

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2025-48-8-11>

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ЭФФЕКТА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Опёноква Е.А., Петров П.А.

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Ключевые слова: тепловой эффект, пластическая деформация, вычислительный эксперимент, углеродистая сталь, температурное поле, теплопроводность, адиабатические условия, метод конечных элементов.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования теплового эффекта пластической деформации заготовок из углеродистых сталей 20 и 45 с применением компьютерного моделирования. Разработка компьютерной модели процесса осадки выполнена в программе QForm; проверка модели обеспечена по данным натурных экспериментов. Получены полиномиальные зависимости, устанавливающие взаимосвязь между текущей температурой и временем процесса осадки, которые могут быть применены на практике при разработке технологического процесса и проектировании штампового инструмента.

INVESTIGATION OF THE THERMAL EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION USING COMPUTATIONAL EXPERIMENTS

Openkova E.A., Petrov P.A.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Keywords: thermal effect, plastic deformation, computational simulation, carbon steel, temperature field, thermal conductivity, adiabatic conditions, finite element method.

Abstract. The paper presents the results of a study of the thermal effect of plastic deformation of blanks made of carbon steels 20 and 45 using computer modeling. The development of a computer model of the upsetting process was performed in the QForm program; the model was verified using data from full-scale experiments. Polynomial dependencies were obtained that establish the relationship between the current temperature and the upsetting process time, which can be used in practice when developing a technological process and designing a stamping tool.

Изменение температуры в процессе пластической деформации влияет на изменение сопротивления деформации металла и, как следствие, на характеристики механических свойств. Нагрев, возникающий вследствие преобразования механической энергии в тепловую, может приводить к снижению сопротивления деформации и увеличению пластичности. В связи с этим, для начала течения металла требуется меньшее значение энергии и в результате этого, деформируемый металл способен заполнить труднодоступные области формообразующего инструмента и принять необходимую форму [1].

Цель данной работы – изучение теплового эффекта пластической деформации образцов углеродистых сталей 20 и 45 при комнатной температуре с применением компьютерного моделирования. Такой подход, называемый также математическим моделированием [2], позволяет с высокой

точностью контролировать параметры эксперимента, изучать влияние различных факторов на целевой показатель и, что немаловажно, сократить объем повторяющихся натурных экспериментов. Основу математического моделирования [2] составляет модель-алгоритм-программа и оно сводится к разработке и изучению компьютерной модели процесса. В нашем случае процесса осесимметричной осадки цилиндрического образца, в котором наблюдается тепловой эффект, инициируемый пластической деформацией.

Методология разработки компьютерной модели и исследования процесса осадки образца основана на использовании программы QForm [3]. Решатель программы основан на методе конечных элементов и рассматривает вариационную формулировку краевой задачи обработки давлением. В общем случае система уравнений включает две задачи: механическую и тепловую, основанную на рассмотрении уравнения теплопроводности [3, 4]. Компьютерная модель процесса позволяет вычислять энергосиловые параметры процесса с учетом вычисляемых параметров напряженно-деформированного состояния и температурного поля в образце на каждом шаге процесса его деформирования.

Условия теплопередачи между деформируемым металлом и материалом инструмента рассматриваются в зависимости от принятых условий: адиабатических, изотермических либо смешанных. В данной статье принимается допущение о том, что условия теплопередачи – адиабатические [4].

В качестве объектов исследования рассматриваются цилиндрические образцы из 2 углеродистых сталей – 20 и 45 (ГОСТ 1050-2013). Образцы изготавливались из круглого проката методом электроэрозии и последующей механической обработки; имеют размеры: $\varnothing 28 \times 54$ (сталь 20) и $\varnothing 25 \times 45$ (сталь 45). Образцы подвергаются сжатию плоскими поверхностями инструментов. Сопротивление деформации исследуемых сталей, а также их физико-механические свойства, взяты из встроенной базы данных деформируемых материалов программы QForm.

Параллельно вычислительному эксперименту проводились натурные эксперименты по исследованию теплового эффекта пластической деформации цилиндрических образцов из углеродистых сталей 20 и 45; замер текущей температуры выполнен с применением термопары тип К, зачеканенной в образец до начала проведения опыта. На рисунке 1 представлены результаты проведенных экспериментов – зависимости изменения температуры в образцах во время процесса деформирования осадкой. По результатам сравнительной оценки полученных данных выполнена их аппроксимация полиномом n -й степени. Основные формулы, которые можно рекомендовать для расчета текущей температуры сталей 20 и 45 при их пластической деформации, приводятся ниже:

– для стали 20:

$$T = 2,07 \cdot t^2 + 8,7395 \cdot t + 28, \quad (1)$$

$$T = 0,9217 \cdot t^2 + 11,849 \cdot t + 32,302, \quad (2)$$

– для стали 45:

$$T = 4,2205 \cdot t^2 + 10,913 \cdot t + 28, \quad (3)$$

$$T = 2,091 \cdot t^2 + 15,885 \cdot t + 32,392, \quad (4)$$

где T – текущее значение температуры, °C; t – текущее значение времени процесса, с.

