



**Received:** 30.08.2023**Revised:** 03.10.2023**Accepted:** 20.10.2023**DOI:** 10.17804/2410-9908.2023.5.069-082

EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF SIMULATION OF HOT FORGING IN PRODUCTION CONDITIONS AT THE KUMW JSC

Yu. V. Zamaraeva^{1, 2, a), *}, L. I. Knysh^{1, b)}, and E. M. Gaisin^{1, c)}¹*Kamensk-Uralsky Metallurgical Works JSC,
5 Zavodskaya St., Kamensk-Uralsky, 623405, Russia*²*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia*a)  <https://orcid.org/0000-0002-2620-7064>  zamaraevajulia@yandex.ru;b)  knyshLI@kumw.ru;c)  gaisinEM@kumw.ru

*Corresponding author. E-mail: zamaraevajulia@yandex.ru

Address for correspondence: 5 Zavodskaya St., Kamensk-Uralsky, 623405, Russia
Tel.: +7 (950) 200-5679

Software for computer simulation of metal forging processes is a reliable tool for designing dies and developing technological processes, which allows one to avoid defects and predict product quality. The paper describes the experience of the KUMW JSC in simulating with the Deform and QForm software packages. The distinctive advantages of the QForm domestic software are exemplified by the forging of a roller disk. Proceeding from the described advantages, the KUMW JSC has selected QForm as effective software to solve the problems of die forging. The paper provides examples of applying this software. QForm is used to evaluate die filling in the forging of an odd-shaped part. Significant under-forming of the part was identified, and the technology was optimized in order to eliminate them. Additionally, by using this software, the shape and weight of a blank for forging a landing gear leg were optimized, and this has resulted in a 15% increase in geometric yield. After only one die-forged item code was modeled and the durability of the tooling was evaluated from stress intensity and displacement, the tooling material was replaced, the critical zone radius was locally increased, and the method for manufacturing die tooling was altered. This increased tool durability by 28%. The presence of the Hartfield postprocessor subroutine in QForm has made it possible to predict the zones of the occurrence of forging defects during the processing of the odd-shaped part and to correct the production scheme in good time. Each simulation example is supported by industrial experiment.

Keywords: computer simulation, QForm, hot forging, dies, optimization

Acknowledgment

The research was performed under the state assignment on the subject "Pressure", No. AAAA18-118020190104-3.

References

1. Ershov, A.A. and Loginov, Yu.N. Use of the program PAM-STAMP to study the effect of the as-received condition of a material on its formability during stamping. *Metallurgist*, 2014, 58 (3–4), 162–166. DOI: 10.1007/s11015-014-9886-2.



2. Loginov, Yu.N., Zamaraeva, Yu.V., and Kamenetsky, B.I. Angular strips extrusion modeling in 3D setting. *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo. Obrabotka Materialov Davleniem*, 2019, 9, 33–37. (In Russian).
3. Belov, M.I. Effectiveness of using mathematical simulation in the study, optimization, and design of metal forming processes. In: *Plasticheskaya deformatsiya staley i splavov* [Plastic Deformation of Steels and Alloys]. MISiS Publ., Moscow, 1996, pp. 224–227. (In Russian).
4. Rybin, Yu.I., Rudskoi, A.I., and Zolotov, A.M. *Matematicheskoe modelirovanie i proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem* [Mathematical Modeling and Designing of Technological Processes of Metal Forming]. Nauka Publ., St. Petersburg: 2004. 645 p. (In Russian).
5. Fomichev, A.F., Yurgenson, E.E., and Panin, S.Yu. Computer study of technological parameters during stamping. *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo. Obrabotka Materialov Davleniem*, 2010, 8, 38–42. (In Russian).
6. Galkin, V.V., Pozdyshev, V.A., Vashurin, A.V., and Pachurin, G.V. Mathematical modeling of the production of an article type by deep hot glass dome on the basis of software deform. *Fundamentalnye Issledovaniya*, 2013, 1, 371–374. (In Russian).
7. Alekseev, A.V. Hot dimensional stamping. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki*, 2021, 6, 406–409. (In Russian).
8. Myshechkin, A.A., Kravchenko, I.N., Preobrazhenskaya, E.V., Kudryavtsev, I.V., Belousov, I.V., and Skripnik, S.V. Research and improvement of drop stamping of valve-type flange forgings by modeling in the QForm software. *Steel in Translation*, 2023, 53, 579–585. DOI: 10.3103/S0967091223070094.
9. Konstantinov, I.L., Gubanov, I.Yu., Klemenkova, D.V., Astrashabov, I.O., Sidelnikov, S.B., and Gorokhov, Yu.V. Computer-simulated upgrading procedures of the hot aluminum-alloy forging process technology. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova*, 2016, 14 (1), 46–52. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-1-46-52. (In Russian).
10. Available at: <http://www.DEFORM.com/>
11. Gallagher, R. *Finite Element Analysis. Fundamentals*, Prentice–Hall Publ., Englewood Cliffs, NJ, 1975, 416 p.
12. Zienkiewicz, O.C. *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill, London, 1971.
13. Vlasov, A.V., Stebunov, S.A., Evsyukov, S.A., Biba, I.V., and Shitikov, A.A., ed. by A.V. Vlasov. *Konechno-elementnoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov kovki i obyemnoy shtampovki: uchebnoe posobie* [Finite Element Modeling of Technological Processes Forging and Volumetric Stamping: Textbook]. Izdatelstvo MGTU im. N.E. Bauman Publ., Moscow, 2019, 383 p. (In Russian).
14. Alekseev, S.Yu. Increasing die life during die forging by means of QForm modeling. *Metalurgist*, 2022, 66, 711–714. DOI: 10.1007/s11015-022-01379-y.
15. Konstantinov, I.L., Gubanov, I.Yu., Gorokhov, Yu.V., and Astrashabov, I.O. Application of computer simulation for aluminium alloy forging technology advancement. *Tsvetnye Metally*, 2015, 11, 68–71. DOI: 10.17580/tsm.2015.11.12. (In Russian).
16. Shmakov, A.K., Kolesnikov, A.V., Maksimenko, N.V., and Stanislavchik, A.S. Optimization of hot forging with the aid of the QFORM simulation. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2013, 4, 28–31. (In Russian).
17. Bryukhanov, A.N., Rebelsky, A.V. *Goryachaya shtampovka. Konstruirovaniye i raschet shtampov* [Hot Forming. Design and Calculation of Dies]. Mashgiz Publ., Moscow 1952, 665.





