

УДК 621.73

Разработка математических моделей паровоздушных молотов с массами падающих частей 10 и 13 т в программном комплексе QForm

Белокуров Олег Александрович^{1(*)}

oabelokurov@bmstu.ru

SPIN-код: 9696-9659

Лавриненко Владислав Юрьевич¹

ieec@bk.ru

SPIN-код: 5979-1096

Смирнов Максим Олегович²

smirnov_mo@smk.ru

Клюева Ирина Владимировна¹

irina.klyueva.88@mail.ru

Анисимов Антон Игоревич¹

ts156529@gmail.com

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия² АО «СМК», Ступино, Россия

Аннотация. На АО «Ступинская металлургическая компания» экспериментально определены скорости падающих частей в момент удара по заготовке и фактическая полная энергия удара штамповочных молотов с массой падающих частей (МПЧ) 10 и 13 т. Используя экспериментально полученные данные, выполнено моделирование в программном комплексе QForm процесса осадки цилиндрических заготовок из сплава ЭИ698-ВД и стали 30ХГСА с целью уточнения параметров (жесткость и коэффициент линейных потерь) математической модели молота в QForm. Уточненные параметры математических моделей штамповочных молотов показали высокую сходимость результатов моделирования с экспериментальными данными (расхождение не более 2 %). Проведенная верификация математической модели молота позволила разработать точную модель процесса горячей объемной штамповки поковки типа диск СК-629 из сплава ЭИ698-ВД.

Ключевые слова: ковка, горячая объемная штамповка, штамповочные молоты, кинематические и силовые параметры молота, моделирование, QFORM

Development of Mathematical Models for Steam - Air Hammers with Falling Part Masses of 10 and 13 Tons in the QForm Software Complex

Belokurov Oleg Aleksandrovich^{1(*)}

oabelokurov@bmstu.ru

SPIN-code: 9696-9659

Lavrinenko Vladislav Yurievich¹

ieec@bk.ru

SPIN-code: 5979-1096

Smirnov Maksim Olegovich²

smirnov_mo@smk.ru

Klyueva Irina Vladimirovna¹

irina.klyueva.88@mail.ru

Anisimov Anton Igorevich¹

ts156529@gmail.com

¹ BMSTU, Moscow, Russia

² "SMC" JSC, Stupino, Moscow Region, Russia

Abstract. Experimental Determination of Falling Part Velocities at the Moment of Impact and Actual Total Impact Energy of Forging Hammers with Falling Part Masses (FPM) of 10 and 13 Tons at "Stupino Metallurgical Company" JSC. Using experimentally obtained data, the upsetting process of cylindrical workpieces made of EP742-ID alloy and 30ChGSA steel was simulated in the QForm software suite to refine the parameters (stiffness and linear loss coefficient) of the hammer's mathematical model in QForm. The calibrated parameters of the forging hammers' mathematical models demonstrated high convergence between simulation results and experimental data (deviation not exceeding 2 %). The verified mathematical model of the hammer enabled the development of an accurate model for the hot die forging process of an SK-629 disk-type forging made of EP742-ID alloy.

Keywords: forging, hot die forging, forging hammers, kinematic and force parameters of hammers, simulation, QForm

Введение. Разработка технологического процессаковки и горячей объемной штамповки поковок из труднодеформируемых материалов на молотах с применением программного комплекса QForm часто приводит к значительному расхождению расчетного количества ударов с реальными на производстве, при этом появляется необходимость подогрева заготовок между ударами. Эти неточности расчета по количеству ударов и числу подогревов негативно влияют на структуру поковок и понижают механических характеристик детали или ведут к его браку. А также уменьшают требуемую производительность работы оборудования и увеличиваются общую трудоемкость изготовления поковок. В некоторых случаях могут привести к невозможности получения поковок на данном молоте вопреки расчету.

Такое различие в результатах моделирования в QFORM и реальным производством можно объяснить следующими основными факторами: не соответствие параметров молота задаваемого в QFORM и используемого на производстве; не точная реология труднодеформируемых материалов; математическая модель молота в QFORM не в полной мере отражает реальную работу молота.

Практика работы на ковочных и штамповочных молотах на различных машиностроительных предприятиях действительно показывает, что реальное значение [1] полной энергии удара молота может существенно отличаться в меньшую сторону от величины полной энергии удара, приведенной в паспорте молота вследствие существенного физического износа оборудования со сроком службы более 40 лет.

В связи с этим можно отметить актуальность и важность исследований по определению кинематических параметров и фактической полной энергии удара молота с МПЧ 10 и 13 т, используемых на АО «Ступинская металлургическая компания» и уточнению параметров математической модели для данных молотов в QFORM.

Материалы и методы. Целью исследования является уточнение математической модели процесса штамповки диска на молоте модели М109 с МПЧ 13 т и молоте модели М102 с МПЧ 10 т. При моделировании штамповки диска СК-629 из жаропрочного сплава на никелевой основе ЭИ698 ВД (ХН73МБТЮ ВД) на АО «Ступинская металлургическая компания» в программном комплексе QForm получили значительное несовпадение результатов моделирования и реальной штамповки.