Формулы (1) и (3) относятся к натурному эксперименту; формулы (2) и (4) – к вычислительному эксперименту.

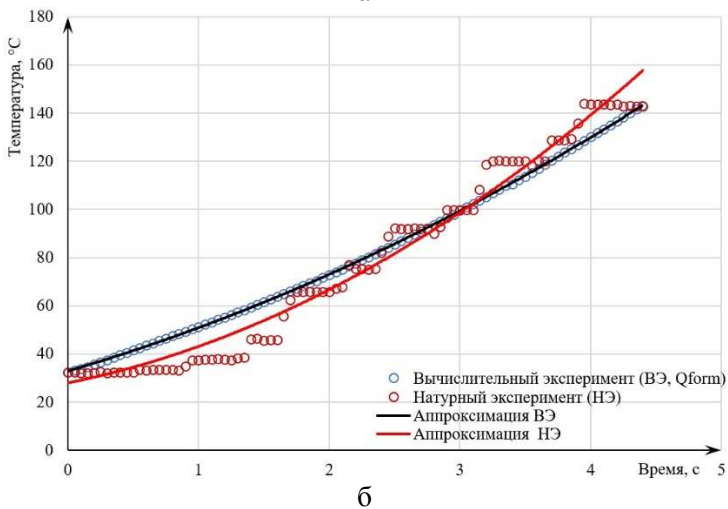
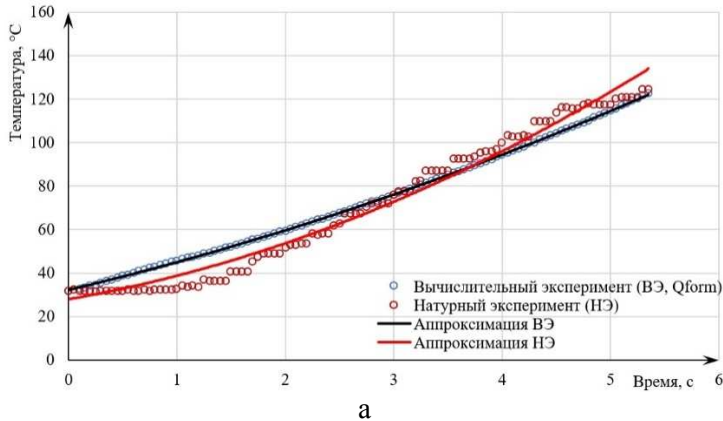


Рис. 1. Графики изменения температуры в образцах в натурном и вычислительном экспериментах: а – углеродистая сталь 20; б – углеродистая сталь 45

Точность аппроксимирующей функции оценивается по значению коэффициента детерминации (R^2). В таблице 1 представлены значения коэффициента R^2 для формул (1)-(4).

Табл. 1. Значения коэффициента R^2

Марка материала	Формула (1)	Формула (2)	Формула (3)	Формула (4)
Сталь 20	0,9816	0,9999		
Сталь 45			0,9785	0,9999

Выводы. Разработана компьютерная модель процесса осадки цилиндрического образца стальной 20 и 45, позволяющая изучить тепловой процесс пластической деформации в адиабатических условиях. Наблюдаемое расхождение (см. рис. 1) между данными вычислительного и натурного экспериментов обусловлена допущением, принятым в расчете о постоянстве значений теплопроводности и теплоемкости во времени.

Список литературы

1. Опёноква Е.А., Петров П.А. Компьютерная модель процесса формирования неразъемного соединения // Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации: сборник тезисов Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, 13 декабря 2024. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2025. – С. 9-11.
2. Умнов А.М., Туриков В.А., Муратов М.Н., Сковорода А.С. Современные методы вычислительного эксперимента в прикладной физике: Учебное пособие. – М.: РУДН, 2008. – 248 с.
3. Власов А.В., Стебунов С.А., Евсюков С.А. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие / под ред. А.В.Власова. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2019. – 383 с.
4. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1979. – 215 с.

References

1. Openkova E.A., Petrov P.A. Computer model of the process of forming a permanent connection // Modern metal processing technologies and means of their automation: abstracts collection of the All-Russian scientific and technical conference of students and postgraduates, December 13, 2024. – Tula: Publ. house of TulSU, 2025. – P. 9-11.
2. Umnov A.M., Turikov V.A., Muratov M.N., Skovoroda A.S. Modern methods of computational experiment in applied physics: Textbook. – M.: RUDN, 2008. – 248 p.
3. Vlasov A.V., Stebunov S.A., Evsyukov S.A. Finite element modeling of technological processes of forging and bulk forming: textbook / edited by A.V. Vlasov. – M.: Publ. house of MSTU, 2019. – 383 p.
4. Stepansky L.G. Calculations of metal forming processes. – M.: Mechanical Engineering, 1979. – 215 p.

Опёноква Екатерина Алексеевна – аспирант	Openkova Ekaterina Alekseevna – postgraduate student
Петров Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»	Petrov Pavel Aleksandrovich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the material forming and additive technologies Department
ekaterina.mospu@mail.ru	

Received 23.06.2025