Подана в журнал: 30.08.2023
УДК 621.7.043
DOI: 10.17804/2410-9908.2023.5.069-082

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ОАО «КУМЗ»

Ю. В. Замараева^{1, 2, а), *}, Л. И. Кныш^{1, б)}, Е. М. Гайсин^{1, в)}

¹ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», ул. Заводская, 5, г. Каменск-Уральский, 623405, Россия

²Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Софьи Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620137, Россия

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0002-2620-7064>  zamaraevajulia@yandex.ru;

^{б)}  knyshLI@kumw.ru;

^{в)}  gaisinEM@kumw.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: zamaraevajulia@yandex.ru
Адрес для переписки: ул. Заводская, 5, Каменск-Уральский, Россия
Тел.: +7 (950) 200–56–79

В настоящее время программное обеспечение (ПО) для компьютерного моделирования технологических процессов обработки металлов методом штамповки является надежным помощником при проектировании конструкции штампов и разработке технологических процессов, позволяя предотвратить дефекты и спрогнозировать качество изделия. В работе описан опыт моделирования в программном комплексе Deform и QForm на предприятии ОАО «КУМЗ». На примере штамповки диска катка показаны отличительные преимущества отечественного программного комплекса QForm. Исходя из описанных преимуществ, в качестве эффективного программного обеспечения для решения задач кузнечно-штамповочного производства предприятием выбран программный комплекс QForm. В статье приведены примеры применения данного программного комплекса. Посредством QForm оценено заполнение штампа в процессе штамповки детали сложной формы. Здесь выявлены значительные неформления детали, для устранения которых осуществлена оптимизация технологии. Также посредством данного программного комплекса осуществлена оптимизация формы и веса заготовки для штамповки стойки шасси, что позволило повысить геометрический выход годного заготовки на 15 %. После моделирования только одного шифра штамповок и оценки стойкости технологической оснастки по таким параметрам, как интенсивность напряжений и перемещения, заменен материал оснастки, локально увеличены радиусы в критической зоне и изменен метод изготовления штамповой оснастки. Это позволило увеличить стойкость инструмента на 28 %. Наличие в QForm постпроцессорной подпрограммы «Гартфилд» позволило предсказать зоны возникновения штамповочных дефектов в процессе штамповки детали сложной формы и своевременно скорректировать технологическую схему производства. Каждый пример моделирования подтвержден промышленным экспериментом.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, QForm, горячая объемная штамповка, штампы, оптимизация

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» № АААА-А18-118020190104-3.



1. Введение

Необходимость повышения качества изделий ответственного назначения, экономии металла и энергии, расходуемой на формоизменение, экономии затрат на изготовление оснастки, а также прогнозирования надежности работы штампов способствует развитию методов моделирования технологических процессов обработки металлов давлением. Моделирование является эффективным инструментом для оценки напряженно-деформированного состояния и определения температурных полей изделия в технологическом процессе [1, 2], позволяет выявить основные закономерности течения металла, обнаружить наиболее опасные с точки зрения разрушения зоны деформации, определить усилие формоизменения [3], а также получить большой объем информации, провести всестороннее исследование, рассмотреть и сопоставить большее количество альтернативных вариантов. Натурный эксперимент, в свою очередь, позволяет компенсировать недостаточное знание природы явлений, условий выполнения технологического процесса, недостоверность тех или иных технологических свойств материала. Сопоставление альтернативных вариантов в натурном эксперименте является менее надежным, поскольку не всегда возможно зафиксировать те параметры, которые предполагаются одинаковыми в рассматриваемых вариантах [4]. Совершенствование и развитие методов математического моделирования приводит к расширению области их успешного использования. Если на начальной стадии развития компьютерное моделирование было средством решения отдельных инженерных задач обработки давлением, то в настоящее время это средство конструкторско-технологического проектирования [5, 6].

В настоящее время широкое распространение получила горячая объемная штамповка [7, 8], которую проводят в интервале температур, обеспечивающих снятие упрочнения. Данный процесс в условиях ОАО «КУМЗ» позволяет получать сложные по форме изделия, и применение моделирования, ввиду высокой стоимости штамповой оснастки, большого количества кузнечных переходов, большого объема ручного труда и повышенных затрат электроэнергии на нагрев, актуально для его оптимизации, а также при вводе новой конфигурации заготовки в производство. Следует отметить, что иногда исследователи достигают оптимизации без изменения используемого оборудования и применяемой штамповой оснастки. Например, в исследовании [9] оптимизация штамповки детали из алюминиевого сплава достигается за счет регламентации условий трения и скорости штамповки, подбор которых осуществлен посредством моделирования.

Цель работы – на примере деталей сложной формы, изготавливаемых методом горячей объемной штамповки в условиях ОАО «КУМЗ», посредством моделирования осуществить оценку напряженно-деформированного состояния и выявить возможные дефекты, а также оптимизировать конструкцию штамповой оснастки с последующим подтверждением промышленным экспериментом.

2. Обзор современного программного обеспечения и практика моделирования на предприятии ОАО «КУМЗ»

Технологические задачи формоизменения металлов сильно отличаются от других задач анализа деформаций и напряжений. Главное отличие – большая степень деформации, исчисляемая тысячами процентов, исключающая применение программ, предназначенных для прочностного анализа. Такие известные программы, как Ansys, Cosmos, Nastran при всем своем совершенстве не могут быть эффективно использованы в данной области. Моделирование течения металла в большинстве технологических процессов предполагает многократное (сотни и тысячи раз за расчет) автоматическое перестроение сетки, течение металла по поверхности инструмента с трением (контактная нелинейная задача), связь деформации с полем температуры, выход на качественные параметры изделия (формирование волокнистой структуры поковки). Результаты



такого уровня и качества могут быть получены только при помощи специализированных программ, разработанных для данной области применения.

На сегодняшний день для решения технологических задачковки и штамповки предлагаются различные компьютерные программы как на Западе, так и в России. Общеизвестными лидерами в этом направлении считаются американские компании SFTC с программным обеспечением (ПО) Deform и MSC с системой Autoforge/Superforge, французская компания Transvalor с системой Forge и российская компания «Квантор-Софт» с системой QForm. Каждая из них имеет свои преимущества и ограничения.

