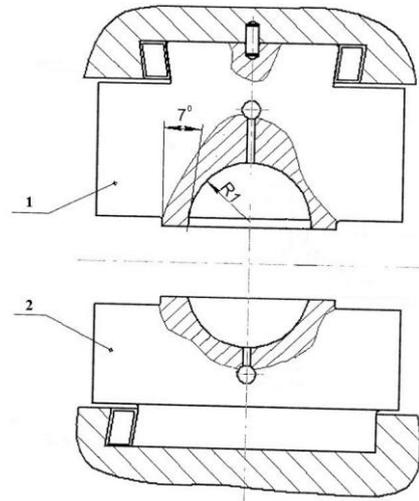
Рисунєк 2 – Схєма литья шарєв

Кєкиль состоит из двух полуформ 1. Полуформы взаимно центрируются и перед заливкой их соединяют замком 2. Размеры рабочей полости кєкиля больше размеров отливкє на величину усадкє сплава. Расплав заливает в кєкиль через литниковую систему 3, выполненную в его стенках. При заполнении кєкиля расплавом воздух и газы удаляются из его рабочей полости через вентиляционные каналы 4.

Прєимущєство данногє спєсєба заключается в том, что не требуются специальные стєны.

К недостаткам данногє спєсєба можно отнєсти: более энеггєзатратен, поскольку заготовку необходимо нагрєвать до температурє 1500°C; при данногє спєсєбе прєизводства шарєв не происходит упрочнение стали за сєчет обжєтия, что влияет на качєственные характеристики шарєв; не большя прєизводительность.

Горячая обьємная штампєвка – спєсєб обрєабєткє мєтєлла при помощи давления. Нагрєтая заготовка подвергается деформации, происходит изменение ее размеров и форм, для чего используется специальный инструмент – штамп (рис. 3) [6].



Рисунєк 3 – Схєма штампа для горячей обьємной штампєвки шарєв: 1 – подвижная часть штампа; 2 – неподвижная часть штампа.

Горячая обьємная штампєвка обычно применяется на массєвом или серийном прєизводстве. Этот спєсєб обеспєчивает высєкую точность формы конечного прєдукта и отличное качєство поверхности [7]. Возможна горячая обьємная штампєвка с использованием откєрытых и закєрытых штампов. Для штампєвки в откєрытом штампе характерно наличие переменного зазора мєжду неподвижной частью штампа и его подвижной частью. Зазєр служит для того, чтобы обеспєчить вытекание части мєтєлла, называемой облєом. При штампєвке в закєрытых штампах, прєцєсс деформации мєтєлла производится в полости штампа, которая остается полностью закєрытой [8]. При работе с закєрытыми штампами важно стрєгое соблюдение равенства обьємєв поковки и заготовки, в противном случае, если обнаружится недостаток мєтєлла, полость штампа не будет заполнена полностью, если же мєтєлла ока-

жется чрезмерно много, поковка будет иметь размер по высоте больший, чем требуется. При отрезке заготовки, должна быть обеспечена высокая точность [9].

К преимуществам данного способа можно отнести: более высокая производительность; высокая точность размеров; лучшее качество поверхности.

Недостатком данного способа является то, что штамп, как инструмент горячей штамповки, может быть использован для изготовления только одной поковки — той, для которой он и был спроектирован.

Горячая объемная штамповка с формированием облоя имеет следующие недостатки: технология включает дополнительную операцию по удалению облоя; увеличивается расход металла за счет того, что облой удаляется в отходы; шар на месте удаления облоя имеет неравномерно напряженную структуру, поскольку происходит нарушение целостности направления волокон стали при удалении облоя, так как в процессе закалки в местах разрыва волокон возникают множественные микроскопические трещины, которые в результате приводят к разрушению шара в процессе его эксплуатации.

В настоящее время разработана конструкция штампа для получения шаров из железнодорожных рельсов (P50, P60, P75) и начато их производство. Шары, изготовленные по этой технологии, обладают высокими эксплуатационными характеристиками и износостойкостью (рис. 4) [2].

