

УДК 621.77

С.А. Морозов, А.С. Морозов

Ижевский государственный технический университет
им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия

РАЗРАБОТКА ПРОГРЕССИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НЕФТЯНЫХ НАСОСОВ

Разработана прогрессивная технология изготовления деталей модуля нефтяных насосов методом безоблойной изотермической штамповки. Модуль насоса включает детали «аппарат направляющий» и «колесо рабочее». Наиболее сложной в изготовлении является деталь «Колесо рабочее», потому что она имеет узкие лопасти с малым радиусом закругления. Проанализированы условия работы нефтяных насосов, выбран материал для деталей модуля, наилучшим образом отвечающий эксплуатационным требованиям. Сделан обзор возможных технологий изготовления деталей модуля. Выбран вариант технологии, основанный на изотермической штамповке. Технология проверена математическим моделированием в системе QForm.

Ключевые слова: насос, алюминиевый сплав, изотермическая штамповка, литье,ковка, нагрев, математическое моделирование, деформация, усилие, мощность, оснастка.

S.A. Morozov, A.S. Morozov

Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov,
Izhevsk, Russian Federation

DEVELOPMENT OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY PARTS OIL PUMP

Developed advanced technology manufacturing parts oil pump module by isothermal forging burr. Pump module includes details of "The unit guide" and "Wheel of working". The most difficult part is to produce "Wheel of working" because it has a narrow blade with small radii of curvature. The conditions of work of oil pumps, the material selected for the details of the module that best meet the performance requirements. A review of possible technology manufacturing parts of the module. Selected technology based on isothermal forging. Technology tested mathematic modeling system QForm.

Keywords: pump, aluminum alloy, isothermal forging, casting, forging, heat, mathematical modeling, deformation, force, power, snap.

Основными элементами нефтяных насосов являются детали «аппарат направляющий» и «колесо рабочее» (рис. 1).



Рис. 1. Детали модуля насоса: «аппарат направляющий» и «колесо рабочее» (а) и разрез детали «колесо рабочее» (б)

Данные детали составляют модуль насоса. Количество таких модулей зависит от глубины залегания полезных ископаемых и, соответственно, от величины давления, которое позволит их добывать. Номенклатура данных деталей довольно широка.

Применение нефтяных насосов при откачке пластовой жидкости происходит в условиях:

- высокой обводненности (свыше 85 %);
- осложнения нефтедобычи отложениями солей и асфальто-смоло-парафиновыми отложениями;
- средней и высокой степени вязкости жидкости и образования эмульсий;
- осложнения нефтедобычи выносом неабразивных мехпримесей (глинами).

Наилучшим материалом для деталей модуля насоса при учете условий эксплуатации изделия является алюминиевый сплав Д16Т, ГОСТ 4784–97 (дюралюмин). Преимуществом алюминиевых сплавов является полное отсутствие коррозионного поражения при эксплуатации в среде полного насыщения сероводородом и углекислым газом. Сплав широко используется для большинства силовых элементов конструкций. Он пластичен и вследствие этого обладает высокими усталостными характеристиками. Д16Т имеет высокую твердость

и прочность, но уступает по этим параметрам заготовкам из сплава ВД95Т1 в особо твердом состоянии после искусственного старения и закалки. При повышении температуры более 120 °С Д16Т проявляет лучшие механические свойства и не имеет себе равных в температурном интервале до 250 °С.

Чтобы получить дюралюминий Д16Т, сплав Д16 нагревают до температуры 500 °С и подвергают закалке в воде. Механическая прочность достигается искусственным или естественным старением. Временное сопротивление деформации сплава 420 МПа (43 кгс/мм²). Предел текучести 296 МПа (30 кгс/мм²). Предел прочности 430 МПа (44 кг/мм²).

По базовой технологии детали модуля насоса получают литьем. Однако прочностные характеристики литьевых деталей недостаточны для обеспечения надежной их работы в агрессивных средах. В связи с этим проектировалась технология получения деталей объемной штамповкой [1, 2]. Проверка разработанных технологий проводилась с помощью математического моделирования, которое позволяет отказаться от дорогостоящего физического моделирования и исследовать напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе штамповки, а также проводить оптимизацию параметров, влияющих на процесс [3–7]. В качестве инструментария использовалась система QForm [8–10].