Программное обеспечение Deform, разрабатываемое компанией Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC) с восьмидесятых годов XX века [10], как универсальный продукт, способно рассчитывать любые процессы ОМД: листовую и сортовую прокатку, волочение, прессование, ковку, штамповку, операции трубного производства, используя для расчета метод конечных элементов, сводящийся по существу к аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью подобластей (или элементов), имеющих конечное число степеней свободы [11]. Затем между этими элементами, чаще всего являющимися треугольниками в плоском случае и тетраэдрами в пространственном, устанавливается взаимосвязь. Внутри каждого элемента задаются некоторые функции формы, позволяющие определить перемещения внутри элемента по перемещениям в узлах, то есть в местах стыков конечных элементов. Также можно отметить, что метод конечных элементов, в отличие от других расчетных методов, непосредственно применим к неоднородным конструкциям, состоящим из большого числа отдельных конструктивных элементов, поведение каждого из которых описывается своим дифференциальным уравнением [12].

До недавнего времени и на протяжении более десяти лет Deform являлся единственным инструментом для решения задач по моделированию технологического процесса штамповки на ОАО «КУМЗ». Однако практический опыт работы предприятия в данном программном комплексе показал следующее:

- бездефектное моделирование процесса штамповки не гарантирует отсутствие дефектов в ходе реального технологического процесса;
- в системе есть ряд функциональных ограничений;
- расчет поставленной задачи занимает значительное время;
- ежегодная техническая поддержка имеет высокую стоимость;
- данный программный продукт попал под санкции и остался без возможности обновления.

Вышеперечисленное послужило причинами привлечения для моделирования российского аналога – ПО QForm, разработанного компанией ООО «КванторФорм» (Москва).

Программа QForm также предназначена для моделирования процессов обработки металлов давлением. Интерфейсная часть и расчетное ядро программы работают независимо. Обмен информацией между ними осуществляется с помощью файлов, в которых хранятся исходные данные и результаты моделирования. При моделировании записываются все шаги моделирования, а расчет большого количества дополнительных параметров осуществляется в режиме постпроцессора после окончания моделирования.

Среди отличительных преимуществ QForm в сравнении с Deform следует выделить следующие:

- низкая (почти в два раза ниже относительно Deform) стоимость ежегодной технической поддержки (первый год включен в стоимость лицензии);
- новая (начиная с версии 8.2) постпроцессорная подпрограмма «Гартфилд» [13], позволяющая наглядно и с высокой вероятностью предсказывать кузнечные дефекты «прострел» и «утяжина»;
- определение напряжений, возникающих в инструменте, позволяющее спрогнозировать стойкость штамповой оснастки, оценить риски возникновения разгарных трещин, подобрать оптимальный материал для проектируемого инструмента;

- возможность использования одновременно двух расчетных сеток: рабочей и геометрической, что позволяет существенно сократить время расчета при моделировании некоторых процессов;
- возможность автоматического выбора оптимального шага по времени в процессе расчета, что приведет к сокращению времени и повышению качества расчета именно там, где это нужно;
- возможность ставить задачу и вести расчет в одной и той же директории;
- автоматическая адаптация сетки конечных элементов в ходе расчета, без проблем при перестроении сетки в виде «грыж КЭ» при компенсации объема;
- базы данных сохраняют все шаги расчета и при этом имеют небольшой объем на жестком диске;
- содержит и активно дополняет базы данных по отечественным маркам сталей и сплавов, цветных металлов.

Для оценки работы Deform и QForm, в частности их возможностей и подтверждения сходимости расчетов и реальных процессов как по формоизменению (заполнение штампов, возможное образование складок, зажимов, прострелов, утяжин и т. д.), так и по другим параметрам (температура, усилие деформирования и т. д.), в данных ПО проведено моделирование штамповки диска катка, имеющего сложную геометрическую форму. На рис. 1 *а, б, в* приведены результаты моделирования данного процесса в QForm, подтверждающие его возможность точно отображать формоизменение и выявлять зоны с высокой вероятностью образования дефектов, которые, что важно, не были обнаружены при моделировании в Deform, но возникали в ходе реального процесса. При этом по типу и расположению прогнозируемые дефекты были во многом сходны с дефектами, получаемыми на практике. На рис. 1 *г* приведена фотография диска катка, полученного в условиях реального производства.

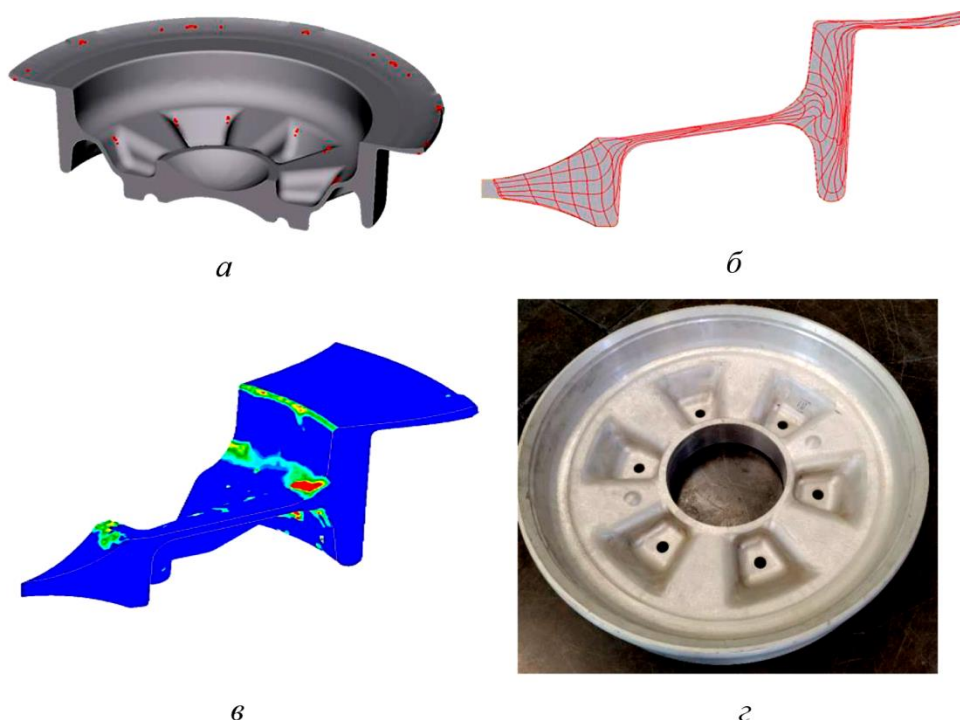


Рис. 1. Дефекты штамповки диска катка, выявленные при моделировании в QForm с помощью индикаторов контакта поверхностных узлов сетки конечных элементов между собой (красные точки) (*а*), лагранжевой сетки (*б*), постпроцессорной подпрограммы «Гартфилд» (красная область) (*в*); штамповка диска катка, полученная в условиях реального производства (*г*)

Таким образом, QForm проявил себя как более подходящее ПО для моделирования процесса штамповки детали сложной геометрической формы. Следует отметить, что для моделирования штамповки данный программный комплекс выбран многими исследователями [1–416].

