

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ЭФФЕКТА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОСАДКЕ АЛЮМИНИЯ МАРКИ АД1

*Рулин С.П., Петров П.А.*

*Московский политехнический университет, Москва*

**Ключевые слова:** тепловой эффект, теплоемкость, пластическая деформация, вычислительный эксперимент, алюминий АД1, метод конечных элементов.

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования теплового эффекта пластической деформации цилиндрической заготовки из алюминия марки АД1, выполненного на основе натурного и вычислительного эксперимента. Натурный эксперимент проводится методом испытания сжатием цилиндрического образца при комнатной температуре; вычислительный эксперимент выполнен с применением программы QForm, основанной на методе конечных элементов. При разработке расчетной модели осадки учитываются несколько вариантов задания теплоемкости сплава АД1, что позволяет повысить точность вычислительного эксперимента.

## RESEARCH INTO THE HEAT EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION OF AD1 GRADE ALUMINUM

*Rulin S.P., Petrov P.A.*

*Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia*

**Keywords:** heat effect, heat capacity, plastic deformation, computational simulation, AD1 grade aluminum, finite element method.

**Abstract.** This paper presents the results of a study of the heat effect of plastic deformation of a cylindrical specimen made of AD1 aluminum, based on a full-scale as well as computational experiment. The full-scale experiment was conducted using compression testing of the cylindrical specimen at room temperature; the computational experiment was performed using the QForm program, based on the finite element method. When developing the computational upsetting model, several options for specifying the heat capacity of the AD1 alloy were considered, which allowed for increased accuracy of the computational experiment.

Пластическая деформация металлов и сплавов инициирует тепловой эффект, влияющий на течение металла. Принято считать, что энергия пластической деформации на 90% переходит в теплоту [1-3] и только 10% энергии затрачивается на эволюцию микроструктуры [4].

В адиабатических условиях, когда отсутствует теплопередача в окружающую среду повышение температуры  $\Delta T$  может быть определено зависимостью [4], полученной из уравнения теплопроводности:

$$\frac{dT}{dt} = \Delta T = \frac{\eta'(1-\phi)\sigma_i \dot{\epsilon}_i}{c_p}, \quad (1)$$

где  $\eta'$  – адиабатический поправочный коэффициент, определяющий соотношение между фактическим повышением температуры элементарного объема и повышением температуры в адиабатических условиях [4];  $\phi$  – коэффициент, определяющий долю работы пластической деформации, затрачиваемую на эволюцию микроструктуры, принимается от 0 до 0,1;

$c_p$  – удельная теплоемкость;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжения текучести;  $\dot{\epsilon}_i$  – интенсивность скорости деформации.

Однако исследователи, изучающие тепловой эффект пластической деформации, также отмечают следующее:

1) коэффициент  $\eta'$  представляет собой функцию температуры, скорости деформации, деформации, коэффициентов теплопередачи на границе «заготовка»-«инструмент», тепловых свойств заготовки и излучательной способности заготовки при значении скорости деформации в диапазоне  $0,01-1 \text{ с}^{-1}$  [4];

2) коэффициент  $\phi$  является функцией исходно заданной температуры, скорости деформации, деформации, коэффициентов теплопередачи на границе «заготовка»-«инструмент» и тепловых свойств заготовки [5].

Целью настоящей работы является изучение влияния тепловых свойств материала заготовки (теплоемкости) на тепловой эффект пластической деформации при осадке цилиндрического образца алюминиевого сплава АД1 при комнатной температуре. Рассматривается деформация в адиабатических условиях. Выбор температуры обусловлен характерным режимом обработки давлением данного сплава при изготовлении штамповок прямым и/или обратным выдавливанием в сферическую матрицу с применением сферического пуансона [6].

При проведении расчетов приняты следующие значения коэффициентов в формуле (1): значение  $\eta' = 1$  и значение  $\phi = 0,1$ . Текущее значение температуры ( $T_i$ ), соответствующее заданной величине деформации, скорости деформации может быть определено формулой:

$$T_i = T_0 + \Delta T, \quad (2)$$

где  $T_0$  – начальная (исходная) температура нагрева образца.

Натурный эксперимент выполнен в соответствии с методом испытания сжатием цилиндрических образцов сплава АД1. Образцы изготовлены из прутка деформируемого сплава АД1 методом электроэрозии и последующей механической обработки; размеры образцов – диаметр  $\varnothing 49,3$ , высота 49,3 мм. Количество образцов – 3 шт. Также проведен термографический анализ методом ДСК. Размер образца для ДСК-анализа – диаметр  $\varnothing 5,0$  мм, высота 0,6 мм. В результате теплоемкость сплава АД1 определена экспериментально в диапазоне температур от 20 до  $450^\circ\text{C}$  (рис. 1). Контроль текущей температуры образца во время его пластического деформирования осадкой выполнен с применением термодатчика (отверстие под установку термодатчика  $d = 2,5 \text{ мм}$ ) тип К, установленной в образец на глубину 8 мм (рис. 2, а).