Наиболее сложной в изготовлении является деталь «рабочее колесо», потому что она имеет узкие лопасти с малым радиусом закругления.

Детали модуля насоса можно изготовить свободной ковкой с последующей механической обработкой, но при этом коэффициент использования металла составит лишь 0,23. Повысить коэффициент до значения 0,59 можно, если использовать в качестве процесса изготовления горячую объемную штамповку на гидропрессе за два перехода. Однако при этом наблюдается незаполнение ручья штампа в краевых зонах лопастей колеса.

При охлаждении заготовки повышается сопротивление деформированию металла, сила и работа деформации. Возникает неоднородность температурного поля и прочностных свойств в объеме заготовки, что приводит к неравномерному течению и понижению пластичности обрабатываемого металла. Интенсивность остывания заготовки тем больше, чем больше отношение ее поверхности к объему. Подстыва-

ние заготовки может резко менять характер течения металла при пресовании, способствуя образованию нежелательной жесткой зоны в углах между заготовкой и инструментом.

Стремление предотвратить или уменьшить остывание нагретой заготовки заставляет проводить деформирование с высокими скоростями движения инструмента. Однако повышение скорости деформации вызывает увеличение сопротивления деформированию, что объясняется уменьшением времени протекания разупрочняющих процессов.

Деформирование с высокой скоростью приводит к увеличению теплового эффекта работы пластической деформации и контактного трения. Тепловой эффект работы пластической деформации локализуется в зонах наибольшей деформации заготовки, что увеличивает неравномерность течения металла. Тепловыделение на контакте между металлом и инструментом повышает температуру поверхностного слоя последнего и понижает его стойкость.

С целью компенсации остывания заготовки ее можно нагреть до более высокой температуры, чем требуется для деформирования. Но при этом повышается интенсивность взаимодействия металла с окружающей средой, что приводит к увеличению окалины и насыщению вредными примесями.

Наиболее эффективным средством уменьшения отвода теплоты от нагретой заготовки является нагрев инструмента. Повышение температуры нагрева штампов способствует понижению требуемой для деформирования силы, увеличивает однородность деформации и улучшает затекание металла в узкие полости штампа [11]. Наилучшие условия достигаются при нагреве инструмента до температуры деформации. В этом случае охлаждение нагретой заготовки в процессе деформирования исключается и условия деформации можно считать близким к изотермическим.

Обзор имеющегося опыта штамповки алюминиевых сплавов [11–14] показал, что изготовление деталей с узкими выступами и отроутками успешно решается изотермической штамповкой. Изотермическая штамповка – это процесс горячего деформирования заготовок деталей в инструменте, температура которого находится в пределах рекомендуемого температурного интервала горячего деформиро-

вания штампуемого материала, при относительно невысоких скоростях деформирования, как правило, не превышающих 5 мм/с¹.

Изотермическая штамповка позволяет получать заготовки деталей сложной конфигурации – поковки с отрезками, ребрами и другими элементами, геометрия которых не позволяет применять для изготовления обычные методы горячей объемной штамповки. За счет нагрева инструмента до температуры горячей штамповки материал не остывает при заполнении тонких полостей штампа, что позволяет подобрать оптимальные режимы штамповки, как по скорости деформирования, так и по нагреву материала. При разработке технологии изотермической штамповки деталей в закрытых штампах необходимо учитывать возможные проблемы, связанные со сложным характером течения материала при заполнении тонких полостей штампа. Штамповка в изотермических условиях алюминиевых и магниевых сплавов применяется, как правило, для получения поковок без штамповочных уклонов.

Математическое моделирование безоблойной штамповки детали «колесо рабочее» показано на рис. 2. Радиус закругления на переходе относительно мал, и для корректного расчета необходимо задать высокую адаптацию конечных элементов как в инструменте, так и в заготовке. В противном случае конечные элементы могут выходить за границу инструмента. Проектировался и проверялся вариант технологии получения поковки за один переход, позволяющий устранить возможное смещение заготовки при штамповке за два перехода.