3. Прогнозирование надежности работы штампов и качества штамповок сложной формы в условиях ОАО «КУМЗ»

Одной из часто возникающих проблем при изготовлении деталей методом штамповки является неполное заполнение ручья штампа. На рис. 2 показан пример сравнения заполнения штампов посредством моделирования в QForm при деформации методом штамповки стойки шасси по существующей и оптимизированной технологии. Здесь видно, что при штамповке по существующей технологии имеются значительные неоформления детали (рис. 2 а), а после оптимизации происходит ее полное оформление (рис. 2 б). Согласно результатам моделирования, заполнение верхнего выступа произойдет, не доходя 0,6 мм до смыкания верхней и нижней половин штампа. Эти значения впоследствии сравнивают с деформацией штампов для оценки достаточности объема заготовки.

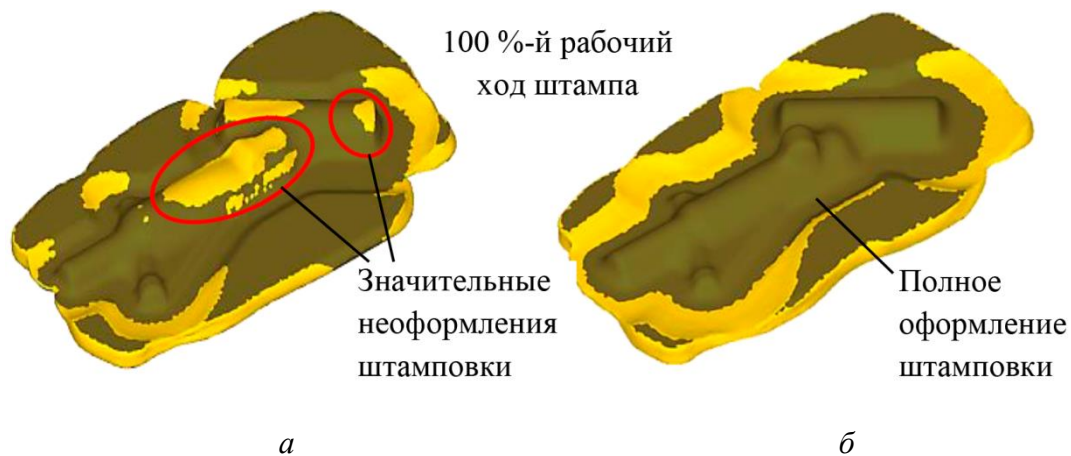


Рис. 2. Заполнение штампов при изготовлении методом штамповки стойки шасси по существующей (а) и оптимизированной (б) технологии



Рис. 3. Существующая технология штамповки стойки шасси (а); оптимизированная технология (оптимизация заготовки по форме и весу) (б)

На рис. 3 *а, б* показан пример моделирования в QForm штамповки стойки шасси, иллюстрирующий оптимизацию заготовки по форме и весу, позволившую повысить геометрический выход годного заготовки на 15 %.

Программное обеспечение QForm позволяет проводить анализ соблюдения температурного интервала штамповки. В качестве примера на рис. 4 *а* показаны результаты моделирования в виде распределения температуры штамповки детали сложной формы из сплава АК6. Известно, что температурный интервалковки и штамповки для алюминиевого сплава марки АК6 составляет 380...470 °С. Из рис. 4 *а* видно, что температура штамповки во время технологического процесса находится в допустимом интервале. Наибольшая температура наблюдается в зоне выхода облоя, при этом она не выходит из рабочего интервала температур. Однако для исключения возможности возникновения пережога в данной зоне можно рекомендовать увеличение толщины облоя. Фотография годной штамповки, полученной в условиях реального производства, представлена на рис. 4 *б*.

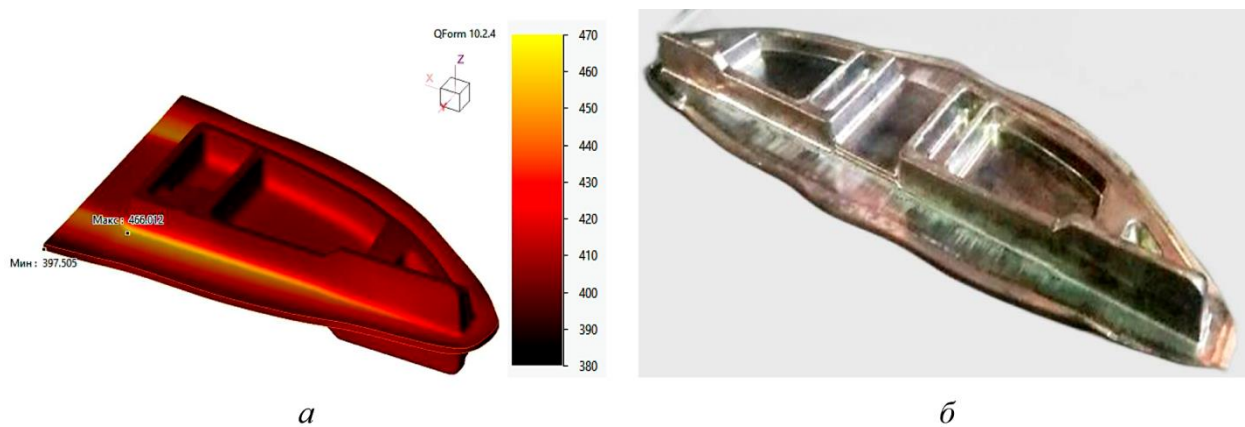


Рис. 4. Температурное поле штамповки в конечный момент процесса деформации (*а*); фотография штамповки, полученной в условиях реального производства (*б*)

Наряду с анализом температурного поля, QForm позволяет оценить уровень деформаций и напряжений в штамповке. На рис. 5 *а* показаны результаты моделирования штамповки сложной формы в виде распределения накопленной деформации. Здесь видно, что она достигает больших максимальных значений (более 11) локально по радиусной кромке на выходе облоя, что не критично, поскольку в этой зоне контроль разрушения заготовки не требуется, облой здесь является отходом и обрезается на следующей технологической операции. Значения средних напряжений существенно влияют на технологическую пластичность металлов и сплавов: чем больше отрицательное напряжение, тем бóльших деформаций можно достигнуть без разрушения заготовки [13]. Средние напряжения в зоне максимальной деформации (рис. 5 *б*) отрицательны (–130 МПа). Положительные средние напряжения возникают в зоне накопления излишнего металла, что также не критично в данном случае.