Вычислительный эксперимент выполнен с применением программы QForm, в основе которой использован метод конечных элементов [6]. Разработанная модель процесса осадки цилиндрического образца позволяет вычисляемых параметров напряженно-деформированного состояния и температурного поля в образце на каждом шаге процесса его деформирования, учитывая реологические свойства материала образца – сплава АД1 в диапазоне температур пластической деформации от 20 до  $500^\circ\text{C}$  при скорости деформации от  $0,01$  до  $1,0 \text{ с}^{-1}$ .

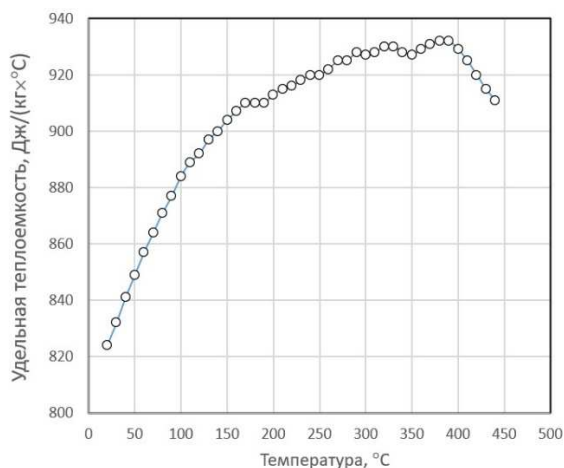


Рис. 1. График зависимости удельной теплоемкости от температуры

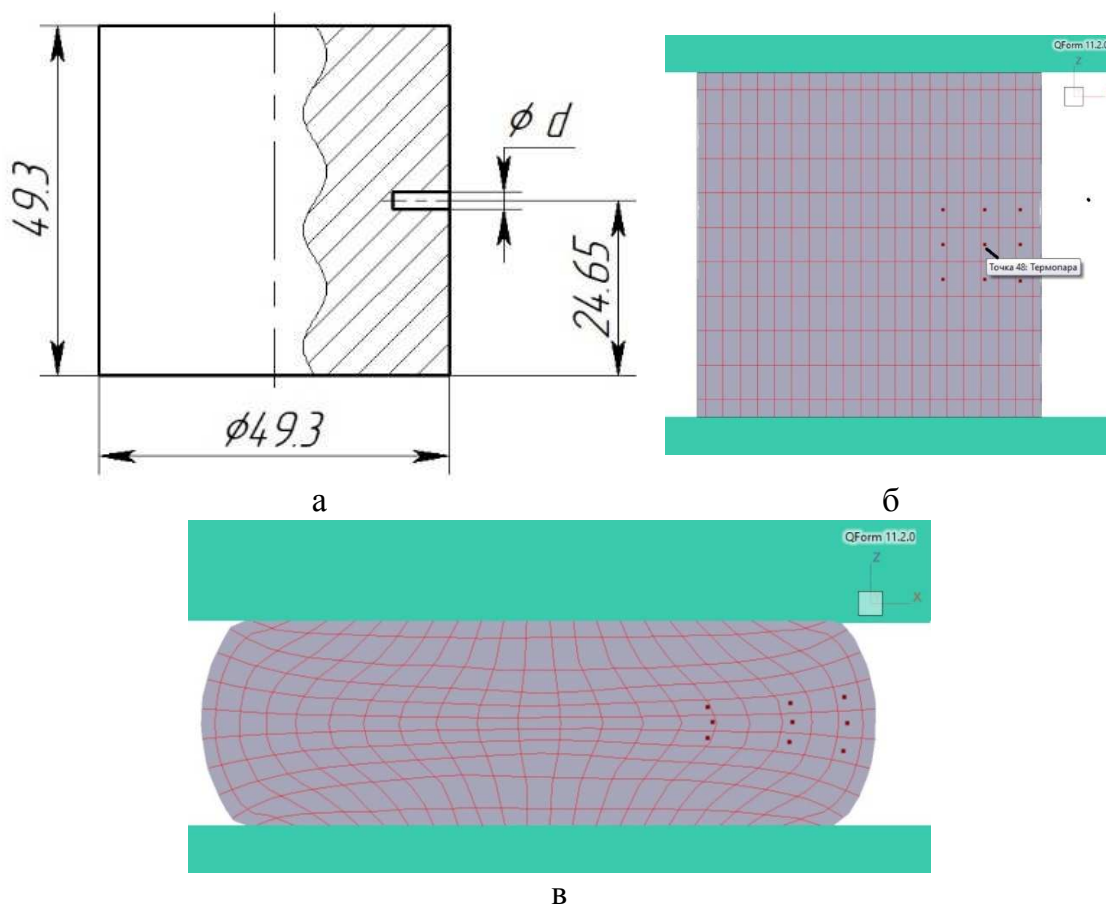


Рис. 2. Схема установки термопары  $\varnothing d$  в образце: а) натурный образец; б) и в) виртуальная модель образца до осадки и после осадки, соответственно