Материал – алюминий Д16Т ГОСТ 4784–97, группа стали – М2; степень точности – Т4; степень сложности – С2; расчетная масса поковки – 0,039 кг; индекс по ГОСТ 7505-89–13. По ГОСТ 21488–97 «Прутки из прессованного алюминия и алюминиевых сплавов» был выбран круг диаметром 65 и длиной заготовки 7 мм. При построении модели штампов учитывалась усадка 1,5 %. В качестве оборудования для изготовления поковки был выбран гидравлический пресс с усилием 250–300 тс. Задавалась смазка mineral oil (минеральное масло) для горячей объемной штамповки алюминия. Температура металла – 550 °С, температура штампов аналогична температуре заготовки. Охлаждение перед началом – на воздухе 1 с (перенос заготовки из нагревателя на штамп).

¹ РТМ 1.4.1644. Изотермическая объемная штамповка алюминиевых и магниевых сплавов.

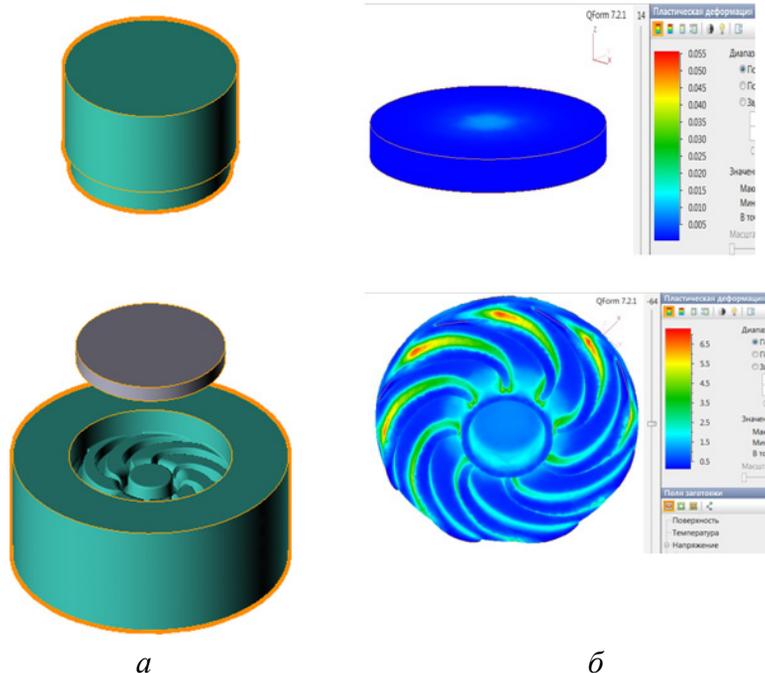
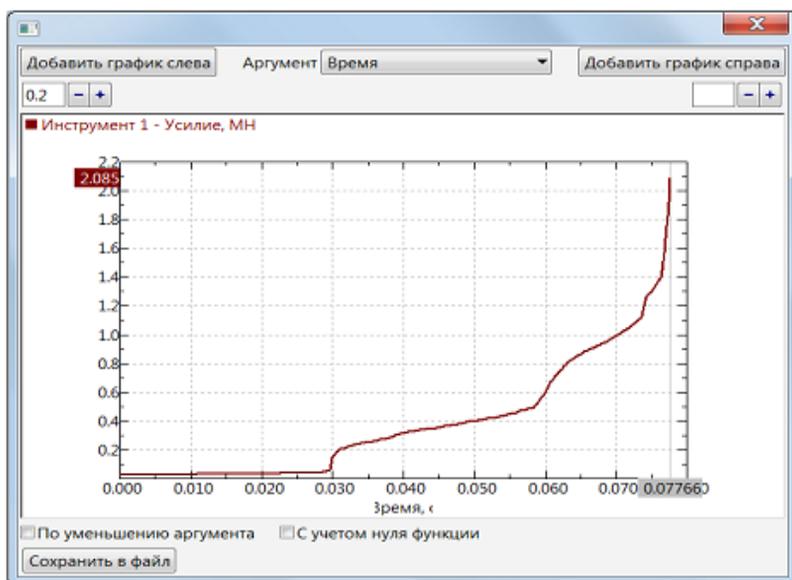