Индикаторы поверхностных дефектов в ПО QForm, обозначенные на рис. 6 *а* красными точками, показывают возможность появления дефектов, таких как зажимы. Зажимы в зоне выхода облоя не представляют опасности, поскольку эта часть штамповки уходит в отходы. Инструменты программы QForm позволяют проанализировать причины появления опасных для эксплуатации детали дефектов. С этой целью можно проанализировать направления скоростей материальных точек в момент образования дефекта (рис. 6 *б*). Из анализа этих данных следует, что дефект начинает появляться, когда металл достиг стенки инструмента, но еще не заполнил его радиусную часть. Также для анализа дефектов течения металла, связанных с затягиванием металла с поверхности заготовки вглубь, можно использовать показатель «минимальная дистанция до поверхности» (рис. 6 *в*), расчет которого проводится

одновременно с расчетом пластической деформации и не требует предварительного определения сечения. Это позволяет достаточно быстро исследовать несколько сечений. При обнаружении мест с затягиванием поля с поверхности заготовки рекомендуется дополнительно исследовать критическое сечение с помощью приповерхностных линий (рис. 6 з). Основная проблема при идентификации таких дефектов, как прострелы и утяжины с помощью описанных выше инструментов заключается в необходимости определения опасного сечения. Если анализируется уже полученный дефект в реальных производственных условиях, определить опасные сечения для анализа дефекта достаточно несложно [13]. На практике важно предусмотреть возможность появления дефектов еще на этапе проектирования, т. е. до изготовления штампового инструмента и проведения эксперимента в условиях производства. Для этого используют поля «Гартфилд» (рис. 6 д), которые позволяют практически безошибочно прогнозировать поверхностные дефекты в штамповке.

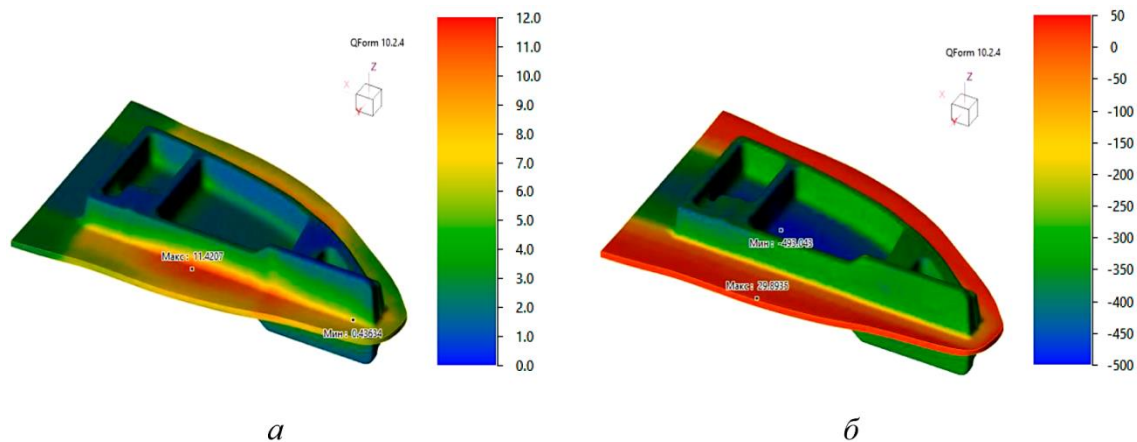


Рис. 5. Результаты моделирования штамповки детали сложной формы в виде распределения накопленной деформации (а) и среднего напряжения (б)

Наличие в ПК QForm постпроцессорной подпрограммы «Гартфилд» значительно упрощает процесс анализа результатов и позволяет наглядно, быстро и с высокой вероятностью предсказывать зоны возникновения дефектов типа «прострел» и «утяжина». Для примера на рис. 7 а представлен расчет, позволяющий обнаружить дефект типа «утяжина» и, как следствие, своевременно скорректировать технологическую схему производства детали. На рис. 7 б представлена фотография годной штамповки, полученной в условиях реального производства.

Подтверждение сходимости результатов расчета, полученных при моделировании штамповки в QForm, с фактически полученными результатами эксперимента, проведенного в реальных производственных условиях, можно наблюдать в примере, показанном на рис. 8. Постпроцессорная подпрограмма «Гартфилд» позволила выявить возможные места возникновения дефекта типа «утяжина» в основании ребер (рис. 8 а) и подтвердить их отсутствие после корректировки технологической схемы (рис. 8 б). После чего построение лагранжевой сетки позволило проследить течение металла в процессе деформации и определить характер возникновения дефекта (рис. 8 в), а затем подтвердить его отсутствие после корректировки технологической схемы (рис. 8 г). На рис. 8 д, е показаны фотографии шлифов макроструктуры штамповки, сделанных в сечениях, показанных на рис. 8 в, г, при выявлении дефектов и после корректировки технологической схемы соответственно. Таким образом, рис. 8 подтверждает сходимость результатов моделирования в QForm с фактически полученными в производственных условиях.