Техпроцесс горячей штамповки диска СК-629 состоит из осадки на молоте с МПЧ 7 т и штамповки в окончательном ручье на молоте с МПЧ 13 т. В базе данных QForm создан молот с МПЧ 13 т со стандартными параметрами (рис. 1, а). В результате моделирования (рис. 2) получили заполнение окончательного ручья на 15 ударе (высота облойного мостика 20 мм).

Энергия удара 320 кДж Масса инструмента 1 13 тонн Масса инструмента 2. Только для бесшаботного молота 0 тонн Жесткость 100 МН/мм Коэффициент линейных потерь 0.1 кДж/МН Постоянные потери 0 кДж	Энергия удара 230 кДж Масса инструмента 1 17 тонн Масса инструмента 2. Только для бесшаботного молота 0 тонн Жесткость 100 МН/мм Коэффициент линейных потерь 0.1 кДж/МН Постоянные потери 0 кДж
а	б

Рис. 1. Параметры молота М109 для программного комплекса QFORM:
а — стандартные параметры молота; б — параметры полученные экспериментально

Однако в реальных условиях при штамповке диска, по поковке нанесли 30 ударов, но получили недоход 30 мм. Введение экспериментально полу-

ченных данных параметров молота в параметры модели молота в QForm (рис. 1, б) не привели к желаемому результату по заполнению окончательного ручья. Заполнение окончательного ручья получено на 24 ударе молота. Результат приблизился к реальному, но является неудовлетворительным и может привести в дальнейшем к ошибкам в разработанном технологическом процессе штамповки.

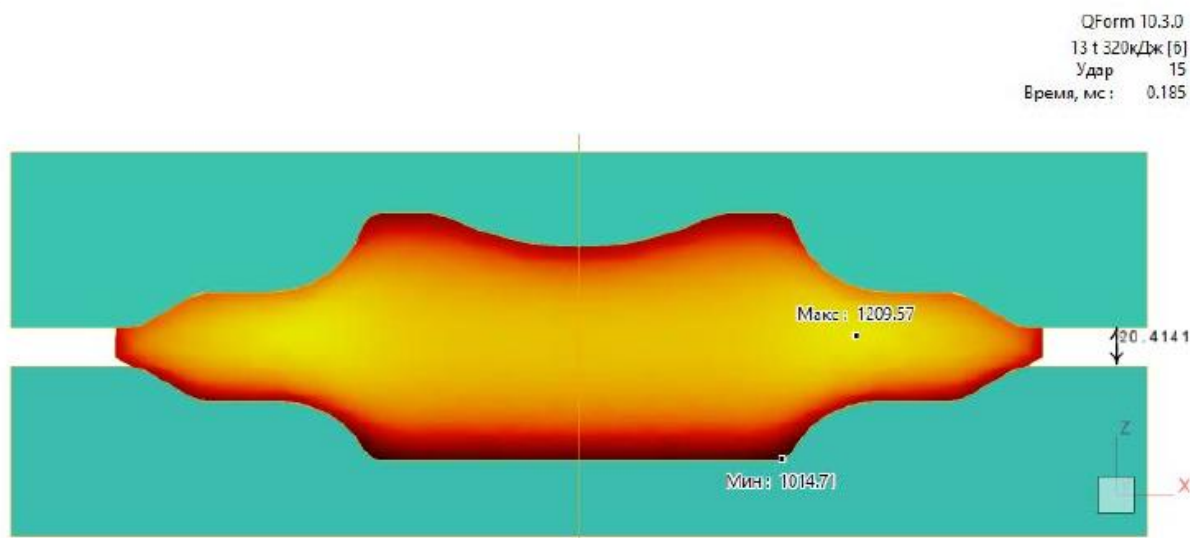


Рис. 2. Заполнение окончательного ручья поковки диска СК-629 из жаропрочного сплава на никелевой основе ЭИ698 ВД (ХН73МБТЮ ВД) за 15 ударов

Также были рассмотрены реологические модели материалов, полученные в JMatPro и экспериментально на Gleeble. Но существенно это не повлияло на результаты расчета по количеству ударов.

Результаты. Для определения кинематических и энергосиловых параметров штамповочных молотов моделей М102 и М109 с МПЧ 10 и 13 т соответственно, проводили последовательную осадку 12-ти заготовок [2, 3] из никелевого сплава ЭИ698-ВД и стали 30ХГСА на АО «Ступинская металлургическая компания». Определены фактическая средняя скорость падающих частей молота в момент соударения с заготовкой $V_{ср}$ и фактическая полная энергия удара L :

- для молота модели М102: $V_{ср} = 5,84$ м/с; $L = 178,2$ кДж;
- для молота модели М109: $V_{ср} = 5,24$ м/с; $L = 232,1$ кДж.