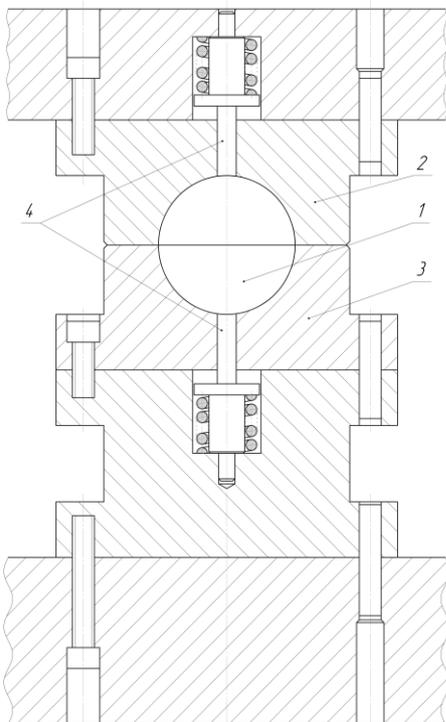


Рисунок 4 – Схема штампа для получения шаров из железнодорожных рельсов:

- 1 – полость штампа для формообразования шара;
- 2 – подвижная часть штампа; 3 – неподвижная часть штампа; 4 – выталкиватели

Авторами разработана математическая модель процесса осадки в криволинейных калибрах. Исследование локальных характеристик деформируемой заготовки производилось с использованием конечно-разностной модели. Выбиралась инерциальная система координат z^j ($j=1,2,3$), в которой задается положение осаживаемой заготовки. С осью симметрии и плоскостью нижнего торца заготовки связывается система лагранжевых координат y^α ($\alpha=1,2,3$). Все искомые величины определялись в узловых точках расчетной сетки, т.е. используется узловая схема [10]. Приращения перемещения узловых точек определяются из уравнений равновесия для каждого m, n, k -го узла заготовки записанных в разностной форме. При определении тензора приращения деформаций на каждом шаге интегрирования, последний разлагается на вязкие, пластические и термические компоненты. Вязкопластические компоненты тензора напряжений задаются формулами Мурнагана. Пластическое течение наступает при превышении октаэдрическими касательными напряжениями постоянной предела текучести материала при заданных условиях термомеханического деформирования [11].

В результате расчета, по разработанной модели [12], получили: распределение накопленной степени деформации в поперечных сечениях раската (рис. 5) и распределение степени использования запаса пластичности в поперечных сечениях раската (рис. 6).

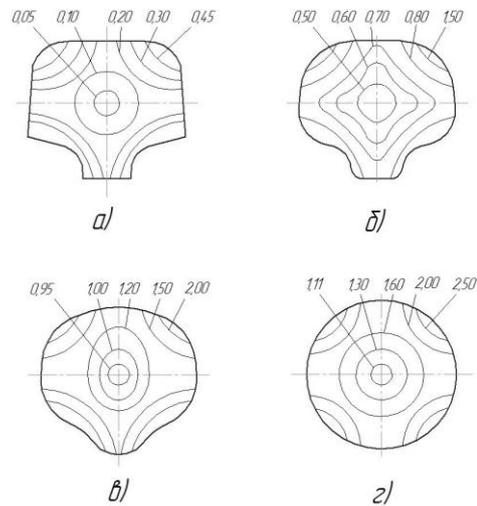


Рисунок 5 – Распределение накопленной степени деформации в поперечных сечениях раската:

- а) $x_1=8$ мм; б) $x_1=24$ мм; в) $x_1=56$ мм;
- г) $x_1=72$ мм

На каждом шаге интегрирования оценивалась возможность разрушения заготовки с использованием диаграммы предельных состояний и показателя схемы деформируемого состояния [12]. Кроме того производилась проверка условия начала скольжения контактных поверхностей. По С.И. Губкину [12] начало скольжения контактных поверхностей происходит при равенстве скоростей увеличения кон-

тактных поверхностей и уменьшении боковой в процессе осадки, т.е.:

$$dS_f > dS_w, \quad (1)$$

где S_f – суммарная торцевая поверхность; S_w – суммарная боковая поверхность.

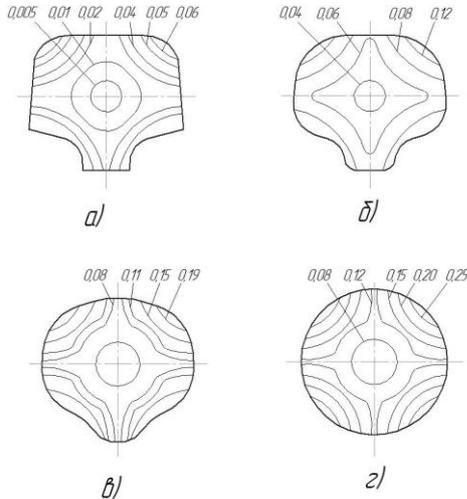


Рисунок 6 – Распределение степени использования запаса пластичности в поперечных сечениях раската: а) $x_1=8$ мм; б) $x_1=24$ мм; в) $x_1=56$ мм; г) $x_1=72$ мм

Решение задачи определения характера влияния температурного поля на деформационные слои осаживаемой заготовки рассматривается как задача теплопроводности. Решение последней сводится к интегрированию дифференциальных уравнений теплового баланса в объеме заготовки, при соответствующих краевых условиях на границах контакта с поверхностями калибра [3].