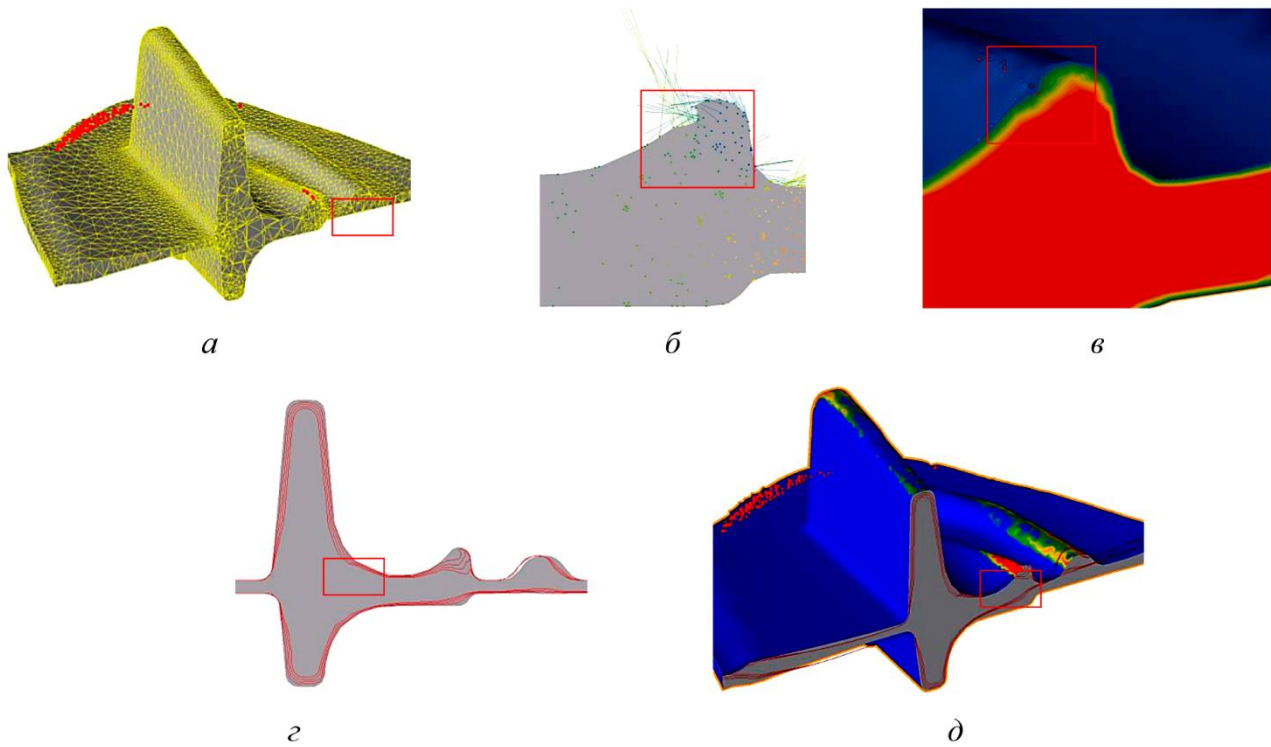


Рис. 6. Идентификация поверхностных дефектов в ребре штамповки (выделено красным прямоугольником) с помощью индикаторов поверхностных дефектов (красные точки) (а), показателя скоростей (б), показателя «минимальная дистанция до инструмента» (в), приповерхностных линий (г) и полей «Гартфилд» (д)

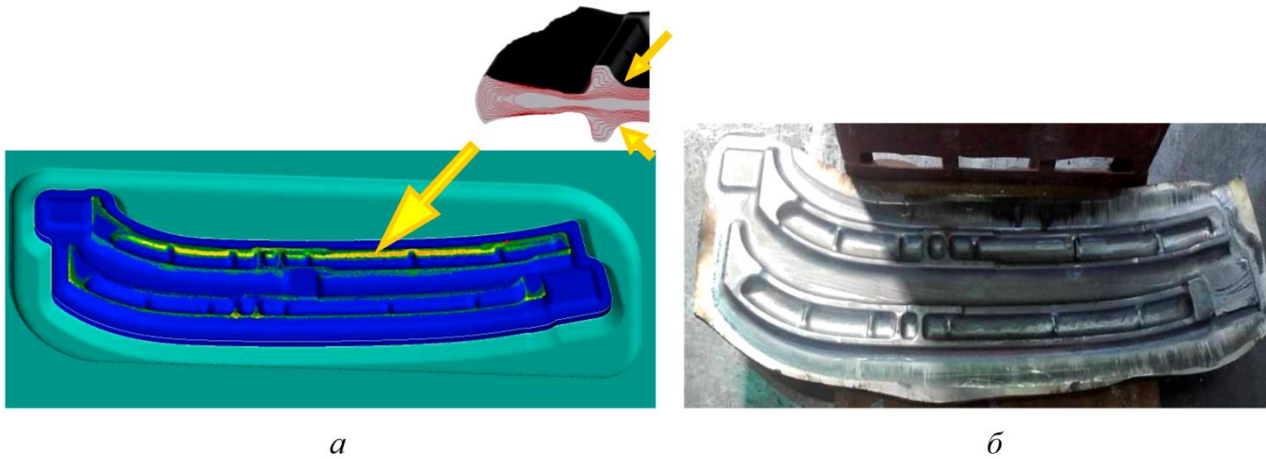


Рис. 7. Модель штамповки с дефектом типа «утяжина», определенным посредством постпроцессорной подпрограммы «Гартфилд» (ПК QForm) (а); фотография годной штамповки, полученной в условиях реального производства (б)