Условия теплопередачи между деформируемым металлом и материалом инструмента принимаются адиабатическими; рассматривается два варианта расчета осадки образца: 1) с учетом теплового эффекта и при постоянной удельной теплоемкости ( $c_p = 868,05$  Дж/(кг·K)) не зависящей от температуры деформации; 2) с учетом теплового эффекта и при переменной удельной теплоемкости, зависящей от температуры деформации (см. рис.1). В каждом из вариантов расчета принимается: значение коэффициента теплопередачи на границе «инструмент»-«заготовка» 30000 Вт/(м<sup>2</sup>·K) и 100000 Вт/(м<sup>2</sup>·K); модель трения А.Н. Леванова и фактор трения равный 1 (отсутствие смазки); условие теплопередачи на границе «инструмент»-«заготовка» соответствует типу

«простой» (адиабатические условия). Сопротивление деформации сплава АД1 приняты из базы данных деформируемых материалов программы QForm в диапазоне температуры и скорости деформации: 20-250°C и 0,01-10 с<sup>-1</sup>, соответственно. Осадка в натурном эксперименте выполняется на гидравлическом пресс с постоянной скоростью рабочего хода 5,5 мм/с (скорость деформации в начальном момент рабочего хода равна 0,1 с<sup>-1</sup>). Натурный эксперимент проведен при температуре 34,5°C (комнатная температура). Вычислительный эксперимент проведен при аналогичном значении скорости рабочего хода и для температуры 34,5°C.

При проведении вычислительного эксперимента текущая температура контролировалась по показанию виртуальной термопары, установленной также, как в натурном эксперименте – в программе QForm термопара задана трассируемой точкой (см. рис. 2, в, трассируемая точка 48).

В таблице 1 представлены результаты проведенных натурных и вычислительных экспериментов.

Табл. 1. Результаты вычислительного эксперимента

| Температура в эксперименте в конце рабочего хода, °C | Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·K)                                                                   | Температура в конце рабочего хода вычислительного эксперимента при постоянной теплоемкости (T <sub>т.конст</sub> ), °C | Температура в конце рабочего хода вычислительного эксперимента при переменной теплоемкости (T <sub>т.вар</sub> ), °C | при постоянной теплоемкости |        | при переменной теплоемкости |        |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------|-----------------------------|--------|
|                                                      |                                                                                                                     |                                                                                                                        |                                                                                                                      | ΔT, °C                      | δ, %   | ΔT, °C                      | δ, %   |
|                                                      | для изотермических условий (температура заготовки, инструмента и окружающей среды одинаковы в начале рабочего хода) |                                                                                                                        |                                                                                                                      |                             |        |                             |        |
| 61,45                                                | 30000,0                                                                                                             | 52,38                                                                                                                  | 52,75                                                                                                                | -9,07                       | -14,75 | -8,70                       | -14,16 |
| 61,45                                                | 100000,0                                                                                                            | 56,33                                                                                                                  | 56,58                                                                                                                | -5,12                       | -8,33  | -4,87                       | -7,93  |

**Выводы.** По результатам сравнительной оценки полученных данных в натурном и вычислительном эксперименте можно сделать вывод о том, что учет зависимости удельной теплоемкости металла (алюминиевого сплава АД1) от температуры позволяет уменьшить относительную погрешность компьютерного моделирования при расчете теплового эффекта пластической деформации.

#### Список литературы

1. Rubtsov V.E., Kolubaev A.V. Effect of Heat Generation Due to Plastic Deformation on Behavior of Surface Layer Material during Sliding // Journal of Friction and Wear. 2009, vol. 30(5), pp. 324-328.
2. Salih O.S., Ou H., Sun W. Heat generation, plastic deformation and residual stresses in friction stir welding of aluminium alloy // International Journal of Mechanical Sciences. 2023, vol. 238, p. 107827.
3. Saha R, Biswas P. Temperature and stress evaluation during friction stir welding of Inconel 718 alloy using finite element numerical simulation // Journal of Materials Eng Performance. 2022, 31, pp. 2002-11.
4. Li S., Li L., He H., Wang G. Influence of the deformation heating on the flow behavior of 6063 alloy during compression at medium strain rates // J. Mater. Res. 2019, 34(2), pp. 309-320.
5. Goetz R.L., Semiatin S.L. The adiabatic correction factor for deformation heating during the uniaxial compression test // Journal of Materials Eng Performance. 2001, vol. 10, pp. 710-717.

6. Рулин С.П., Петров П.А. Разработка компьютерной модели прямого выдавливания в сферическую матрицу // Известия Тульского Государственного университета. Технические науки. – 2024. – №7. – С. 610-615.

Сведения об авторах:

*Рулин Сергей Павлович* – аспирант;

*Петров Павел Александрович* – к.т.н., доцент, доцент кафедры.