Для экспериментального подтверждения численного расчёта была изготовлена экспериментальная оснастка из прозрачного материала и проведено исследование течения вязко-пластичного материала (пластилина). Для выявления характеристик течения материала заготовка изготавливалась из столбцов разноцветного пластилина (рис. 7) [13].

Характер течения элементов представлен на рис. 8–12.

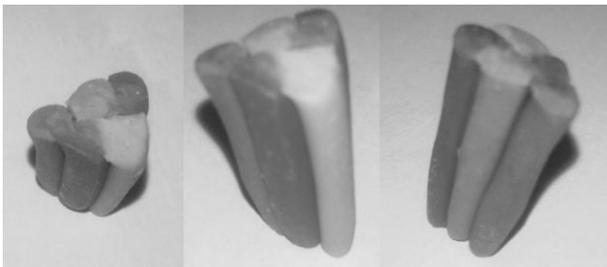


Рисунок 7 – Заготовка из столбцов разноцветного пластилина

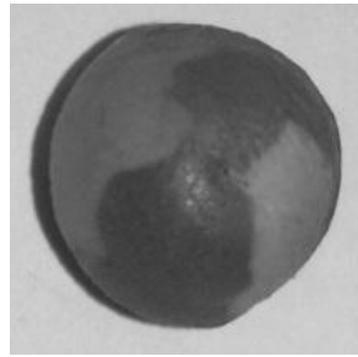


Рисунок 8 – Шар полученный методом осадки в калибр со сферической поверхностью из разноцветного пластилина

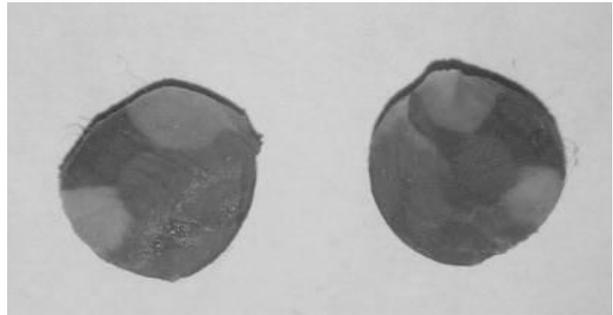


Рисунок 9 – Шар полученный методом осадки в калибр со сферической поверхностью из разноцветного пластилина в разрезе

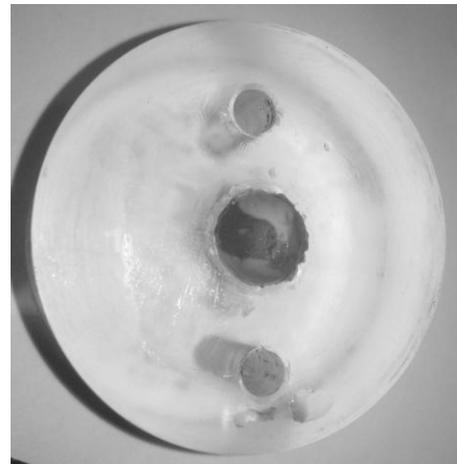


Рисунок 10 – Готовый шар из разноцветного пластилина в нижней половине штампа

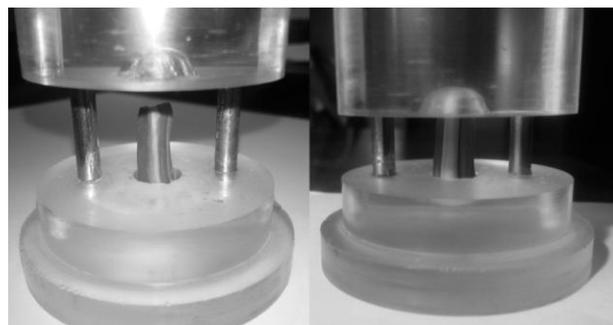


Рисунок 11 – Заготовка из столбцов разноцветного пластилина установленная в штамп