Рис. 2. Моделирование процесса: *а* – 3D-модели инструмента и заготовки; *б* – распределение деформаций в заготовке в начале и в конце штамповки

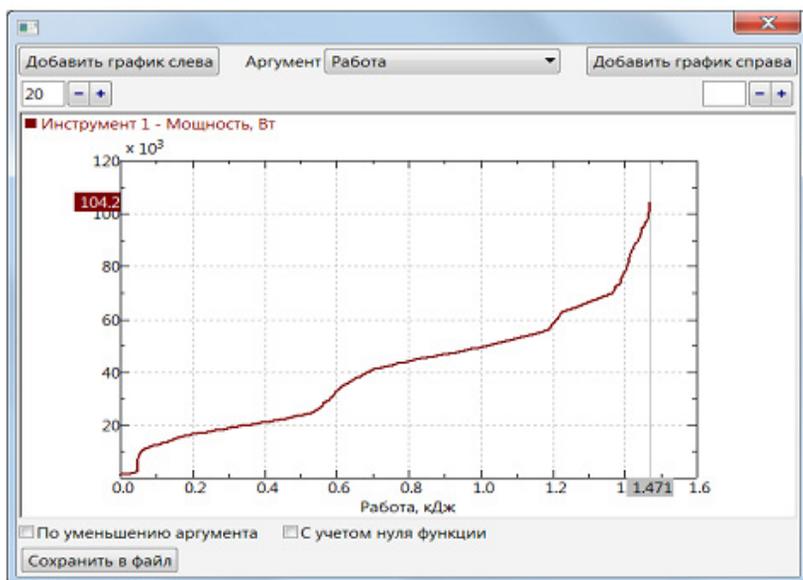
Формообразование лопаток осуществляется по схеме прямого выдавливания в нижнем инструменте. Обратное выдавливание является энергетически более выгодной схемой деформирования, однако из-за сложности проектирования пуансона с длинными тонкими ребрами, находящимися на периферии, было решено разместить гравюру, соответствующую образованию лопаток, в нижнем инструменте. Силовые параметры процесса представлены на рис. 3.

Аналогичным образом было проведено моделирование процесса изотермической штамповки детали «аппарат направляющий». Материал: алюминий Д16Т, ГОСТ 4784–97; группа стали – М2; степень точности – Т4; степень сложности – С2; расчетная масса поковки – 0,22 кг; индекс по ГОСТ 7505-89–13.

Расчет размеров заготовки проводился по ГОСТ 21488–97 «Прутки из прессованного алюминия и алюминиевых сплавов». Был выбран круг диаметром 75 мм и длиной заготовки 18 мм. При построении модели штампов учитываем усадку 1,5 %. Оборудование – гидравлические прессы с усилием от 250–300 тс.



a



б

Рис. 3. Силовые параметры процесса: *a* – зависимость усилия деформации от времени; *б* – зависимость мощности от времени

Для горячей объемной штамповки алюминия использована смазка mineral oil. Температура металла – 550 °С, температура штампов аналогична температуре заготовки. Охлаждение перед началом – на воздухе 1 с (перенос заготовки из нагревателя на гравюру штампа). На рис. 4 показаны результаты моделирования штамповки детали «аппарат направляющий».