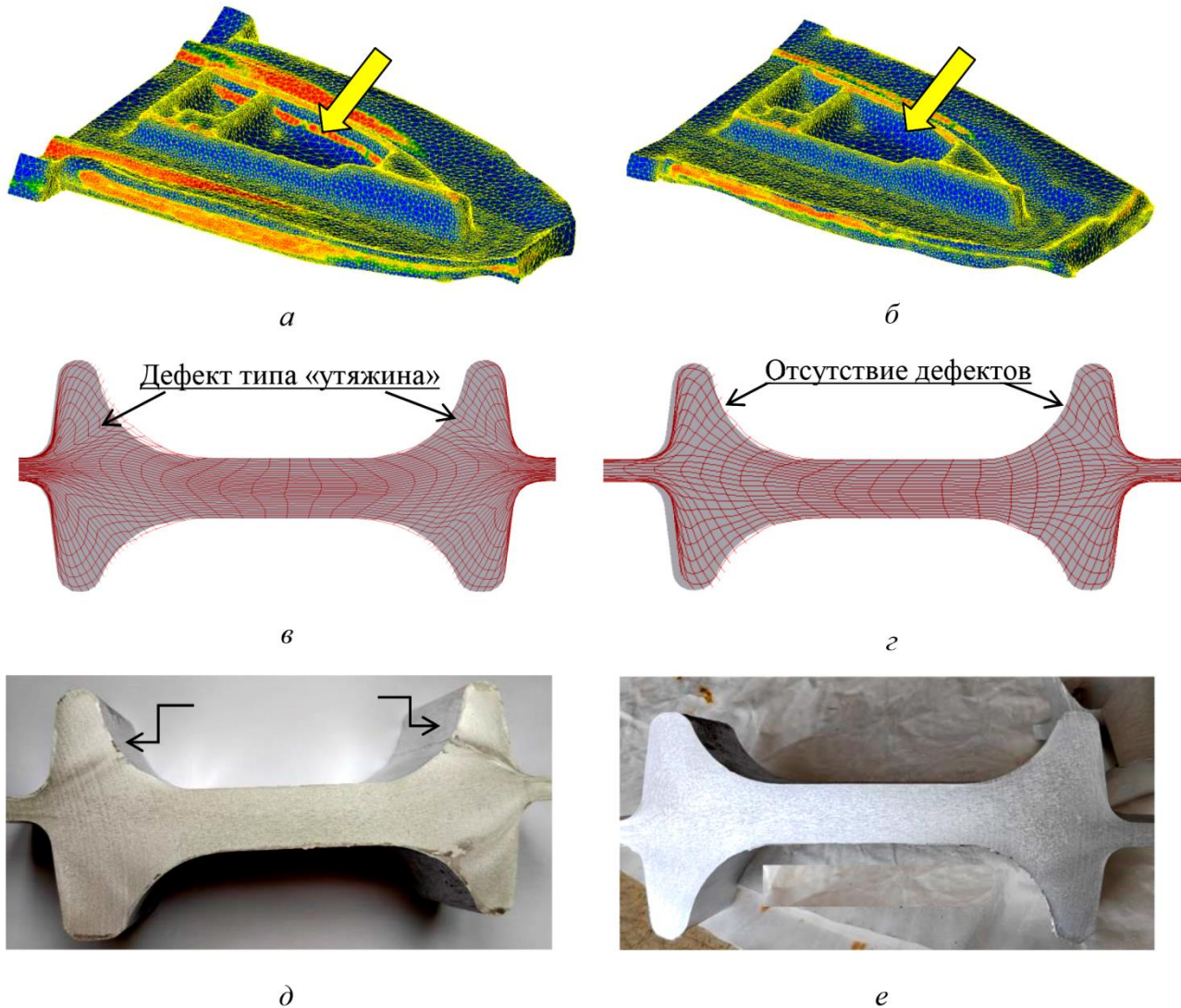


Рис. 8. Подтверждение сходимости результатов моделирования в QForm с результатами, полученными в производственных условиях: выявление дефекта типа «утяжина» с помощью полей «Гартфилд» (а); подтверждение отсутствия дефекта типа «утяжина» после корректировки технологической схемы с помощью полей «Гартфилд» (б); определение характера возникновения дефекта посредством лагранжевой сетки (в); подтверждение отсутствия дефекта посредством лагранжевой сетки (г); макроснимок сечения штамповки после выявления дефекта (стрелки указывают на дефект) (д); макроснимок сечения штамповки после корректировки технологической схемы (е)

Стойкость штамповой оснастки является одним из важнейших показателей, влияющих на стоимость изделия, получаемого методом штамповки. Функционал QForm позволяет оценить стойкость оснастки косвенно по таким параметрам, как интенсивность напряжений и перемещения при расчете инструмента, и остановиться на наиболее надежной конфигурации.

Оценка стойкости инструмента рассмотрена на примере моделирования процесса штамповки автомобильного поршня, фотография которого представлена на рис. 9. Геометрия данной детали предусматривает необрабатываемые глубокие полости (группа сложности IV, категория точности II, коэффициент необрабатываемой поверхности 0,2, коэффициент использования материала 0,75 [17]), что усложняет изготовление инструмента и очевидно влияет на его стойкость.



Рис. 9. Фотография автомобильного поршня

Проведена серия циклов моделирования технологического процесса штамповки поршня. Картина итоговых результатов расчета представлена на рис. 10.

Первый вариант расчета (рис. 10 *a*) с вертикальным выходом обля показал, что интенсивность напряжений превышает предел текучести, а горизонтальные перемещения в инструменте достигают величины 0,9 мм. На основании этого можно прогнозировать высокую вероятность разрушения инструмента.

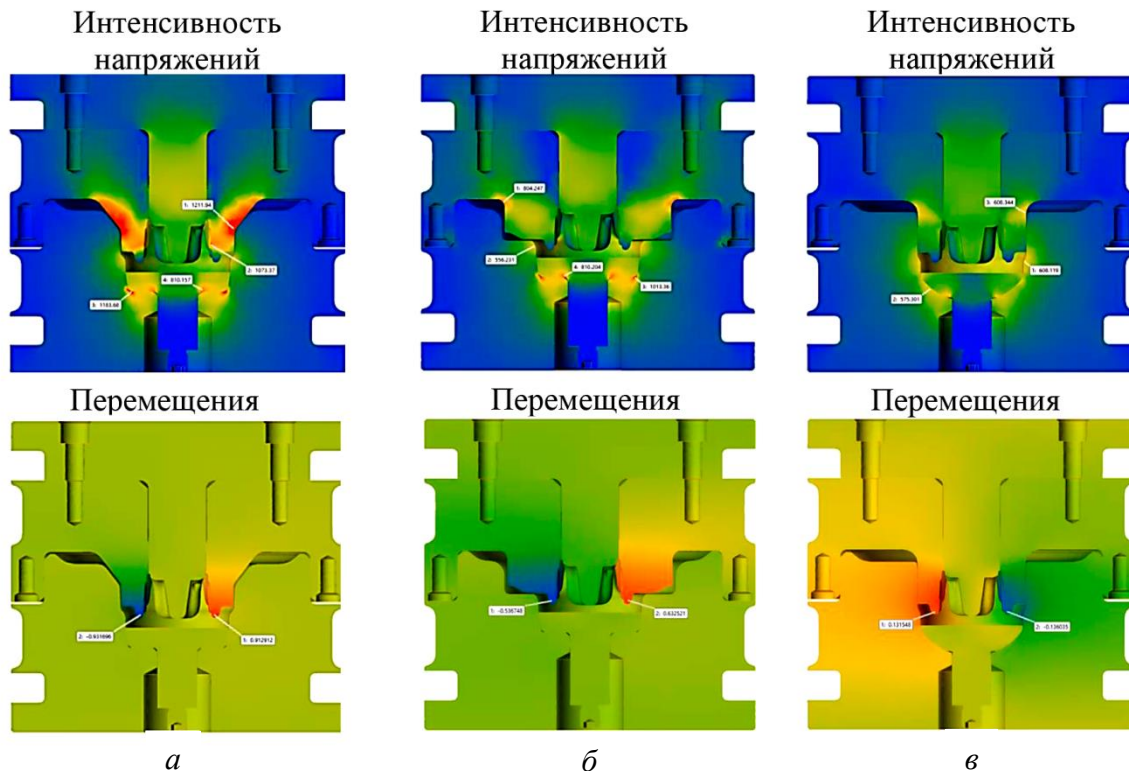


Рис. 10. Моделирование штамповки поршня в ПК QForm: с вертикальным выходом обля (*a*); с ломаной линией разреза и горизонтальным выходом обля (*б*); с ломаной линией разреза и вертикальным выходом обля в закрытом штампе (*в*)



Второй вариант расчета (рис. 10 б) с ломаной линией разъема и горизонтальным выходом облоя показал, что интенсивность напряжений имеет некоторый запас по пределу текучести, а величина горизонтальных перемещений в инструменте составляет 0,6 мм. Эти данные указывают на малую стойкость инструмента.