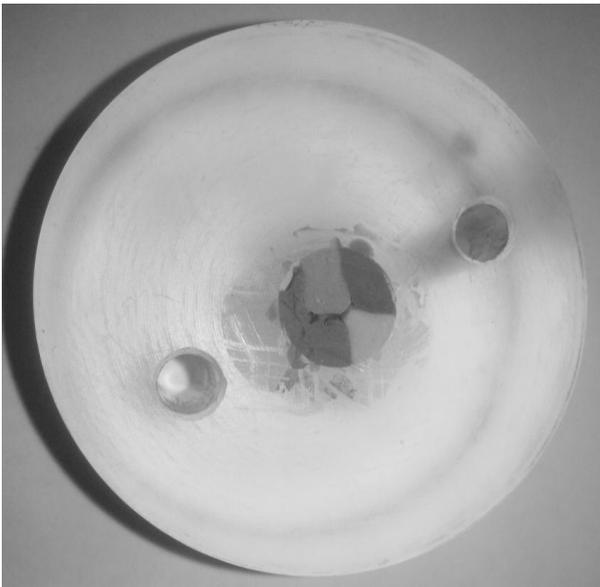


Рисунок 12 – Шар в разрізі із різноцвітної пластилини в нижній половині штамп

ВЫВОДЫ. Были произведены теоретические исследования в области производства мелющих шаров методом осадки в калибрах со сферической поверхностью. Разработана и применена математическая модель процесса осадки в криволинейных калибрах. Благодаря этому, получили распределение накопленной степени деформации в поперечных сечениях раската, а также распределение степени использования запаса пластичности в поперечных сечениях раската, что позволяет исследовать процесс формообразования шара и выбирать оптимальные параметры заготовки, это дает возможность сэкономить время и затраты на производство. Предложенная модель позволяет сформулировать основные закономерности пластического течения, деформированного состояния и распределения характеристик напряженно-деформированного состояния металла при осадке заготовок с произвольной боковой поверхностью. Это, в свою очередь, открывает возможность создания технологического процесса осадки заготовки с произвольной формой боковой поверхности в шар.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щипковский Е. В. Операции обработки давлением и выбор технологии предварительного профилирования // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського –

Кременчук: КрНУ, 2015. – Випуск 5 (94). – С. 100–105.

2. Новые технологии и оборудование для радиальнойковки слитков / А.М. Володин, В.А. Лазоркин, В.А. Сорокин, Н.П. Петров, А.С. Богдановский // КШП. ОМД. – 2006. – № 10. – С. 22–27.

3. Онищенко А.К., Мишулин А.А. Аналитическое исследованиековки крупныхпоковок с учетом температурной неоднородности материала // КШП. ОМД. – 2006. – №10. – С. 14–19.

4. Артеc А.Э., Третьохин В.В. Проблема совершенствования производства мелющих шаров. Вестник Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» – М: МГТУ, 2014. – Вып. 3 (30). – С. 50–55.

5. Семёнов Е.И. Ковка и горячая штамповка. – М.: МГИУ, 2011. – 414 с.

6. Константинов И.Л. Технологияковки и горячей объемной штамповки. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 551 с.

7. Excavator bucket teeth strengthening using a plastic explosive deformation / V. Dragobetskii, A. Shapoval, D. Mospan, O. Trotsko, V. Lotous // Metallurgical and Mining Industry, 2015, No. 4, pp. 363–368.

8. Onishenko A. K. Theoretical features for forgings large sized forgings. The 13th International Forgemasters Meeting, Pusan, Korea, October 12–16, 1997. V. I. P. 321–333.

9. Прогрессивные конструкции головок крепежных деталей и технологии их изготовления холодной объемной штамповкой / Е. Н. Хохлов, В.А. Макаров, В.В. Галкин // КШП. ОМД. – 2003. – №2. – С. 33–36.

10. Пасько А.Н., Алексеев Д.А. Математическое моделирование процессов гидравлической и гидромеханической формовки // КШП. ОМД. – 2011. – № 11. – С. 45–48.

11. Буханько А.А., Лошманов А.Ю., Хромов А.И. Расчет полей деформаций в задачах обработки материалов давлением при наличии особенностей поля скоростей перемещений // КШП. ОМД. – 2006. – № 9. – С. 22–27.

12. Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions / V. Dragobetskii, A. Shapoval, V. Zagoryanskii // Steel in Translation, 2015, Vol. 45, Issue 1, © Allerton Press, Inc., pp. 33–37.

13. Шнейберг А. М. Экспериментальные исследования предельной пластичности при осадке без кручения и с кручением / А.М. Шнейберг, Ф.П. Михаленко, Д. А. Щербатов // КШП. ОМД. – 2012. – №1. – С. 18–25.

THE INVESTIGATION OF THE DEFORMED STATE DURING THE VOLUME STAMPING OF GRINDING BODIES.