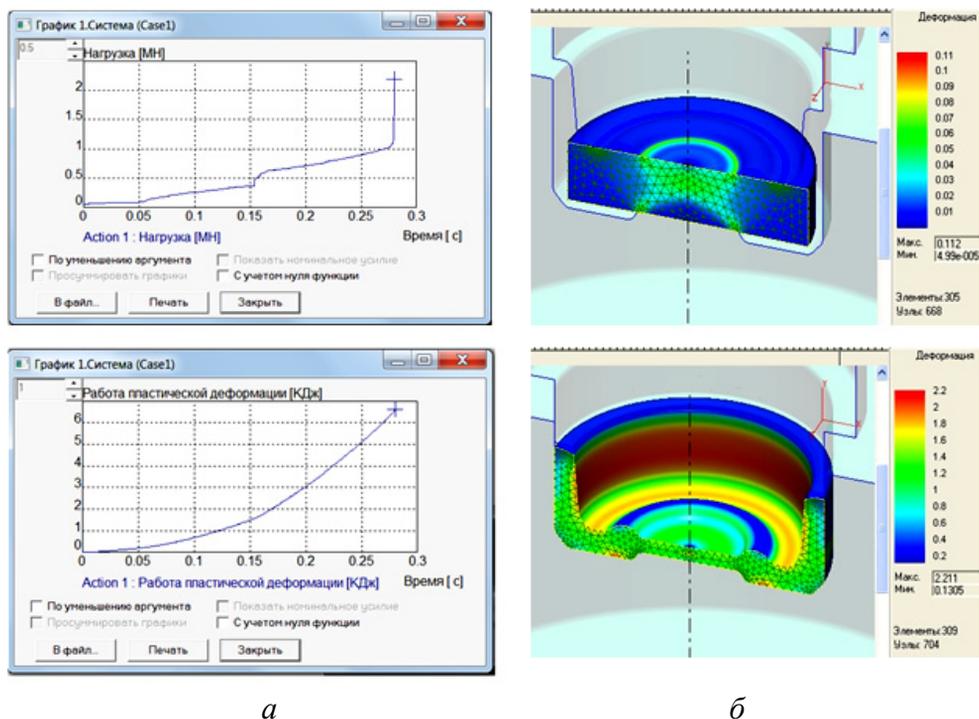


Рис. 4. Моделирование процесса штамповки детали «аппарат направляющий»: *а* – графики усилия деформации и работы от времени; *б* – распределение деформаций в заготовке в начале и в конце штамповки

При изотермической штамповке инструмент нагревается до температуры заготовки, обычные инструментальные стали не могут быть использованы для изготовления штампов из-за их недостаточной стойкости. Для инструмента используются теплостойкие или жаропрочные стали.

При изотермической штамповке алюминиевых сплавов рабочий инструмент изготавливают из теплостойких сталей марок 5ХНВ (5ХНМ), 4Х5В2ФС и др.

Алюминиевые поковки, полученные штамповкой в изотермических условиях, характеризуются повышенной точностью. Для их получения требуется меньшая сила деформирования по сравнению с традиционными методами горячего деформирования. Это обусловлено тем, что в изотермических условиях наблюдается значительное увеличение пластичности деформируемого металла, снижение его сопротивления деформации и уменьшение контактного трения. Эффективность технологии проявляется и в том, что норма расхода металла уменьшается более чем в два раза по сравнению с горячей объемной штамповкой и на 25–30 % уменьшается трудоемкость последующей обработки резанием.

Указанные особенности изотермической штамповки обуславливают следующие технологические и технико-экономические ее преимущества:

- возможность штамповки деталей сложной формы с тонкими ребрами и полотнами, выступами и полостями, резкими перепадами сечений, получение которых при обычной штамповке невозможно или затруднено;

- устранение ограничений по допустимой степени деформации за один переход;

- снижение напусков, допусков, возможность повышения геометрической точности штампованных заготовок до степени обработки резанием;

- снижение расхода металла и повышение коэффициента его использования;

- снижение износа штампов и повышение их стойкости.

Проведенное математическое моделирование безоблойной изотермической штамповки деталей «аппарат направляющий» и «колесо рабочее» позволило сделать следующие выводы:

1. Дефектов при штамповке не обнаружено, гравюра штампов заполняется полностью.

2. Температура нагрева заготовки должна быть в пределах 480–550 °С.

3. Штамповую оснастку следует проектировать со встроенным индуктором, чтобы не допустить быстрого остывания заготовки. Температура нагрева штамповой оснастки должна быть в пределах 480–550 °С.

4. Рекомендуемое оборудование для штамповки – гидравлический пресс с усилием 250–300 тс.

5. Применение деталей модуля насоса, изготовленных безоблойной изотермической штамповкой, позволяет увеличить наработки на отказ и снизить стоимость ремонта насосов по сравнению с аналогами, изготовленными другими способами обработки.