Третий вариант расчета (рис. 10 в) с ломаной линией разъема и вертикальным выходом облоя в закрытом штампе показал, что интенсивность напряжений имеет достаточный запас по пределу текучести, а величина горизонтальных перемещений в инструменте составляет 0,14 мм. Полученный результат позволяет прогнозировать достаточную для работы стойкость инструмента. При этом данный вариант требует высокой точности размеров и веса заготовки. Также моделирование позволило оптимизировать геометрию толкателя, что, в свою очередь, существенно снизило величину интенсивности напряжений в области контакта толкателя и нижней вставки.

4. Заключение

В настоящее время ПО для компьютерного моделирования технологических процессов обработки металлов давлением является надежным помощником при проектировании конструкции штампов и разработке технологических процессов, позволяя предотвратить вероятные дефекты, спрогнозировать качество изделия без затрат на изготовление оснастки. Кроме того, посредством моделирования возможно проводить оптимизацию ранее разработанных технологий и инструмента.

Современные программы моделирования имеют простой интерфейс для пользователя, высокую скорость расчета, а также обеспечивают достаточную сходимость с результатами реальных процессов как по формоизменению (заполнение штампов, возможное образование складок, зажимов, прострелов, утяжин и т. п.), так и по другим параметрам (температура, усилие деформирования и т. д.).

Предприятием ОАО «КУМЗ» в качестве оптимального варианта отечественного программного обеспечения для решения задач в рамках кузнечно-штамповочного производства выбран ПК QForm.

Для получения годной штамповки необходимо провести не менее двух-трех натуральных испытаний, каждое из которых дорого стоит и включает металл, нормо-часы, а при необходимости и обновление фигуры штампа и другие затраты на производство. Применение QForm позволяет значительно экономить затраты на производство, так как данный ПК обеспечивает возможность подбирать необходимые режимы, параметры, оптимальную оснастку, в конечном счете проводя один натуральный эксперимент для оценки адекватности результатов моделирования.

По результатам моделирования только одного шифра штамповок и оценки стойкости технологической оснастки по таким параметрам, как интенсивность напряжений и перемещения, заменен материал оснастки, локально увеличены радиусы в критической зоне и изменен метод изготовления штамповой оснастки. Это позволило увеличить стойкость инструмента на 28 %.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление» (No. ААААА18-118020190104-3).



Литература

1. Ershov A. A., Loginov Yu. N. Use of the program PAM-STAMP to study the effect of the as-received condition of a material on its formability during stamping // *Metallurgist*. – 2014. – Vol. 58 (3–4). – P. 162–166. – DOI: 10.1007/s11015-014-9886-2.
2. Логинов Ю. Н., Замараева Ю. В., Каменецкий Б. И. Моделирование углового прессования полосы в 3D постановке // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2019. – № 9. – С. 33–37.
3. Белов М. И. Эффективность использования математического моделирования при исследовании, оптимизации и проектировании технологических процессов ОМД // *Пластическая деформация сталей и сплавов* : сб. науч. тр. / под общ. ред. А. В. Зиновьева. – Москва : МИСИС, 1996. – 245 с.
4. Рыбин Ю. И., Рудской А. И., Золотов А. М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. – Санкт-Петербург : Наука, 2004. – 642 с.
5. Фомичев А. Ф., Юргенсон Э. Е., Панин С. Ю. Компьютерное исследование технологических параметров при штамповке // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2010. – № 8. – С. 38–42.
6. Математическое моделирование процесса изготовления изделия типа «стакан» методом глубокой горячей вытяжки на основе применения программного комплекса DEFORM / В. В. Галкин, В. А. Поздышев, А. В. Вашурин, Г. В. Пачурин // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 1. – С. 371–374.
7. Алексеев А. В. Горячая объемная штамповка сложнопрофильной детали // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2021. – № 6. – С. 406–409.
8. Research and improvement of drop stamping of valve-type flange forgings by modeling in the QForm software / A. A. Myshechkin, I. N. Kravchenko, E. V. Preobrazhenskaya, I. V. Kudryavtsev, I. V. Belousov, S. V. Skripnik // *Steel in Translation*. – 2023. – Vol. 53. – P. 579–585. – DOI: 10.3103/S0967091223070094.
9. Методология модернизации технологии горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов методом компьютерного моделирования / И. Л. Константинов, И. Ю. Губанов, Д. В. Клеменкова, И. О. Астрашабов, С. Б. Сидельников, Ю. В. Горохов // *Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. – 2016. – № 1. – С. 46–52. – DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-1-46-52.
10. URL: <http://www.DEFORM.com/>
11. Галлагер Р. Метод конечных элементов: основы / пер с англ. – Москва : Мир, 1984. – 428 с.
12. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / пер с англ. – Москва : Мир, 1975. – 318 с.
13. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие / А. В. Власов, С. А. Евсюков, С. А. Стебунов, И. В. Биба, А. А. Шитиков / под ред. А. В. Власова. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 383 с.
14. Alekseev S.Yu. Increasing die life during die forging by means of QForm modeling // *Metallurgist*. – 2022. – Vol. 66. – P. 711–714. – DOI: 10.1007/s11015-022-01379-y.
15. Применение компьютерного моделирования для совершенствования технологии горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов / И. Л. Константинов, И. Ю. Губанов, Ю. В. Горохов, И. О. Астрашабов // *Цветные металлы*. – 2015. – № 11. – С. 68–71. – DOI: 10.17580/tsm.2015.11.12.
16. Оптимизация процесса горячей объемной штамповки путем моделирования в программном комплексе QFORM / А. К. Шмаков, А. В. Колесников, Н. В. Максименко, А. С. Станиславчик // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2013. – № 4. – С. 28–31.
17. Брюханов А. Н., Ребельский А. В. Горячая штамповка. Конструирование и расчет штампов. – Москва : Машгиз, 1952. – 665 с.