I. Zenkin, E. Naumova, V. Dragobetskiy

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: zenkinivan@mail.ru

Purpose. To consider the advantages and disadvantages of the existing methods of production of steel grinding bodies. To offer a new model of the stamp. To develop a mathematical model of the upsetting in curvilinear calibers.

Methodology. The mathematical modeling of upsetting in curvilinear calibers has been used. The investigation of the local characteristics of the deformable workpiece was carried out using the finite-difference model. The verification of the condition of the contact surfaces sliding was performed at each step of the integration. **Results.** A mathematical

model of upsetting in curvilinear calibers has been developed. The calculation according to the developed model resulted in the following: the distribution of the accumulated degree of deformation in the cross-sections of rolled and distribution of the degree of usage of the plasticity stock in the cross-sections of rolled. This allows to study the process of shaping the ball and choose the optimal parameters of the workpiece that will save time and costs of production. **Originality.** Theoretical researches in the field of production of grinding balls by upsetting in the calibers with a spherical surface were carried out for the first time, as well as a mathematical model of the process of upsetting was developed. **Practical value.** The design of the stamp to obtain balls of rails (P50, P60, P75) has been developed and production of steel grinding balls has been started. The balls made by this technology have a high performance and durability, which is proved by the experimental studies. **Conclusions.** The proposed model allows to formulate the basic laws of plastic flow, strained state and distribution of characteristics of the stress-strained state of metal at upsetting of workpieces with an arbitrary side surface. This, in turn, opens the possibility of creating a technological process of upsetting of workpiece with an arbitrary shape of the lateral surface into a ball. References 13, Figure 13.

Key words: grinding bodies, upsetting of a workpiece, plastic flow laws, modeling of upsetting, the finite difference method, a mathematical model.

REFERENCES

1. Schipkovskiy, Y. (2015), "Operations pressure processing and choice of the preliminary profiling technology", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 5 (94), pp. 100–105.
2. Volodin, A.M., Lazorkin, V.A., Sorokin, V.A., Petrov, N.P. and Bogdanovskiy, A.S. (2006), "New technologies and equipment for radial ingots forging", *Journal "Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure"*, no. 10, pp. 22–27.
3. Onischenko, A.K. and Mishulin, A.A. (2006), "Analytical study of large-size forgings forging considering the temperature inhomogeneity of the material", *Journal "Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure"*, no. 10, pp. 14–19.
4. Artes, A.E. and Tretyuhin, V.V. (2014), "The problem of improving the production of grinding balls", *Transactions of Moscow Technological State University*, issue.3, no. 30, pp. 50–55.
5. Semyonov, E.I. (2011), *Kovka i goryachaya shtampovka* [Hammering and hot stamping], MGIU, Moscow, Russia.
6. Konstantinov, I.L. (2014), *Tehnologiya kovki i goryachey ob'emnoy shtampovki* [Hammering and hot forging, technology], INFRA-M, Moscow, Russia.
7. Dragobetskii, V.V., Shapoval, A.A., Mospan, D.V., Trotsko, O.V. and Lotous, V.V. (2015), "Excavator bucket teeth strengthening using a plastic explosive deformation", *Metallurgical and Mining Industry*, no. 4, pp. 363–368.
8. Onishenko, A.K. (2007), "Theoretical features for forgings large III sized forgings", *The 13th International Forgemasters Meeting*, Pusan, Korea, pp. 321–333.
9. Hohlov, E.N., Makarov, V.A. and Galkin, V.V. (2003), "Progressive designs of fastener heads and their cold forging, production technologies", *Journal "Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure"*, no. 2, pp. 33–36.
10. Pasko, A.N. and Alekseev, D.A. (2011), "Mathematical modeling of hydraulic and hydro-mechanical forming", *Journal "Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure"*, no. 11, pp. 45–48.
11. Buhanko, A.A., Loshmanov, A.Yu. and Hromov, A.I. (2006), "Calculation of deformation fields during materials pressure treatment with singularities in the velocity field", *Journal "Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure"*, no. 9, pp. 22–27.
12. Dragobetskii, V.V., Shapoval, A.A. and Zagoryanskii, V.G. (2015), "Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions", *Steel in Translation*, vol. 45, iss. 1, pp. 33–37.
13. Shneyberg, A.M., Mihalenko, F.P. and Scherbatov, D.A. (2012), "Experimental studies of the limit plasticity at upsetting with and without torsion", *Journal "Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure"*, no. 1, pp. 18–25.

Стаття надійшла 19.01.2016.