Список литературы

1. Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. Т. 2. Горячая штамповка / под ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение, 1986. – 1986. – 592 с.

2. Семенов Е.И. Ковка и горячая штамповка: учебник. – М.: Изд-во МГИУ, 2011. – 414 с.

3. Морозов С.А. Автоматизированное проектирование процессов ОМД // Материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 50-летию ИжГТУ (19–22 февр. 2002 г.): в 5 ч. Ч. 2. Инновационные технологии в машиностроении и приборостроении. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2002. – С. 185–190.

4. Морозов С.А. Системы автоматизированного проектирования процессов ОМД // Заготовительное производство в машиностроении. – 2004. – № 11. – С. 26–29.

5. Морозов С.А., Малина О.В. Развитие подходов к автоматизации проектирования технологических процессов обработки металлов давлением // Интеллектуальные системы в производстве. – № 2 (18). – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011. – С. 135–140.

6. Morozov S.A., Malina O.V. Structural synthesis of pressure metal forming processes // University review. Series: Technical science. Vol. 5, No. 1 / Alexander Dubček University of Trenčín. – Slovak Republic, Trenčín, 2011. – P. 8–12.

7. Morozov S.A., Karavayeva A.S., Evseev I.S. Mathematical modeling of forging in the QForm program // Fourth Forum of Young Researchers. In the framework of International Forum “Education Quality – 2014”: proceedings (April, 23, 2014, Izhevsk, Russia). – Izhevsk: Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2014. – P. 308–310.

8. Морозов С.А., Шеногин В.П. Использование программы QForm при обучении студентов специальности 120400 // Состояние и проблемы развития профессионального образования в системе мно-

гоуровневой подготовки специалистов: материалы всерос. науч.-метод. конф. (9–10 дек. 2003): в 4 ч. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2003. – Ч. 4. – С. 389–392.

9. Программа QForm и использование ее в промышленности и в учебном процессе / С.А. Стебунов [и др.] // Высокие технологии – 2004: сб. тр. науч.-техн. форума с междунар. участием: в 4 ч. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2004. – Ч. 4. – С. 93–99.

10. Debin Shan, Yan Lu, Lui Fang. Research on Isothermal Fully-Enclosed Die Forging of a Rotor with Blade // Proc. 7th Intern. Conf. on Technology of Plasticity, Oct. 27–Nov. 1, 2002. – Yokohama, 2002. – P. 109–114.

11. Нестеров В.С., Кривов Н.А., Кропинов В.Е. Опыт штамповки деталей из алюминиевых и магниевых сплавов в изотермических условиях // Кузнечно-штамповочное производство. – 1977. – № 5. – С. 26–27.

12. Мамаев В.Б., Кочетков В.А., Первов М.Л. Методика и установка для испытаний материалов деформирующего инструмента для изотермической штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2006. – № 8. – С. 4–10.

13. Morozov S.A., Malina O.V. Of computer aided development of metal process methods by pressure shaping according to any set of initial restrictions // 1st International Conference advances in Mechatronics, 16–18 august 2006. – Trenčín, Slovakia, 2006. – P. 43.

14. Shan D.B., Xu W.C., Lu Y. Study on precision forging technology for a complex-shaped light alloy forging // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 151, iss. 1–3. – P. 289–293.

References

1. Semenov E.I. Forging and Stamping: A Handbook [Forging and Stamping: A Handbook]. In 4 Vols. Vol.2 Hot Stamping [Hot Stamping]. Pod redaktsiei E.I. Semenov. Moscow: Engineering, 1986. 592 p.

2. Semenov E.I. Forging and hot stamping: a textbook [Forging and hot forming: a textbook]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta, 2011. 414 p.

3. Morozov S.A. Computer-aided design of metal forming processes [Automated design of metal forming processes]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posviashchennoi 50-letiiu Izhevskogo*

gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (19–22 fevr. 2002 g.) v 5 ch. Ch. 2. Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii i priborostroenii [Innovative technologies in mechanical engineering and instrument making]. Izhevsk: Izdatel'stvo Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova, 2002, pp. 185-190.