Для моделирования осадки поковок (по результатам предварительных расчетов) создали по 7 моделей молотов в базе QForm для М102 и М109, в которых варьировали параметрами: жесткость $C = 40\text{--}100$ МН/мм и коэффициент линейных потерь $K_a = 0,1\text{--}6,0$ кДж.

Для молотов М102 и М109 наилучшую сходимость размеров эксперимента и моделирования в QForm показали модели молотов с параметрами, приведенными в таблице.

Данные по конечной высоте образцов и ходу деформирования для модели молота М102 для сплава ЭИ698 ВД и стали 30ХГСА по результатам моделирования и эксперимента показывают хорошую сходимость: для конечной

высоты погрешность составила до 2 % (менее 1 мм); для хода деформирования погрешность до 6 % (менее 3 мм).

Параметры моделей молотов М102 и М109 для моделирования в QForm

Параметр	Модель молота М102	Модель молота М109
Энергия удара, кДж	250	20
Масса падающих частей, т	10,5	17
Жесткость C , МН/мм	40	40
Коэффициент линейных потерь K_a , кДж	6	6
Постоянные потери G , кДж	82	88

Данные по конечной высоте образца и ходу деформирования для модели молота М109 для сплава ЭИ698 ВД и стали 30ХГСА по результатам моделирования и эксперимента показывают хорошую сходимость: для конечной высоты погрешность составила до 7 % (менее 4 мм); для хода деформирования погрешность до 6 % (менее 3 мм).

Выполнена разработка и верификация уточненной компьютерной (математической) модели процесса горячей объемной штамповки поковки диска СК-629 из жаропрочного никелевого сплава ЭИ698-ВД (ХН73МБТЮ ВД) на штамповочном молоте М109 с МПЧ 13 т в программном комплексе QForm.

В результате моделирования получено несмыкание верхней и нижней половин штампа на 19-м ударе величиной 56,8 мм и остановка расчета по причине достижения максимальной силы, которая определена в параметрах молота, и QForm выдал «упругий удар».

Чтобы определить предельные размеры поковки, которую можно отштамповать на М109, необходимы параметры штамповки поковки максимального поперечного сечения с учетом материала. Если настроить данные параметры модели молота, соответствующие состоянию молота, то можно рассчитать максимальное количество ударов.

Новые параметры молота М109 для моделирования штамповки поковки диска СК-629:

- жесткость $C = 250$ МН/мм;
- коэффициент линейных потерь $K_a = 2,6$ кДж.

Потери у данной модели будут меньше, поэтому и точность на заготовительных операциях и предварительной штамповки будет ниже (деформация будет меньше). Но сила, при которой QForm будет показывать «упругий удар», больше и составляет порядка 83 МН.

При моделировании с параметрами молота, несмыкание штампа составило 30,7 мм при общем количестве ударов молота 30, что полностью соответствует реальным производственным данным.

Обсуждение полученных результатов. Экспериментально определены средние скорости МПЧ в момент соударения с заготовкой для молотов модели М102 ($V_{cp} = 5,84$ м/с) и модели М109 ($V_{cp} = 5,24$ м/с), что улучшило сходимость результатов моделирования и производства. Но также необходимо отметить, что значительное влияние на повышение сходимости результатов моделирования и производства оказывает математическая модель молота, применяемая в QForm. Откалиброванная математическая модель молота в соответствии с параметрами реального молота позволяет получить точную сходимость результатов, а также необходимо уточнение самой математической модели. Однако разработанной методики по калибровке математической модели молота пока не существует.

Заключение. На основе экспериментальных данных выполнено моделирование процесса осадки цилиндрических заготовок из сплава ЭИ698-ВД и стали 30ХГСА в программном комплексе QForm, результаты которого показали высокую сходимость (расхождение не более 2 %) с экспериментальными данными.

Проведенная верификация построенной математической модели позволила уточнить некоторые исходные параметры штамповочных молотов моделей М102 и М109 (энергия удара, масса падающих частей, жесткость, коэффициент линейных потерь, постоянные потери) и разработать точную модель процесса горячей объемной штамповки поковки типа диск из сплава ЭИ698-ВД.

Список источников

- [1] Ковка и штамповка: справочник. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. Москва, Машиностроение, 2010, т. 1, 717 с.
- [2] Лавриненко В.Ю., Белокуров О.А. Методика определения кинематических и энергосиловых параметров ковочных и штамповочных молотов. Кузнец-2024. Междунар. XV Конгресс: сб. ст. Рязань, 2024, с. 176–185.
- [3] Лавриненко В.Ю., Белокуров О.А., Карягин, М.О., Смирнов М.О., Дорошенко С.А., Лебединец А.Н. Исследование энергосиловых параметров штамповочных молотов в производственных условиях АО «СМК». Заготовительные производства в машиностроении, 2024, т. 22, № 1, с. 16–24.