4. Morozov S.A. Computer-aided design of metal forming processes [Computer-aided design of metal forming processes]. *Blank production in mechanical engineering*, 2011, no. 11, pp. 26-29.

5. Morozov S.A., Malina O.V. Development of approaches to automate the design process of metal forming [The development of approaches to design automation of technological processes of processing of metals pressure]. *Intelligent systems in production*. Izdatel'stvo Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova, 2011, pp. 135-140.

6. Morozov S.A., Malina O.V. Structural synthesis of pressure metal forming processes. *University review. Series: Technical science. Vol. 5, No. 1. Slovak Republic. Trenčín: Alexander Dubček University of Trenčín*, 2011, pp. 8-12.

7. Morozov S.A., Karavayeva A.S., Evseev I.S. Mathematical modeling of forging in the QForm program. *Fourth Forum of Young Researchers. In the framework of International Forum "Education Quality – 2014": proceedings (April, 23, 2014, Izhevsk, Russia)*. Izhevsk: Publishing House of Kalashnikov Izhevsk state technical University, 2014, pp. 308-310.

8. Morozov S.A., Shenogin V.P. Using QForm in teaching students majoring 120400 [The use of the program QForm when teaching students majoring 120400]. *Sostoianie i problemy razvitiia professional'nogo obrazovaniia v sisteme mnogourovnevoi podgotovki spetsialistov: materialy vserossiiskoi nauchno-metodicheskoi konferentsii (December 9-10, 2003)*. At 4 pm. Izhevsk: Izdatel'stvo Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova, 2003, pp. 389-392.

9. Morozov S.A., Stebunov S.A., Biba N.V. QForm program and its utilization of the industry and in the educational process [The program QForm and its use in industry and in the learning process]. *Sbornik trudov nauchno-tekhnicheskogo foruma s mezhdunarodnym uchastiem "Vysokie tekhnologii-2004"*. At 4 pm. Part 4. Izhevsk: Izdatel'stvo Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova, 2004, pp. 93-99.

10. Debin Shan, Yan Lu, Lui Fang. Research on Isothermal Fully-Enclosed Die Forging of a Rotor with Blade. Proc. 7th Intern. Conf. on Technology of Plasticity, Oct. 27-Nov. 1, 2002, Yokohama, Japan, 2002, no. 1, pp. 109-114.8.

11. Nesterov V.S., Krivov N.A., Kropina V.E. Experience stamping parts from aluminum and magnesium alloys under isothermal conditions [The experience of stamping parts made of aluminum and magnesium alloys under isothermal conditions]. *Forging and Stamping Production*, 1977, no. 5, pp. 26-27.

12. Mamaev V.B., Kochetkov V.A., Petrov M.L. Methods and apparatus for testing materials deforming tool for isothermal forging [Method and apparatus for testing of materials deforming tool for isothermal forging]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo.Obrabotka materialov davleniem*, 2006, no. 8, pp. 4-10.

13. Morozov S.A., Malina O.V. Of computer aided development of metal process methods by pressure shaping according to any set of initial restrictions . *1st International Conference advances in Mechatronics, 16-18 august 2006. Trenčín, Slovakia*, 2006. 43 p.

14. Shan D.B., Xu W.C., Lu Y. Study on precision forging technology for a complex-shaped light alloy forging. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 151, pp. 289-293.

Получено 06.05.2015

Морозов Сергей Александрович (Ижевск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением и сварочное производство» Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова; e-mail: msa-omd@mail.ru.

Морозов Александр Сергеевич (Ижевск, Россия) – студент, Институт «Современные технологии машиностроения, автомобилестроения и металлургии» Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова; e-mail: sashamor2@mail.ru.

Morozov Sergey (Izhevsk, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department "Machines and Technology of Metal Forming and Welding Production", Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov; e-mail: msa-omd@mail.ru.

Morozov Alexander (Izhevsk, Russian Federation) – Student, Institute "Modern Technologies of Mechanical Engineering, Automotive and Metallurgy", Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov; e-mail: sashamor2@mail.ru.